



ITSON
UNIVERSIDAD

ALLY SHORING:

Negocios Internacionales 4.0

María Paz Guadalupe Acosta Quintana
Miguel Gastón Cedillo Campos
Ernesto Alonso Lagarda Leyva
COORDINADORES

ALLY SHORING: Negocios Internacionales 4.0

María Paz Guadalupe Acosta Quintana
Miguel Gastón Cedillo Campos
Ernesto Alonso Lagarda Leyva
Coordinadores



Instituto Tecnológico de Sonora

5 de febrero, No. 818 sur, colonia Centro
Ciudad Obregón, Sonora, México; 85000

www.itson.mx

Email: rectoria@itson.mx

Teléfono: (644) 410-90-00

Primera edición, julio 2023

ISBN para ebook: **978-607-609-235-4**

Gestión editorial y diseño

Marisol Cota Reyes

Oficina de publicaciones ITSON

marisol.cota@itson.edu.mx

La presente publicación ha sido dictaminada bajo un proceso doble ciego por pares académicos nacionales e internacionales.

Reservados todos los derechos conforme a la ley.

Hecho en México



**OFICINA DE
PUBLICACIONES
ITSON**

Se prohíbe la reproducción total o parcial de la presente obra, así como su comunicación pública, divulgación o transmisión mediante cualquier sistema o método electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del Instituto Tecnológico de Sonora.

Directorio

Dr. Jesús Héctor Hernández López

Rector

Dr. Jaime Garatuza Payán

Vicerrectoría Académica

Dr. Rodolfo Valenzuela Reynaga

Vicerrectoría Administrativa

Dr. Ernesto Uriel Cantú Soto

Secretarío de la Rectoría

Mtro. Mauricio López Acosta

Dirección Unidad Navojoa

Mtro. Humberto Aceves Gutiérrez

Dirección Unidad Guaymas

Dra. María Elvira López Parra

Dirección Académica de la División de Ciencias
Económico Administrativas

Dr. Armando Ambrosio López

Dirección Académica de la División de
Ingeniería y Tecnología

Dr. Pablo Gortares Moroyoqui

Dirección Académica de la División de
Recursos Naturales

Dra. Guadalupe de la Paz Ross Arguelles

Dirección Académica de la División de Ciencias Sociales
y Humanidades

Contenido

PRÓLOGO.....	8
--------------	---

NEGOCIOS INTERNACIONALES

Desarrollo de indicadores en el Sistema Automatizado Aduanero Integral para toma de decisiones en el sector logístico.....	12
--	----

*Cesar J. Montiel Moctezuma
Gastón Cedillo-Campos
Bernardo Hernández-Sánchez*

Agenda hacia la descarbonización logística en Latinoamérica: una revisión de la literatura	34
--	----

*Rincón-Roncancio, S. M.
Sánchez-Lara, B.*

Marco metodológico para el desarrollo de un plan de resiliencia basado en riesgos aplicado a un hub logístico.....	62
--	----

*Jeancarlos Chen
Luisa Castro, Danna Ramírez
Fabio Reinoso
Yorlenis Sánchez
Jorge Barnett*

Localización de un nuevo Centro de Distribución para la industria de alimentos en Colombia. Aplicación del método del centro de gravedad para ubicación de instalaciones. Centro de gravedad para ubicación de instalaciones	81
--	----

*Laura Camila Rodríguez Hernández
Lourdes Loza-Hernández*

CADENAS DE SUMINISTRO INVERSA

Plataforma tecnológica para la gestión de bahías de carga/descarga en zonas urbanas	95
---	----

*Bernardo Hernández Sánchez
Marisol Barrón Bastida
Miguel Gastón Cedillo Campos
Cesar J. Montiel Moctezuma*

Metodología Lean Six Sigma en Logística 4.0 para mejorar la calidad en los tiempos de descarga dentro del almacén de materias primas	112
--	-----

*Jorge Luis Cruz Trujano
Erick Álvarez Alfaro
Juan José Méndez Palacios*

Open Vehicle Routing Problem solved by Type-1 Singleton Fuzzy Logic System and Evolutionary Computing.....	131
<i>Pascual Noradino Montes Dorantes</i>	
<i>Gerardo Maximiliano Méndez</i>	
<i>Alberto Cavazos-González</i>	

PROCESOS DE FABRICACIÓN

La gestión de los residuos urbanos para la creación de organizaciones para abastecimiento de materiales recuperados.....	153
<i>Juan José Méndez Palacios</i>	

Caracterización de las operaciones logísticas de adquisición de residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.....	167
<i>Salinas Martínez Monserrat</i>	
<i>Sánchez Lara Benito</i>	

Análisis de factibilidad económico para la instalación de una empresa de reciclado de neumáticos en Ciudad Victoria, Tamaulipas.....	184
<i>Guillermo Eduardo García Vega</i>	
<i>María Magdalena Reyes Gallegos</i>	
<i>Araceli Maldonado Reyes</i>	
<i>Ricardo Daniel López García</i>	
<i>Pedro Henoc Ireta Sánchez</i>	
<i>Jessica Adriana Terán Anguiano</i>	

DESARROLLO DE SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

Modelo de asignación de proveedores en una empresa de aftermarket.....	196
<i>Luis Enrique Rivera Mireles</i>	
<i>Lourdes Loza-Hernandez</i>	

Implementación de técnicas de mantenimiento productivo total para la mejora de la disponibilidad de equipo.....	206
<i>Marco Antonio Macias Lucio</i>	
<i>Humberto Jasso Guerrero</i>	
<i>Pedro Henoc Ireta Sánchez</i>	
<i>Adriana Mexicano Santoyo</i>	
<i>Héctor Coronado Reyes</i>	
<i>Ana María Ortiz Elizalde</i>	

Diseño de un modelo de gestión de inventarios de una empresa comercializadora de dispositivos médicos en el sur de Sonora.....	215
<i>Alfredo Bueno Solano</i>	
<i>Estefanía Barriga-González</i>	
<i>Ernesto Alonso Vega-Telles</i>	

CADENAS DE SUMINISTRO ROBUSTAS

Sistema de asignación de la flota vehicular utilizada por una entidad del estado
en Bogotá – Colombia 232

Erika Tatiana Ruíz Orjuela
Santiago Cruz González
Wilson Adarme Jaimes

Desempeño de los algoritmos Genético y Recocido Simulado para resolver
el problema CVRP..... 247

Adriana Mexicano Santoyo
Jesús Carlos Carmona Frausto
Claudio Ramón Bravo
Sonia López Ruiz

Rediseño de rutas de entrega para una empresa panificadora en
Cd. Obregón, Sonora 265

Ernesto Alonso Vega Telles
María del Pilar Lizardi Duarte
Alfredo Bueno Solano
Juan Daniel Ortiz Monge

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS LOGÍSTICOS

Estudio comparativo de métodos para resolver el problema de calendarización
en una línea de producción manufacturera 287

Jesús Carlos Carmona Frausto
Adriana Mexicano Santoyo
Salvador Cervantes Alvarez
José Antonio Cervantes Alvarez

Comparative study of different dispatch rules applied to a case study 307

Yolince Mireille Leal Gomez
María Magdalena Reyes Gallegos
Iván Garza Greaves
Pedro Henoc Ireta Sánchez
Héctor Coronado Reyes

5S como estrategia de gestión logística en las micro y pequeñas empresas
del sur de Sinaloa 322

María Guadalupe Velarde Rodríguez

Semblanza de los coordinadores 338

MÁS RESILIENCIA LOGÍSTICA. MENOS CONTAMINACIÓN AMBIENTAL **Cómo la tecnología favorecerá el “Nearshoring” (sin contaminar en el intento)**

Regionalización de las cadenas de suministro

En un mundo volátil, incierto, complejo y ambiguo, un paradigma está volviéndose cada vez más fuerte en la mente de los tomadores de decisiones públicos y privados: entre más local sea una cadena de suministro, más resiliente y sostenible será. La globalización se está moviendo muy rápido hacia un siguiente paso: la regionalización de las cadenas de suministro o “Nearshoring”. Ante ello, nuestro más reciente análisis muestra que nuestra mejor oportunidad como país, es movernos hacia el uso de la tecnología digital para la construcción de cadenas de suministro más resilientes y menos contaminantes. La nueva regla del juego es, al mismo tiempo, mitigar el cambio climático y ser más competitivos.

Recientemente, la líder de pensamiento en cadenas de suministro, Bidiya Vakil, propuso el desarrollo de una “Red Panamericana de Cadenas de Suministro” para incrementar la resiliencia y competitividad de los países de “Las Américas”. Sin embargo, por mencionar el caso más cercano, la actual falta de coordinación transfronteriza entre México y los EE.UU. ha llegado a provocar horas de parálisis en el cruce de la carga. En tanto no exista interoperabilidad logística transfronteriza entre los países, no contaremos con el elemento clave fundamental para una integración económica fluida. En el ámbito de la moderna logística civil, la interoperabilidad logística se entiende como la capacidad de organizaciones independientes para conducir de forma conjunta y fluida, operaciones y negocios con base en procesos estandarizados y digitalizados que conformen un solo lenguaje para la acción.

“Efecto Frontera”: un gran desafío que está revelando grandes oportunidades

Actualmente los participantes transfronterizos tanto públicos como privados, están operando desde una perspectiva poco colaborativa. Esto resulta en un “Efecto Frontera” que inyecta incertidumbre a los flujos de carga en al menos dos fases. La primera fase es la incertidumbre durante los tiempos de cruce debido a la falta de estandarización y digitalización de los procesos, en consecuencia, las empresas manufactureras se “protegen” de la variabilidad incrementando los inventarios de seguridad. Pero una vez que la carga cruza la frontera, opera la segunda fase de incertidumbre. Debido a que el transportista desconoce exactamente cuándo y cuanta carga deberá mover cada día, como lo señala José Minarro, Director de Sunset Transportation: “se crea un ambiente de incertidumbre y de poca planeación para asignar la carga a un chofer y a un tractor disponibles. Es un juego de improvisación diaria para el transportista quien está intentando asignar múltiples

cargas a su flotilla de tractores/operadores.” Como resultado, las cadenas de suministro incurren en sobre costos que, en realidad, son evitables.

Existen al menos dos razones que explican lo anterior. Por un lado, los actuales sistemas de logística empresarial han sido diseñados para responder a los objetivos de cada empresa en lo individual. Por lo tanto, la mayoría de las redes logísticas (con recursos en flotas de vehículos, almacenes, etc.) se traslapan entre ellas sin posibilidad de compartir recursos. Por otro lado, los actuales sistemas y procesos transfronterizos de cada gobierno se mantienen operando, como se espera, para defender los intereses nacionales, pero sin conectar mejor a uno de los vasos comunicantes que los tres países acuerdan es de beneficio mutuo, la fluidez del comercio.

Para dimensionar la importancia de actuar rápido en este tema, unos números. El ecosistema transfronterizo actual es responsable de procesar cada año comercio por aproximadamente \$700 mil millones (alrededor de \$100 mil pesos anuales por cada mexicano), todo ello a través de 7 millones de cruces de camiones comerciales y 1.2 millones de cruces de vagones de ferrocarril. Varias publicaciones muestran que actualmente se tiene una “fila de espera” de empresas que esperan invertir y localizar sus operaciones en México con el objetivo de exportar a los EE.UU. De acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), a la actual impresionante cantidad de comercio y cruces, se agregará al menos 5% como resultado del proceso de “Nearshoring” (alrededor de 30 mil millones de dólares). De este modo, el nivel de congestión de los cruces, la contaminación, los costos logísticos, los riesgos de seguridad y las posibles interrupciones de la cadena de suministro podrían alcanzar niveles ruinosos.

Comunidad digital de cadenas de suministro transfronterizas: un cambio de juego

La interoperabilidad logística es la base de un enfoque tecnológico novedoso denominado “comunidad digital de cadenas de suministro transfronterizas”, la cual funciona como una “Torre de Control” para el monitoreo y gestión binacional de los flujos de carga. Con base en la estandarización y digitalización de los procesos transfronterizos (comerciales, aduanales, de seguridad, etc.) desde un enfoque binacional, se prevé que es el cambio en el juego competitivo que la región de América del Norte requiere. Como lo ha dicho John Corey, presidente de la Freight Management Association of Canada: “la digitalización de los procesos transfronterizos desde una perspectiva tri-nacional sería el motor para llevar a toda la región de América del Norte al siguiente nivel”.

Es factible mitigar o eliminar el “Efecto Frontera” a través de una “Comunidad Digital de Cadenas de Suministro Transfronterizas”. Esto permitiría avanzar hacia el aprovechamiento de los efectos positivos del “Nearshoring” (crecimiento económico), mitigando los efectos negativos (contaminación del agua y del aire). Para ello se requiere que gobiernos y empresas impulsen en conjunto, al menos tres acciones concretas:

Crear una Mapa de Ruta Tecnológico y de Logística para la digitalización de los puertos fronterizos terrestres como primer paso para lograr la interoperabilidad logística necesaria y con ello, disminuir el tiempo de cruce transfronterizo y hacerlo más fluido, seguro, resiliente y sostenible;

Elaborar un Plan de Acción para cada puerto fronterizo terrestre a lo largo de la frontera México-EE.UU. que facilite la adopción en cada uno, de su propia “comunidad digital de cadenas de suministro transfronterizas”;

Promover Pilotos de Prueba bien delimitados en puertos fronterizos seleccionados con el objetivo de ganar confianza en la adopción de tecnologías digitales implementadas con perspectiva binacional.

El crecimiento económico con bienestar para los ciudadanos de América del Norte, será tan impetuoso, como resilientes y sostenibles sean sus cadenas de suministro transfronterizas. Sin embargo, esto no podrá ser en algún momento “realidad cotidiana”, mientras no haya una verdadera interoperabilidad logística transfronteriza

Miguel Gastón Cedillo Campos

Doctor en Transporte por la Universidad de Paris

Miembro del Comité de Tecnología del Colegio de Ingenieros Civiles de México

NEGOCIOS INTERNACIONALES

Desarrollo de indicadores en el Sistema Automatizado Aduanero Integral para toma de decisiones en el sector logístico

Cesar J. Montiel Moctezuma, Gastón Cedillo-Campos y
Bernardo Hernández-Sánchez
Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística
Instituto Mexicano del Transporte

Resumen— *En la actualidad, en México se han desarrollado y están a disposición indicadores económicos para identificar el comportamiento del mercado a nivel nacional e internacional, pero no son suficientes para análisis con un enfoque en logística y transporte. Para ello, es necesario contar con la información sobre las toneladas movidas por tipos de productos con otros países, por ejemplo, o incluso, agregar información sobre los estados/aduanas por donde pasa dicha mercancía. En esta investigación se realiza un análisis estadístico de la información recolectada de los pedimentos generados por la Administración General de Aduanas. Se proponen indicadores que representan la tendencia del comportamiento de las operaciones comerciales del país, con el objetivo de identificar la información relevante para mejorar la toma de decisiones del sector público y privado.*

Palabras Clave: Comercio Exterior, Logística, Indicadores, Pedimentos Aduanales

Introducción

La economía mexicana depende principalmente del comercio exterior relacionado con Estados Unidos. Se trata del principal socio comercial, el cual recibe más de tres cuartas partes de las exportaciones del país. La “Balanza Comercial de Mercancías de México” (BCMM) (Inegi, 2021a) ha tenido una tendencia negativa en los últimos años, lo anterior a diversas razones, entre ellas, tensiones comerciales e incertidumbre internacional como las fluctuaciones en el precio del petróleo, entre otros. Con el interés de mejorar los análisis desde un punto de vista logístico, más que económico, es importante desarrollar indicadores que permitan al país obtener la información de la evolución del comercio internacional de mercancías; estos indicadores pueden proveer de los datos necesarios para diseñar y evaluar nuevas y/o mejoradas políticas públicas, optimizar las decisiones del sector privado y público, e identificar líneas de investigación que soporten la competitividad logística y por ende, la economía nacional, en el ámbito empresarial, estos

indicadores son llamados KPI (Key Performance Indicator), los cuales son utilizados para descubrir y comprender cuellos de botella, evaluar la eficiencia de los trabajadores y las maquinas, y monitorear las métricas reales de una organización (Kaganski et al., 2017) to be able to stay in competitive environment, organizations have come to the understanding, that monitoring of enterprise processes and factory floor is one of the ways to achieve better efficiency, performance and overview. As consequence of several frameworks, the methodologies has been proposed during last years. The companies are dealing with different key performance indicators (KPI).

De acuerdo a los datos reportados por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (Inegi, 2019; INEGI, 2021), en el mes de noviembre de 2021 se registraron 45,587 millones en exportaciones y 45,699 millones de dólares en importaciones, tal como se muestra en la Figura 1. Por otro lado, en la Figura 2 se puede observar la evolución de la tasa de variación anual para cada actividad a lo largo de la última década.

El proceso para la recolección de información de la BCMM se encuentra a cargo de la Administración General de Aduanas (AGA), la cual está adscrita al Servicio de Administración Tributaria (SAT). Este último, integra las operaciones registradas en las 49 aduanas de todo el país, en este proceso el INEGI no interviene.

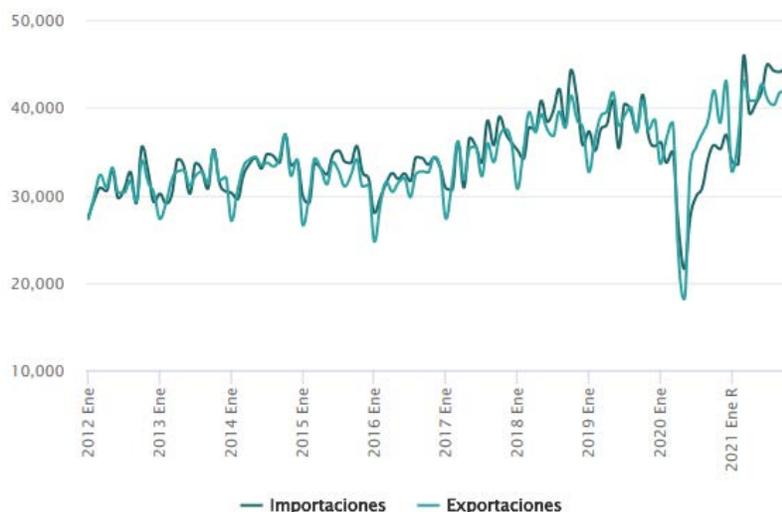


Figura 1. Importaciones/Exportaciones de México (dólares)
Fuente: Balanza Comercial de Mercancías, INEGI

Este proceso inicia con la transmisión de la información registrada en los pedimentos llenados por los apoderados aduanales de las entidades autorizadas; posteriormente se reenvía la información al “Sistema Electrónico Aduanero” (SEA) a través del “Sistema Automatizado Aduanero Integral, Tercer Milenio” (SAAI-M3) para su verificación con el “Validador de Operaciones de Comercio Exterior” (VOCE). Cada uno de estos sistemas

son diseñados bajo estándares establecidos por las autoridades aduaneras que elaboran y validan la información de los pedimentos (AGA, 2021; Inegi, 2019).

La principal área de oportunidad para las estadísticas que se muestra en la BCMM, es que tienen un enfoque económico, y para las empresas que transportan las mercancías no es útil para la toma de decisiones logísticas. Esto es debido a que necesitan realizar análisis específicos sobre los productos y sus flujos de distribución. Contar con información desde el enfoque de los flujos logísticos, permitiría optimizar la toma de decisiones tanto para el sector público (desarrollo de infraestructuras de transporte y logística), como para el sector privado (optimización de operaciones logísticas).



Figura 2. Tasa de variación anual
Fuente: Balanza Comercial de Mercancías, INEGI

Sistema Automatizado aduanero integral

Tal como se mencionó, la información referente a los pedimentos es enviada al SAT por los agentes aduanales o representantes legales autorizados conforme a la “Ley Aduanera”, artículo 40. Lo cual se basan en el artículo 16-A relativo a incluir la información necesaria para su validación (AGA, 2021). Los archivos con los datos correspondientes a cada pedimento deben tener el formato “mpppnnn.ddd” donde cada carácter significa lo siguiente:

- una constante que identifique los archivos en el sistema SAAI-M3 (m);
- la patente o autorización del agente aduanal o representante legal (pppp);
- número consecutivo para identificar archivos subidos el mismo día (nnn);
- el día en que se efectúa la transmisión (ddd).

Cada archivo es transmitido al pre-validador de SAAI donde se verifica que cumplan con los criterios sintácticos, catalógicos, estructurales y normativos definidos. Posteriormente, son validados a través del sistema VOCE, y finalmente son enviados al SAT.

Cada archivo está conformado por un conjunto de Registros de datos, los cuales a su vez están integrados por información específica sobre el tipo de operación. En los Lineamientos Técnicos de Registros VOCE-SAAI M3 (AGA, 2021) en su versión 9.0 de agosto del 2021, se puede encontrar la información detallada que contiene cada uno de los Registros dependiendo del tipo de movimiento:

- Pedimento Normal (PN);
- Desistimientos o Eliminación (DE);
- Informe de la Industria Automotriz (IIA);
- Pedimento Complementario (PC);
- Previo de Consolidado (PCo);
- Global Complementario (GC);
- Tránsitos (T);
- Despacho Anticipado (DA);
- Rectificaciones (R);
- Confirmación de Pago (CP).

Aunque cada movimiento tiene sus propias reglas de operación, los Registros son controlados de tal manera que se puedan identificar cada uno de estos sin importar que sean movimientos diferentes. La lista de Registros y la información que tienen de acuerdo a los tipos de operación se explica en la Tabla 1.

Cada uno de estos Registros tiene un conjunto de campos que tienen que ser llenados por los agentes aduanales. Sin embargo, debido a la gran cantidad de campos en cada uno de los Registros, para esta investigación se seleccionaron los más representativos, para esto, en primera instancia, se clasificaron los registros que tuvieran alguna relación con el flujo logístico de mercancías, posteriormente, en cada registro se descartaron campos con valores que no presentaran información relevante o que fueran datos que se considerarían confidenciales, tal como nombre de las empresas y sus respectivas direcciones. Otro punto importante a considerar, fue excluir aquellos Registros y campos con los cuales INEGI ya ha realizado análisis desde un enfoque macro económico (Inegi, 2021b).

Tabla 1. Registros VOCE-SAAI M3

No.	Registro	Tipos de Movimientos										
		PN	DE	IIA	PC	PCo	GC	T	DA	R	CP	
500	Inicio de Pedimento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
501	Datos Generales	X					X	X			X	
502	Transporte	X						X			X	
503	Guías	X						X			X	
504	Contenedores	X						X			X	
505	CFDI o documento equivalente	X						X			X	
506	Fechas	X		X	X		X	X			X	
507	Identificadores a nivel pedimento	X		X	X	X	X	X			X	
508	Cuentas Aduaneras y Cuentas Aduaneras de Garantía a nivel pedimento	X			X			X			X	
509	Tasas a nivel pedimento	X			X			X			X	
510	Contribuciones a nivel pedimento	X			X		X	X			X	
511	Observaciones a nivel pedimento	X		X	X		X	X			X	
512	Descargos	X			X		X		X		X	
513	Compensaciones	X			X		X				X	
514	Documentos que amparan las formas de pago virtuales	X			X		X				X	
515	Informe de la Industria Automotriz			X								
516	Candados	X						X			X	
520	Destinatarios	X									X	
551	Partidas	X			X		X	X			X	
552	Mercancías	X			X						X	
553	Permisos	X						X			X	
554	Identificadores a nivel partida	X						X			X	
555	Cuentas Aduaneras de Garantía a nivel partida	X			X			X			X	
556	Tasas a Nivel Partida	X						X			X	
557	Contribuciones a nivel partida	X					X	X			X	
558	Observaciones	X			X			X			X	
560	Partidas del Informe de la Industria Automotriz			X								
301	Datos Generales del Pedimento Complementario				X							
302	Prueba Suficiente				X							
351	Determinación de Contribuciones a nivel partida al amparo del Art. 2.5 MEC											
352	Detalle de importación a EUA/CAN al amparo del Art. 2.5 del T-MEC	X										
353	Determinación y/o pago de contribuciones por aplicación del Art. 2.5 del T-MEC a nivel partida en el pedimento de exportación (Retorno)										X	
355	Pago de Contribuciones a nivel partida por aplicación del Art. 2.5 del TMEC											
358	Observaciones a nivel partida (Pedimento Complementario)											
601	Datos Generales del Previo de Consolidado					X						
701	Rectificación										X	
702	Diferencias a nivel pedimento										X	
800	Firma Electrónica de Pedimento	X	X	X	X	X	X	X			X	
801	Fin de Archivo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia con base Lineamientos Técnicos de Registros VOCE-SAAIM3

De la información relevante que pudiera servir para mejorar la toma de decisiones, se identificaron 5 Registros, y dentro de cada uno de estos se filtraron los campos que tuvieran impacto en los indicadores; la cantidad de información final por Registro se puede observar en la Tabla 2:

Tabla 2. Registros SAAI M3 seleccionados

No.	Registro	Campos	
		Total	Seleccionados
501	Información general del pedimento	35	13
502	Transportistas y sus características	9	2
505	Comprobantes Fiscales o documentos equivalentes	17	5
520	Destinos finales de la mercancía	10	2
551	Información detallada de la mercancía	26	11

Fuente: Elaboración propia con base Lineamientos Técnicos de Registros VOCE-SAAI M3

Con la clasificación de los Registros y sus respectivos campos, se realizó un diagrama con la relación existente entre la información, tal como se muestra en la Figura 3. Cada uno de estos campos se seleccionó de acuerdo a la importancia que podría tener para la elaboración de indicadores enfocados al movimiento nacional e internacional de las mercancías.

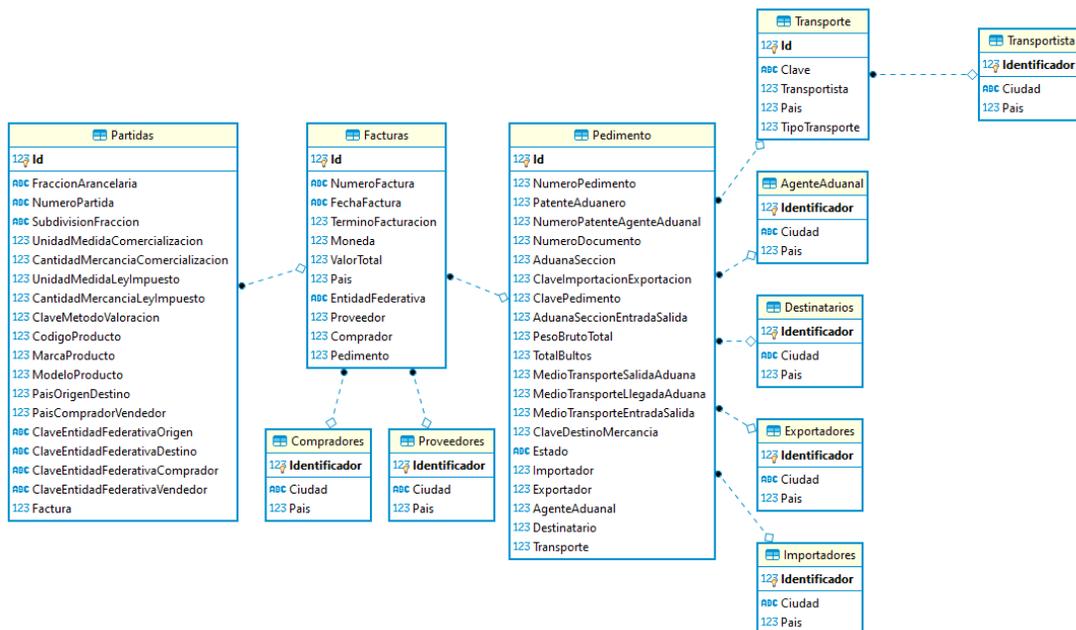


Figura 3. Campos de Registros SAAI M3

Fuente: Elaboración propia con base Lineamientos Técnicos de Registros VOCE-SAAI M3

Para el caso particular del Registro: CFDI, existe un campo con la información referente a los INCOTERMS, con esto se pueden identificar cuantos son los pedimentos relacionados con cada regla internacional y con la cantidad de toneladas movidas. Los INCOTERMS que se encuentran en la base de datos analizada contempla algunos de ellos que ya no existen en la nueva normativa publicada en el 2020 (Diario Oficial de la Federación, 2021), tal como DAT (Delivered at Terminal – Entregada en Terminal). Los INCOTERMS actuales y sus características se pueden visualizar en la Figura 4 y Figura 5.

Metodos de Analisis y Definicion de Indicadores

Antes de comenzar con los métodos utilizados en esta investigación, es necesario aclarar los diferentes tipos de analítica de datos, definidos por INFORMS (Informs, 2022):

- Análisis descriptivo. A través de datos históricos da una idea de eventos pasados.
- Análisis predictivo. Ofrece una idea de que es lo que pasará en el futuro.
- Análisis prescriptivo. Proporciona consejos para mejorar u optimizar la toma de decisiones.

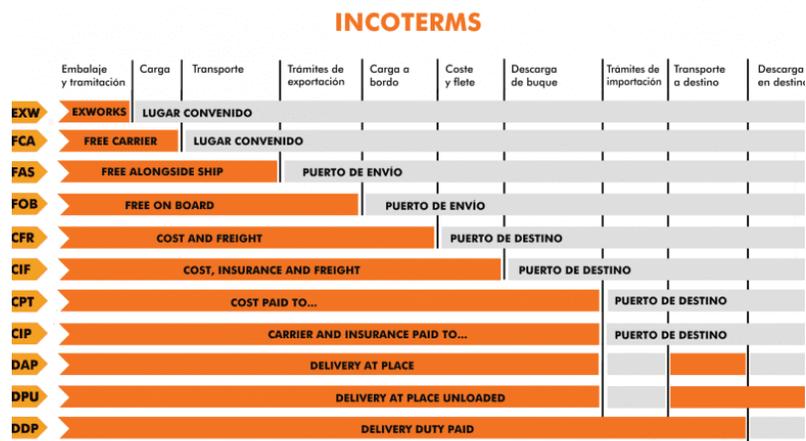


Figura 4. Flujo de los INCOTERMS

Fuente: Incoterms® 2020

Desde un enfoque organizacional, el ambiente de negocio se encuentra en cambios constantes, los cuales aumentan la complejidad del mismo. Esto provoca que las organizaciones se enfoquen en actividades para adaptarse a dichos cambios, las cuales involucran decisiones a nivel operacional, táctico y estratégico. De este problema nacieron los Sistemas de Soporte a las Decisiones (Decision Support Systems – DSS) (Keen, 1980).

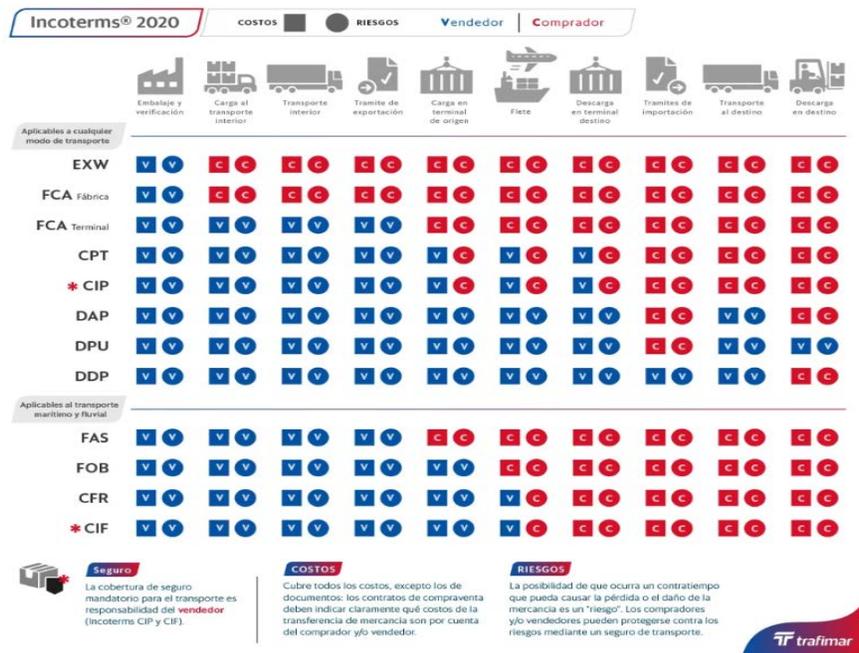


Figura 5. Responsabilidades de los compradores/vendedores
Fuente: Incoterms® 2020

Posteriormente, con la evolución de las tecnologías, de los DSS emergió la Inteligencia de Negocios (Business Intelligence - BI), con el objetivo de habilitar el acceso interactivo a los datos, su manipulación, y la posibilidad de conducir análisis apropiados a los gerentes de negocios para mejorar los informes y las decisiones que estos tomaban, a través de un análisis de datos actuales e históricos (análisis descriptivo) (Sarafrazi et al., 2019). Sin embargo, los DSS son solo una parte de BI, ya que este último incluye otras capacidades, los cuales pueden ser clasificados en 4 componentes principales: a) almacenamiento de datos (las fuentes de información); b) análisis de negocio (herramientas para extraer, manipular y analizar los datos); c) gestión del rendimiento empresarial (monitoreo y análisis del desempeño); d) interfaz de usuario (visualización de resultados para mejorar la toma de decisiones) (Abd et al., 2014; Cecilia Ruz, 2015; Turban, 2015).

Además, se utilizaron algunos métodos de Analítica de Negocios (Business Analytics - BA); BA es considerado como un complemento de BI el cual se enfoca en el análisis de que pasará a futuro a través del análisis de datos históricos, con el objetivo de comprender el desempeño de la organización y ayudar en la planificación e identificación de patrones para la predicción de tendencias (IBM, 2022).

Esta investigación se basó en dos componentes de BI para el análisis descriptivo, almacenamiento de información y el análisis de negocio, y algunos métodos de BA para el análisis predictivo. Los métodos utilizados fueron: a) análisis de matrices origen-destino

(Pineda Dorado et al., 2014); b) análisis de modelos de series de tiempo y métodos de estimación para desarrollar predicciones y pronósticos (Ortúzar & G. Willumsen, 2011).

Matrices Origen-destino

En la planeación del sistema carretero, tener matrices origen-destino sirve para utilizar modelos de asignación que permitan pronosticar las rutas más utilizadas para el movimiento en la red carretera. Con base en el enfoque anterior, para organizar la información origen-destino de los movimientos de carga, se puede realizar de dos maneras, la primera es a través de una matriz de viajes que representan un arreglo tabular con la información de los hechos de un punto i a un punto j en un periodo temporal específico, también conocidas como matrices origen-destino (O-D); la segunda manera es a través de factores que influyen en los viajes de los orígenes a los destinos, Esta información relativa suele tomarse en intervalos de tiempo más extensos que en las matrices O-D (Moreno Quintero et al., 2021).

Una matriz O-D es una herramienta para identificar variables como tiempo o distancia definidos desde un origen hasta un destino. En la mayoría de los casos representan los totales de la variable analizada para cada combinación de cada origen i con cada destino j . En la Tabla 3 se muestra la estructura básica de una Matriz O-D (Moreno Quintero et al., 2021).

Tabla 3. Estructura matriz Origen-Destino

Origen \ Destino	Destino					Totales
	1	2	...	j		
1	$V_{1,1}$	$V_{1,2}$...	$V_{1,j}$	T_{O1}	
2	$V_{2,1}$	$V_{2,2}$...	$V_{2,j}$	T_{O2}	
...	
i	$V_{i,1}$	$V_{i,2}$...	$V_{i,j}$	T_{Oi}	
Totales	T_{D1}	T_{D2}	...	T_{Dj}	$T_{Oi,Dj}$	

Fuente: Estimación de matrices O-D del autotransporte de carga basada en cartas porte

Partiendo de este enfoque, algunos indicadores que podrían ser desarrollados para la información recolectada de pedimentos se pueden definir a continuación:

Principales Exportadores/Importadores por Tipo de Producto;

- Destinos del país para las importaciones;
- Modos de Transporte más utilizados para movimientos nacionales;
- Modos de Transporte usados como transbordos nacionales e internacionales;

- Toneladas movidas por Modo de Transporte;
- Aduanas con mayor movimiento de mercancías por tipo de producto;
- Medios de Transporte principales para la llegada y salida de las aduanas.
- Modelos de Tendencia

Una serie de tiempo es un conjunto de datos estadísticos que se recopilan, observan o registran en intervalos de tiempo regulares (Cepal, 2015), las cuales cuentan con un conjunto de componentes:

Tendencia Secular. Caracteriza el patrón gradual y consistente de las variaciones propias de la serie, consideradas consecuencias de fuerzas persistentes que afectan el crecimiento o la reducción de la misma;

Variación Estacional. Representa la variabilidad en los datos debida a influencias de las estaciones correspondiente a año tras año en el mismo periodo;

Variación Cíclica. Secuencias alternas de puntos abajo y arriba de la línea de tendencia que duran más de un año;

Variación irregular. Factores a corto plazo, imprevisibles y no recurrentes que afectan a la serie de tiempo;

Para identificar la tendencia de las series de tiempo (ESRI, 2021), se identifican dos métodos principales, la tendencia lineal y la tendencia no lineal (Minitab, 2019) , y de los cuales se pueden identificar algunos otros métodos de suavizamiento de la serie (NumXL, 2016):

Tendencia Lineal. Muestra que algo aumenta o disminuye a un ritmo constante. El método más utilizado es el método de mínimos cuadrados;

Tendencia No Lineal. Cuando la serie de tiempo presenta un comportamiento curvilíneo, algunas categorías son la polinomial, logarítmica, exponencial y potencial;

Promedio Móvil. Se construye al sustituir cada valor de una serie por la media obtenida con esa observación y algunos valores inmediatos anteriores y posteriores utilizando la

Ecuación 1:

$$1) \quad Y_t = \frac{\sum_{i=0}^n X_i}{n}$$

Promedios Móviles Ponderados. Es una continuación del método anterior, pero con la diferencia que cada dato tiene un factor de ponderación diferente, dándole un peso mayor a datos más actuales, tal como se muestra en la Ecuación 2:

$$2) \quad Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_{t-i}}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Desarrollo del Análisis

Disponibilidad

Para esta investigación se trabajó con una base de datos con los pedimentos registrados en el 2016, la cual cuenta con 8,704,196 filas, distribuidas en 2,364,507 exportaciones y 6,339,689 importaciones, y de los cuales se puede observar en la Figura 6 la distribución mensual.

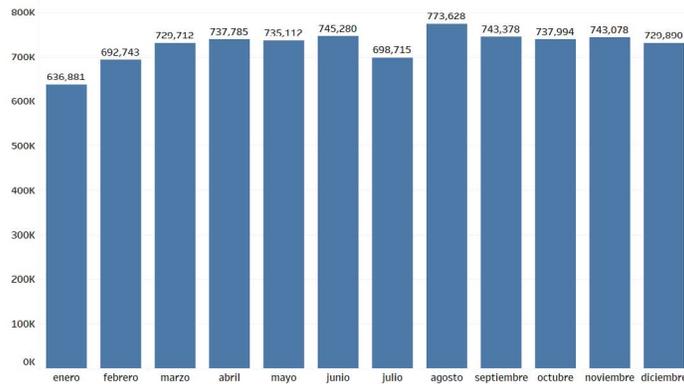


Figura 6. Cantidad de pedimentos por mes

Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Para el campo de fracción arancelaria que se encuentra en el Registro 551, los códigos hacen referencia a la LIGIE (Ley de los Impuestos Generales de Importación y Exportación) (Secretaría de Economía, 2021), y no a los catálogos del Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) (Inegi, 2021c), además, la mayoría de los campos se encuentran con códigos, así que se realizó una limpieza de la base de datos basada en el Anexo 22 de las Reglas Generales de Comercio Exterior (Diario Oficial de la Federación, 2022), documento considerado como el manual o instructivo para el llenado de pedimentos.

Flujo Internacional

Para el caso de los movimientos de mercancías con otros países se manejaron dos variables principales, el valor comercial total y la cantidad de toneladas. Para la primera variable se identificó un total de 8.8 billones de pesos relacionadas a las importaciones y un total de 9.7 billones de pesos con las exportaciones, con un total de 2,823 millones de toneladas de las cuales se distribuyen un 7.16% y 92.84% en exportaciones e importaciones respectivamente.

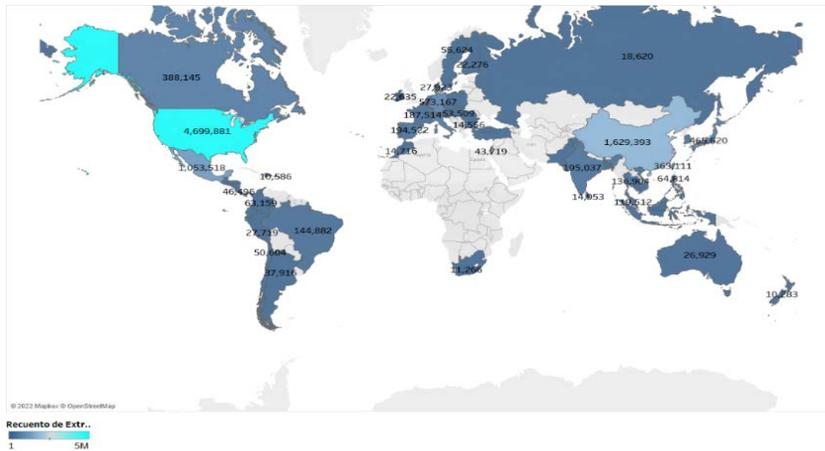


Figura 7. Cantidad de pedimentos por país
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

La cantidad de pedimentos de cada uno de los países se puede observar en la Figura 7, pero solo son mostrados los países más relevantes que han tenido alguna relación comercial con México, es por eso que solo se muestran aquellos con más de 10 mil registros; por otro lado, se puede observar que en México también hay una gran cantidad de pedimentos registrados, esto se debe a que son operaciones virtuales, es decir, actividades que se efectúan como transferencias entre aduanas o recintos fiscalizados, antes de ser exportados o importados. En la Figura 8 se puede observar el porcentaje del total de toneladas movidas relacionadas a las exportaciones (izquierda) e importaciones (derecha) para los principales países relacionados a estas operaciones comerciales.

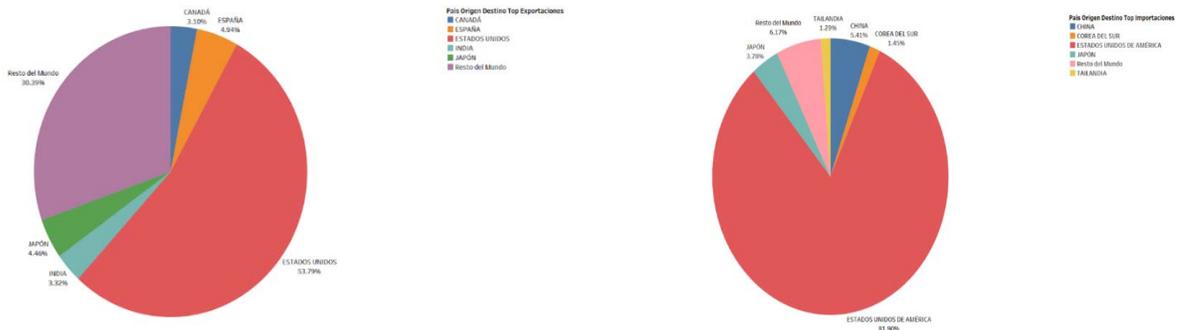


Figura 8. Toneladas totales
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Flujo Nacional

Para el caso nacional, se identificaron y analizaron los pedimentos relacionados a cada uno de los estados de la república, de los cuales los totales por operación se puede observar en la Figura 9.

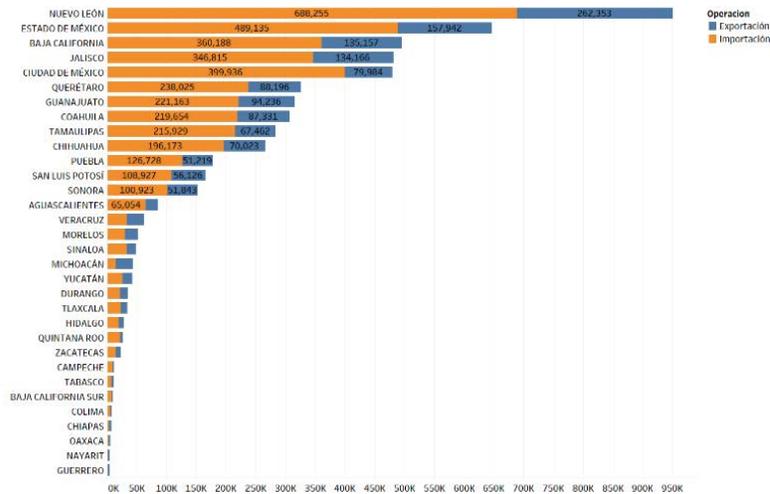


Figura 9. Cantidad de pedimentos por estado
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Posteriormente se identificó cuáles eran los estados con mayor cantidad de toneladas movidas para ambas operaciones, para el caso de importaciones el Estado de México cuenta con 56.92% del total y Sonora con 31.48%, equivalentes a 645 millones de toneladas y 357 millones de toneladas respectivamente; para el caso de las exportaciones el Estado de México tiene un 26.85% equivalente a 26 millones y Nuevo León 13.85% del total equivalente a 13 millones de toneladas.

Medio de Transporte

La cantidad de pedimentos registrados para cada uno de los tipos de transporte de acuerdo al Anexo 22 de las Reglas Generales de Comercio Exterior, se puede observar en la Figura 10.

En el caso de las importaciones, se observó un caso particular en el cual sobresale el medio “Tubería” con la mayor cantidad de toneladas movidas, tal como se muestra en la Figura 11.

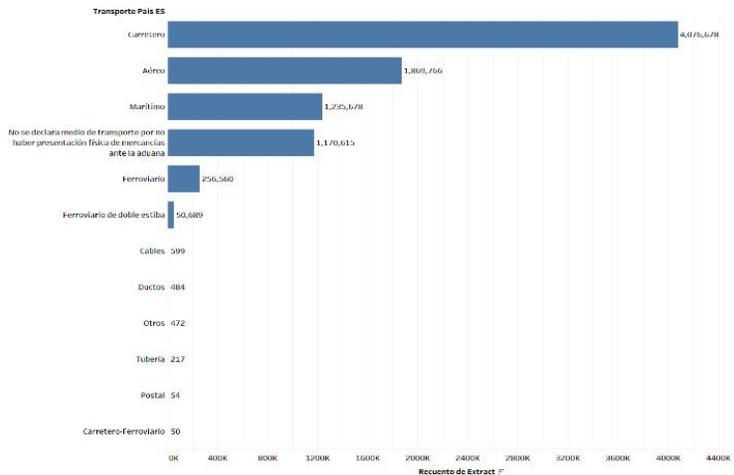


Figura 10. Pedimentos por tipo de transporte
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Por otro lado, para el caso de las exportaciones, el transporte marítimo se identificó como el modo de transporte con mayor contribución al participar con 52.31% del total de toneladas movidas, tal como se observa en la Figura 12.

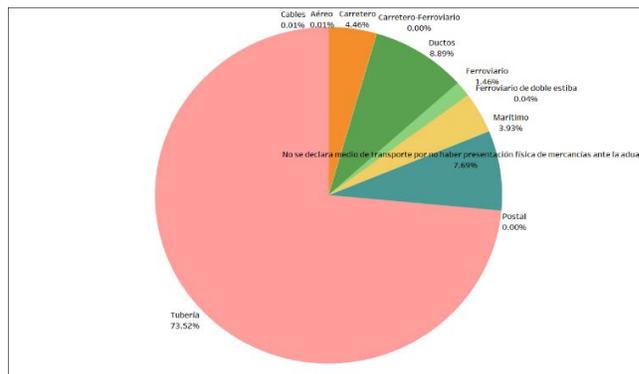


Figura 11. Modos de transporte en importaciones
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Para ambos casos, existe una gran cantidad de pedimentos que no declaran medio de transporte por no haber presentación física de mercancías ante la aduana.

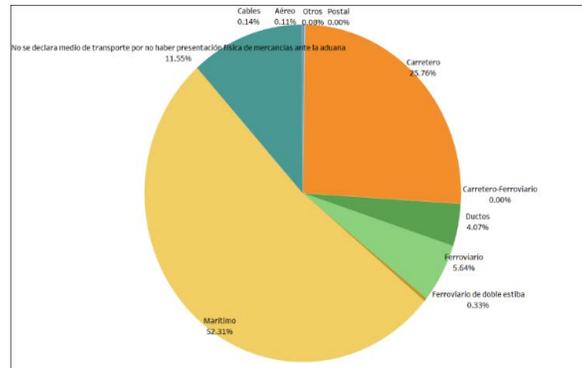


Figura 12. Modos de transporte en exportaciones
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Flujo por tipo de mercancía

Para el análisis por tipos de producto, se codificó de acuerdo al LIGIE contemplando la clasificación más general. Es decir, la clasificación dada para la sección y el capítulo definidos en la Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de julio de 2020. En la Figura 13 se puede observar el porcentaje del total de toneladas movidas para cada clase.

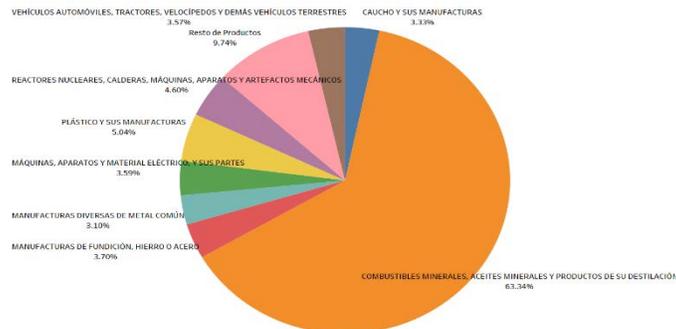


Figura 13. Toneladas por fracción arancelaria
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Análisis General

Uno de los indicadores más importantes identificados en la literatura para Cartas Porte (Moreno Quintero et al., 2021) y más utilizado a nivel nacional es el Flete/Tonelada-Kilómetro, y a pesar de que se puede trasladar este indicador a los pedimentos, en estos últimos no se tiene la distancia recorrida para cada registro. Esto es debido a que el flujo de mercancías se mueve en diferentes modos de transporte, y no solo el carretero, por esta razón, el indicador es sustituido como una matriz de promedios del valor de la mercancía con respecto a las toneladas movidas. Sin embargo, a pesar de no contarse con información de las distancias, se puede identificar el indicador valor comercial por tonelada (V/T) con sus respectivos orígenes y destinos.

Para realizar el análisis y mostrar las matrices origen-destino, se seleccionaron los productos más importantes con mayor valor comercial y mayor cantidad de toneladas movidas en las operaciones aduaneras:

- Combustibles minerales, aceites minerales y productos de su destilación;
- Instrumentos y aparatos de óptica, fotografía o cinematografía;
- Manufacturas de fundición, hierro o acero;
- Manufacturas diversas de metal común;
- Máquinas, aparatos y material eléctrico, y sus partes;
- Muebles, mobiliario médico quirúrgico, artículos de cama y similares;
- Plástico y sus manufacturas;
- Reactores nucleares, calderas, máquinas, aparatos y artefactos mecánicos;
- Vehículos automóbiles, tractores, velocípedos y demás vehículos terrestres.

Además, también fueron elegidos los 9 principales países relacionados en las operaciones comerciales. En la Tabla 4 se puede observar el V/T, con el objetivo de identificar cuáles son los países con el mayor valor para el indicador de acuerdo a la fracción arancelaria.

Tabla 4. Matriz Origen-Destino países con fracción arancelaria

Operación	Fracción Arancelaria	Pais Origen Destino								
		CANADÁ	CHINA	COREA D..	ESPAÑA	ESTADO..	INDIA	JAPÓN	MALASIA	TAIWÁN
Exportación	COMBUSTIBLES MINERALES, ACEITES ..	5,171	5,673	4,347	4,150	3,777	4,199	5,091	5,860	1,195
	INSTRUMENTOS Y APARATOS DE ÓPTI..	33,076	89,656	31,036	24,707	79,944	49,550	8,542	7,494	17,819
	MANUFACTURAS DE FUNDICIÓN, HIER..	7,046	10,468	18,883	6,142	8,838	9,305	53,724	5,061	11,658
	MANUFACTURAS DIVERSAS DE METAL ..	6,628	4,111	2,601	5,282	13,861	18,327	3,697	2,739	247
	MÁQUINAS, APARATOS Y MATERIAL EL..	32,984	125,091	11,065	61,843	170,907	41,938	28,105	106,193	15,102
	MUEBLES; MOBILIARIO MEDICOQUIRÚ..	17,233	115,336	112,194	69,788	69,129	17,216	287,851	2,378	41,104
	PLÁSTICO Y SUS MANUFACTURAS	2,789	12,515	13,797	13,203	9,366	15,562	9,090	2,123	6,167
	REACTORES NUCLEARES, CALDERAS, ..	22,058	81,221	48,510	45,867	122,956	74,740	48,939	11,755	62,204
	VEHÍCULOS AUTOMÓVILES, TRACTORE..	65,034	207,799	66,148	31,331	127,482	91,217	66,210	13,011	11,986
Importación	COMBUSTIBLES MINERALES, ACEITES ..	3,980	6,384	11,341	6,398	176	8,404	5,743	18,324	3,102
	INSTRUMENTOS Y APARATOS DE ÓPTI..	3,891	2,574	46,607	135	957	3,823	189	12,615	19,069
	MANUFACTURAS DE FUNDICIÓN, HIER..	1,723	584	4,220	4,885	1,883	1,587	92	249	1,448
	MANUFACTURAS DIVERSAS DE METAL ..	1,377	4,620	4,201	3,977	569	755	18	2,557	2,763
	MÁQUINAS, APARATOS Y MATERIAL EL..	7,874	19,526	28,755	9,093	7,205	1,648	998	4,279	15,576
	MUEBLES; MOBILIARIO MEDICOQUIRÚ..	6,827	16,476	21,176	18,859	9,893	3,536	28	10,765	2,834
	PLÁSTICO Y SUS MANUFACTURAS	3,609	783	6,635	5,755	5,676	3,603	128	1,590	2,616
	REACTORES NUCLEARES, CALDERAS, ..	10,037	4,386	2,177	8,027	4,177	4,579	784	8,418	8,060
	VEHÍCULOS AUTOMÓVILES, TRACTORE..	12,506	426	1,166	38,952	3,446	32,784	938	2,003	3,415

Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Por otro lado, para identificar como se registran los pedimentos por INCOTERM. En la Figura 14 se observan dos variables, de lado izquierdo la cantidad de pedimentos, y de lado derecho las toneladas movidas por esos pedimentos.

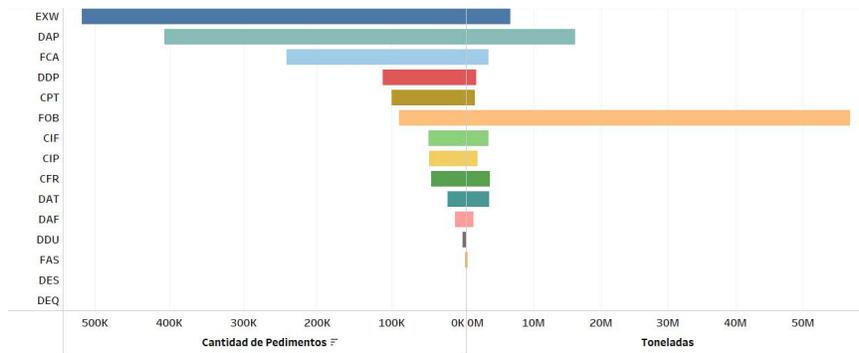


Figura 14. Pedimentos por Incoterm

Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Caso de Estudio: Combustibles

Se utilizó la fracción arancelaria “Combustibles minerales, aceites minerales y productos de su destilación” debido a la importancia que actualmente han tenido los productos relacionados al petróleo a nivel internacional, la cantidad de toneladas en importaciones y exportaciones, se pueden observar los flujos mensuales en la Figura 15 y en la Figura 16 respectivamente.

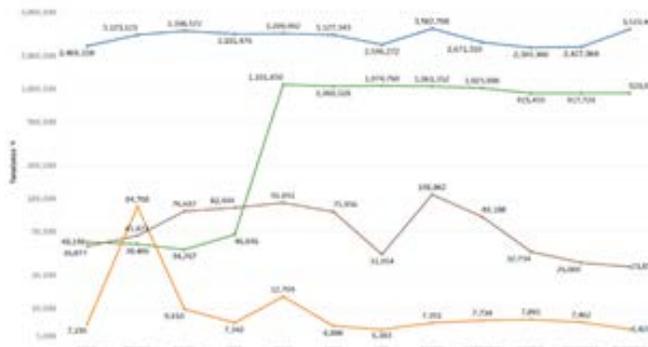


Figura 15. Toneladas exportación de combustibles

Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

En las exportaciones existió un cambio radical en el movimiento de combustible, a inicios del 2016 pocas toneladas se movían en ductos, y a partir de mayo se incrementó de manera radical, de mover miles a millones de toneladas. En el caso de las importaciones, la mayoría de las toneladas se mueven a través de tubería, y aunque existió un mes en el cual se registró bastante movimiento carretero, el aumento no fue consistente; para los ductos, se redujo la cantidad de toneladas movidas a partir de agosto. Se debe aclarar que, para ambas figuras, se utilizó una escala logarítmica para visualizar los cambios entre las toneladas totales de cada medio de transporte, debido a que existe una gran diferencia entre los totales (miles, cientos de miles y millones de toneladas).



Figura 16. Toneladas importación de combustibles
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

El valor comercial por tonelada para los 3 principales países importadores y exportadores de combustible, se observa la distribución mensual en la Figura 17. En este diagrama se excluyó la información de Estados Unidos, debido a que el traslado de combustibles hacia México se realiza a través de Ductos y Tuberías, y el valor comercial por tonelada es realmente bajo.

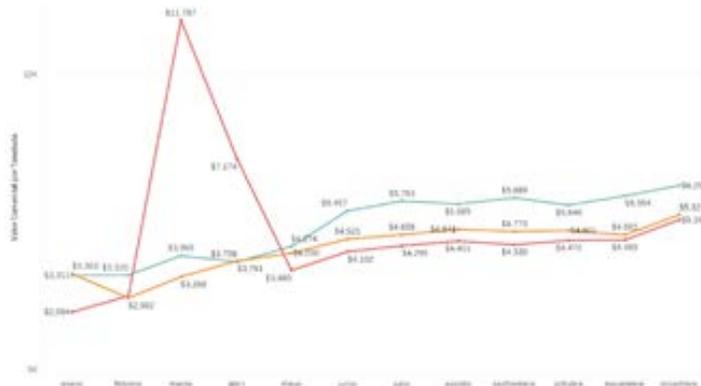


Figura 17. Indicador V/T por país
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Por otro lado, la tasa de variación del indicador V/T para el caso de Estados Unidos representa un comportamiento con tendencia ascendente continuo durante el año analizado. Dicho comportamiento del modelo es validado a través del análisis de tendencia lineal, el cual mostro un R cuadrado de 0.87, un error estándar de .08 y un valor de p de 0.0001.

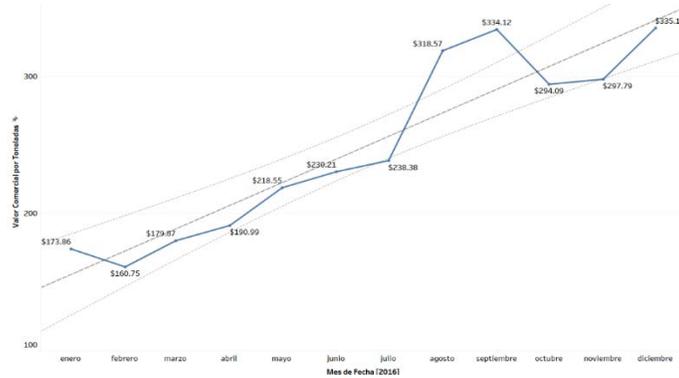


Figura 18. Tendencia del V/T para Estados Unidos
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Para desarrollar el pronóstico con la información de Estados Unidos, Figura 19, se utilizó un algoritmo Holt-Winters con tres exponentes suavizantes: nivel, tendencia y estacionalidad (Chatfield & Yar, 1988).

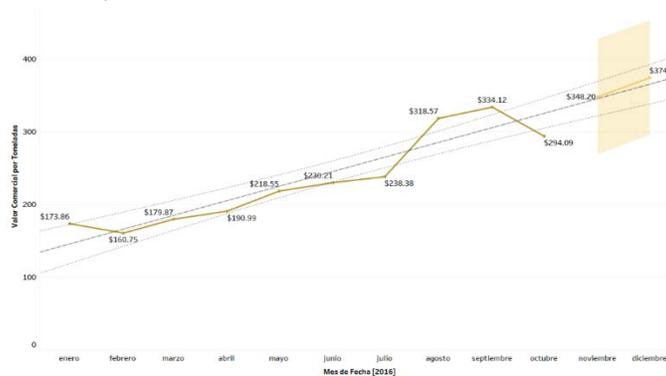


Figura 19. Pronóstico del V/T para Estados Unidos
Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Para este caso particular se utilizó un modelo multiplicativo, primero se validó haciendo una comparación de los últimos 2 meses con el modelo mencionado, los resultados se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de valores obtenidos del pronóstico

Mes de Análisis	Pronóstico	Real	Error %
Noviembre 2016	\$348.20	\$297.79	15.92%
Diciembre 2016	\$374.57	\$335.13	11.77%

Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Finalmente, para el pronóstico de los 2 meses siguientes: enero 2017 y febrero 2017, se utilizaron dos modelos: i) Holt-Winter; y ii) Promedios móviles. Para este último, se definió

un promedio móvil de longitud n=3, correspondiente a promedios trimestrales. Los resultados de ambos modelos se pueden observar en la Tabla 6. Con la idea de mejorar los resultados, se promediaron los valores pronosticados para dichos meses.

Tabla 6. Pronostico para enero y febrero 2017

Mes de Análisis	Holt-Winter	Prom. Móvil(3)	Prom. Total
Enero 2017	\$346.02	\$309.00	\$327.51
Febrero 2017	\$360.68	\$313.97	\$337.33

Fuente: Elaboración propia con información del sistema SAAI M3

Conclusiones

En la actualidad, en México se han desarrollado y están a disposición indicadores económicos para identificar el comportamiento del mercado a nivel nacional e internacional. Sin embargo, resulta insuficiente ante la necesidad de contar con información y análisis sobre la base de las toneladas movidas por tipos de productos con otros países, o con los estados/aduanas por donde pasa dicha mercancía.

Debido al incremento en el flujo año con año, la importancia recae en la identificación de las necesidades de nueva infraestructura y su desarrollo, así como la escasez en zonas fronterizas, puertos intermodales y del interior del país, la oferta y demanda real por estados (toneladas), los cuales son otros retos que enfrenta actualmente el país. Por esta razón, se desarrollaron análisis estadísticos con información recabada de los pedimentos nacionales, con la idea de experimentar con información real y brindar indicadores que puedan ser de utilidad para los tomadores de decisiones tanto del ámbito público como del privado.

Las estadísticas mostradas en esta investigación, son el primer paso para el desarrollo de indicadores relevantes a nivel nacional, las cuales describen el flujo comercial desde otro enfoque diferente al económico. A partir de las predicciones y pronósticos que se pueden realizar por modos de transporte o por tipos de producto, pueden definir la pauta para la adaptación de la infraestructura del país por zonas, estados o hasta municipio que estén relacionados directamente a las exportaciones e importaciones. Con estos indicadores se puede identificar una oportunidad de mejora para la exportación de productos específicos a otros países donde sea muy bajo el flujo tal como Bolivia o Paraguay al sur del país. Por otro lado, a través del Flujo Nacional, se puede identificar que la mayor cantidad de mercancía que se mueve hacia Estados Unidos (el importador/exportador con más toneladas movidas) es a través de Nuevo León, con esto en mente, se pueden desarrollar proyectos para identificar las características relevantes de esta aduana, y replicar estos datos a otros estados del norte, con el objetivo de distribuir y aumentar el flujo, o instalar nuevas

aduanas en puntos estratégicos. También puede ser utilizado por el sector gobierno para conocer la demanda que existirá en puertos marítimos o ferroviarios, e identificar cuáles son los puertos que no cuentan con la infraestructura necesaria para cubrir esa demanda. Finalmente, estos resultados son solo un ejemplo del potencial que puede tener el desarrollar estos estudios; en el caso de los productos se puede especificar tan a detalle cómo se desee para identificar el comportamiento de otros sectores comerciales, esto incluye la identificación específica de cualquier producto a través de su clave SCIAN. Como trabajo futuro, se buscará desarrollar una colaboración con las entidades que estén involucradas con la información que se genera en el SAAI, con el objetivo de tener la información actualizada del 2016 hasta la fecha. Además, se desarrollará un sistema informático que sirva como herramienta para monitorear el comportamiento del flujo nacional e internacional, que utilice algoritmos sofisticados de Inteligencia Artificial para la optimización de modelos matemáticos que contemplen variables seleccionadas por un tomador de decisiones.

Reconocimientos

Se agradece a CONACyT por apoyar esta investigación a través de su programa de Laboratorios Nacionales, específicamente al Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística, del Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Referencias

- Abd, A., Fattah, E., Amer, E., Abd-Elfattah, M., & Alghamdi, T. (2014). Dashboard Technology Based Solution to Decision Making. In *International Journal of Computer Science Engineering and Information Technology Research (IJCSEITR)* ISSN(P (Vol. 4). www.tjprc.org
- AGA. (2021). Lineamientos Técnicos de Registros VOCE – SAAI M3. http://omawww.sat.gob.mx/aduanasPortal/Paginas/Documents/servicios/descargas/Documents/Lineamientos_tecnicos_registros_V9.0.pdf
- Cecilia Ruz. (2015). Inteligencia de Negocios. In https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/inteligencia_de_negocios.pdf. CEPAL.
- Cepal. (2015). Técnicas de pronóstico de corto y largo plazo. Evaluación empírica. https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/01_1_conociendo_una_serie_de_tiempo.pdf
- Chatfield, C., & Yar, M. (1988). Holt-Winters Forecasting: Some Practical Issues. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, 37(2), 129–140. <https://doi.org/10.2307/2348687>
- Diario Oficial de la Federación. (2021). SEXTA Resolución de modificaciones a las Reglas Generales de Comercio Exterior para 2020.
- Diario Oficial de la Federación. (2022). ANEXO 22 de las Reglas Generales de Comercio Exterior.

- ESRI. (2021). Cómo funciona la predicción de suavizado exponencial (ArcGIS Pro 2.8). <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/learnmoreexponentialsMOOTHINGforecast.htm>
- IBM. (2022). Business analytics solutions. <https://www.ibm.com/analytics/business-analytics>
- Inegi. (2019). Balanza Comercial de Mercancías de México 2019. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825189976.pdf
- Inegi. (2021a). Balanza Comercial de Mercancías de México. <https://www.inegi.org.mx/programas/comext/>
- Inegi. (2021b). Banco de Indicadores. <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?p=1099&ag=00>
- Inegi. (2021c). SCIAN. <https://en.www.inegi.org.mx/app/scian/>
- INEGI. (2021). Información oportuna sobre la Balanza Comercial de Mercancías de México. <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=7076>
- Informa. (2022). Operations Research & Analytics. <https://www.informs.org/explore/operations-research-analytics>
- Kaganski, S., Majak, J., Karjust, K., & Toompalu, S. (2017). Implementation of Key Performance Indicators Selection Model as Part of the Enterprise Analysis Model. *Procedia CIRP*, 63, 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.143>
- Keen, P. G. W. (1980). *Decision Support Systems: A Research Perspective*. Center for Information Systems Research MIT.
- Minitab. (2019). Métodos para analizar las series de tiempo (Minitab 18). <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/time-series/supporting-topics/basics/methods-for-analyzing-time-series/>
- Moreno Quintero, E., De la Torre Romero, M. E., & Piña Barcenás, J. (2021). Estimación de matrices O-D del autotransporte de carga basada en cartas porte. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt639.pdf>
- NumXL. (2016). Parte I - Métodos Distintos de Suavizado. <https://support.numxl.com/hc/es/articles/115000144963-Parte-I-Métodos-Distintos-de-Suavizado>
- Ortúzar, J. de D., & G. Willumsen, L. (2011). *Modelling Transport*. Wiley. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5781766/mod_resource/content/0/Ortuzar_andWillumsen_Modelling_Ttransport.pdf
- Pineda Dorado, M. L., Mendoza Díaz, A., Gutiérrez Hernández, J. L., & Abarca Pérez, E. (2014). Matrices origen-destino (O-D) multiproducto para el autotransporte nacional de carga. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt409.pdf>
- Sarafrazi, A., Jahantigh, F. F., & Habibi, A. (2019). A conceptual framework for business intelligence critical success factors. *International Journal of Business Information Systems*, 30(1), 109. <https://doi.org/10.1504/ijbis.2019.10018112>
- Secretaría de Economía. (2021). *Ley de los Impuestos Generales de Importación y de Exportación Versión unificada*.
- Turban, E. (2015). *Business intelligence and analytics : systems for decision support*.

Agenda hacia la descarbonización logística en Latinoamérica: una revisión de la literatura

Rincón-Roncancio, S. M. y Sánchez-Lara, B.
Departamento de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen—Este artículo presenta una revisión sistemática sobre las iniciativas de descarbonización logística en latinoamericana y una agenda de cambios en las operaciones logísticas y de transporte. A esta agenda se agregan también líneas de investigación. Con la revisión de la literatura se sintetizan las tendencias respecto de herramientas de cálculo e informe de emisión de gases de efecto invernadero en logística. También se describen las iniciativas de descarbonización logística o para la reducción del impacto ambiental. La revisión se acotó al ámbito latinoamericano incluyéndose casos, programas públicos, iniciativas privadas y colaboraciones público-privadas. Algunos aspectos que incluir en la agenda son: cambios modales, redes de distribución, intensidad del transporte de carga, uso de vehículos, instalaciones e insumos, eficiencia energética y colaboración en las cadenas de suministro. Destacan las barreras asociadas a la infraestructura, el valor de capital y los empleos de empresas vinculadas con la refinación y distribución de combustibles fósiles, la obsolescencia de los marcos regulatorios y fiscales, y la no internalización de los beneficios ambientales y de salud asociados.

Palabras Clave: Descarbonización Logística; Logística Verde; Transporte de Carga; GLEC; Latinoamérica

Introducción

En las últimas décadas se ha llegado al consenso de que la reducción de emisiones de carbono es un paso de gran relevancia para desacelerar y mitigar el impacto del cambio climático (Meyer, 2020) y que de llevarse a cabo influirá fuertemente en el desarrollo económico y en el bienestar social. En este sentido, gobiernos y organizaciones han venido estableciendo objetivos alineados a la reducción de emisiones, principalmente emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Uno de los sectores económicos con mayor dificultad para reducir emisiones es el de la logística y el transporte. Dicha dificultad está asociada al uso de combustibles fósiles y al crecimiento del sector como efecto de la globalización (McKinnon, 2021). El transporte de carga a nivel global es responsable de entre el 80% y

90% de las emisiones de carbono relacionadas a la logística (McKinnon, 2018). La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) en 2019 estimó que, a nivel mundial, el sector transporte genera 24% de las emisiones de CO₂, en Latinoamérica el porcentaje se estimó en 41% (IEA, 2021).

A la reducción de emisiones de carbono en el sector de logística y transporte se le ha denominado descarbonización logística. El conjunto de estrategias para la descarbonización logística constituye un marco denominado Logística Verde. Estrategias relevantes de Logística Verde son: (1) Reparto modal (2) Reducción de la intensidad de uso del transporte de carga, (3) Utilización efectiva de activos, (4) Eficiencia energética y (5) Reducción del contenido de carbono de la energía asociada a los combustibles (McKinnon et al., 2015) En Latinoamérica se han documentado las siguientes circunstancias que magnifican el desafío al elegir una estrategia: (1) los subsidios a los combustibles fósiles, (2) la no internalización de los beneficios ambientales y de salud por el reemplazo de combustibles, (3) el valor del capital, empleos y empresas que refinan y distribuyen los combustibles fósiles, mismas que podrían ser desplazadas (Vergara et al., 2016), (4) la no proyección de la inversión de capital para cubrir la demanda futura del transporte de carga, (5) la infraestructura existente y las políticas que respaldan la instalación de estaciones de carga y (6) la inseguridad energética (Vergara et al., 2016).

Este artículo, primero, presenta una revisión sistemática de las iniciativas de descarbonización logística en Latinoamérica. Con la revisión se intenta responder a algunas de las siguientes preguntas: ¿Cómo se está enfrentando el desafío de la descarbonización?, ¿Qué estrategias se están implantando?, ¿Qué iniciativas, programas públicos y colaboraciones público-privadas se identifican?, ¿Qué se ha hecho en investigación sobre descarbonización logística? Con las respuestas a las preguntas, se propone una agenda de cambios en las operaciones logísticas y de transporte hacia la descarbonización.

El artículo se divide en cuatro secciones. La primera sección es una introductoria de la descarbonización logística. En la segunda sección se presentan los principales marcos asociados a la descarbonización logística, se describen las medidas propuestas por el marco de logística verde y se presenta el caso europeo como referente. La tercera sección incluye los materiales y métodos utilizados en la investigación. En la cuarta sección se presentan los resultados de la revisión y se propone una agenda hacia la descarbonización en Latinoamérica. La última sección es de conclusiones.

Descarbonización Logística

Descarbonización logística es el término que se asocia con la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, eventualmente hasta eliminarlas (Vennix et al., 2022). El Acuerdo de París, adoptado en 2015 por 196 países, tuvo como objetivo limitar el calentamiento

global para no superar 2°C. Lograr el objetivo implicó desarrollar planes para que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) alcanzaran su pico y se redujeran en el largo plazo (Edwards, 2017). Desde la entrada en vigor del acuerdo, muchos países, regiones, ciudades y empresas han venido estableciendo objetivos de neutralidad de carbono (United Nations, 2022). Como se señaló en la sección anterior, uno de los sectores con mayores dificultades para alcanzar el objetivo es el logístico (McKinnon, 2021). Existen tres marcos para la descarbonización logística:

ASI	ASIF	Logística Verde
 Evitar (Avoid)	 Actividad	 Intensidad del transporte de carga
 Cambiar (Shift)	 Estructura (Structure)	 Reparto Modal
 Mejorar (Improve)	 Intensidad	 Eficiencia energética
		 Utilización de Vehículos
	 Combustible (Fuel)	 Contenido de carbono de la energía

ASI (acrónimo de Avoid, Shift, Improve). Es un marco general de origen alemán desarrollado en la década de 1990, útil para definir políticas públicas hacia la reducción del impacto ambiental del transporte, evitando o reduciendo su demanda, mejorando su eficiencia, cambiando la selección modal de aquellos que más energía consumen y por

tanto contaminan más a modos menos contaminantes y mejorando la eficiencia operativa y el uso de vehículos y combustible (Bongardt et al., 2019).

ASIF (acrónimo de Activity, Structure, Intensity, Fuel choice). Es un marco para evaluar oportunidades de reducción en el nivel de actividad del transporte, modificar la estructura modal, reducir la intensidad energética por la operación y reducir el contenido de carbono en el combustible (Schipper & Marie-Lilliu, 1999).

Logística Verde (del inglés Green Logistics). Es un marco cuya intención es hacer ecológicas las operaciones de transporte de mercancías. Se desarrolló en 1996 en el curso de un proyecto de investigación en el Reino Unido (McKinnon & Woodburn, 1996)

El marco de Logística Verde tiene como fin último reducir los costos ambientales de la logística, esto es, los costos de la producción económica de los actores logísticos. Considera cinco estrategias:

Reparto Modal. Que implica cambios en la participación de modos de transporte de carga, de unos contaminantes a unos que generan menos emisiones.

Intensidad del transporte de carga. Que implica reducir el uso del transporte en relación con el peso de la carga y las distancias de los trayectos.

Utilización de activos. Especialmente el uso efectivo de los vehículos, reduciendo los viajes vacíos y aumentando la capacidad de carga.

Eficiencia Energética. Que implica reducir el consumo energético dependiente de las características de los vehículos, el estilo de conducción y las condiciones del tráfico.

Contenido de Carbono de la Energía. Que implica reducir el contenido de carbono en los combustibles y así las emisiones de gases de efecto invernadero.

La Descarbonización Logística es un tema de interés global. Las publicaciones en revistas científicas, libros y actas de conferencias, en particular en la base de datos de SCOPUS, en las últimas 2 décadas se han incrementado exponencialmente; en 2020 se identificaron más de 100 publicaciones. La Fig. 2 muestra el crecimiento exponencial de las publicaciones teniendo como criterio de búsqueda la palabra clave: descarbonización logística.

Sin embargo, la gran mayoría de las publicaciones identificadas se realizaron en el continente europeo; en suma, más de 400 en lo que va del siglo. Se destaca el Reino Unido con 95 publicaciones. El continente asiático también se destaca con 121, principalmente elaborados en China. No es el caso de África y Latinoamérica con 13 y 19 respectivamente. La Figura 3 denota por intensidad de color las regiones con mayor cantidad de artículos publicados sobre descarbonización logística.

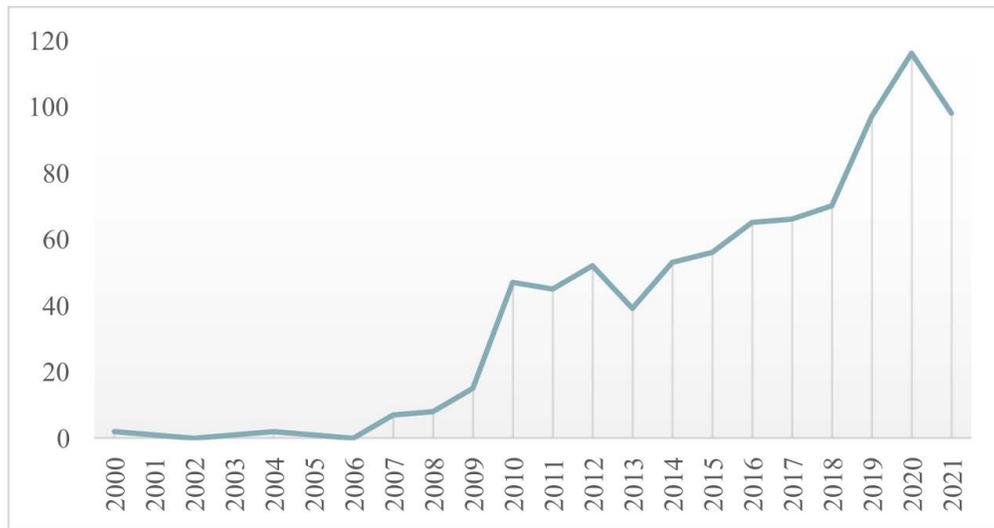


Figura 2. Publicaciones en SCOPUS por año tomando como criterio de búsqueda el término: descarbonización logística

Con base en los datos presentados, Europa puede ser considerada la región referente. Es de tomarse en cuenta el estudio del Centro de Logística Sostenible y Cadena de Suministro (CSLS, por sus siglas en inglés) de la Kuhne Logistics University (Mckinnon & Petersen, 2021) que señala que la descarbonización logística en la región está en marcha, a pesar de que entre un cuarto y un tercio de empresas consultadas están en una etapa temprana, esto es, están integrando la descarbonización logística a sus procesos de planeación estratégica.

- Puntos relevantes del estudio son: 30% de las empresas consultadas cuentan con estrategias de descarbonización en curso o ya implementadas y han establecido objetivos de reducción de emisiones.
- Están alineados los objetivos ambientales y los comerciales; se reconoce que la mitad o más de las medidas implementadas reducen costos.
- Se reconoce que: el cambio modal (de terrestre a ferrocarril), la mejora en la utilización de vehículos y el cambio a energías renovables, son las estrategias de descarbonización de mayor rentabilidad.
- La digitalización es un factor transformador, con gran impacto en los próximos 5 años. Mejora la visibilidad de la cadena de suministro, mejora los sistemas de gestión del transporte e innova el ruteo.
- Los proveedores logísticos tienen mayor capacidad de gestión de la descarbonización que las empresas que los contratan.
- La colaboración se dificulta por las preocupaciones respecto de la privacidad, presiones de competitividad y cultura de gestión.
- Se demandan nuevos conocimientos y habilidades para gestionar las operaciones logísticas bajo el concepto de sustentabilidad.
- Se tienen en mente los requerimientos de coordinación entre políticas públicas.

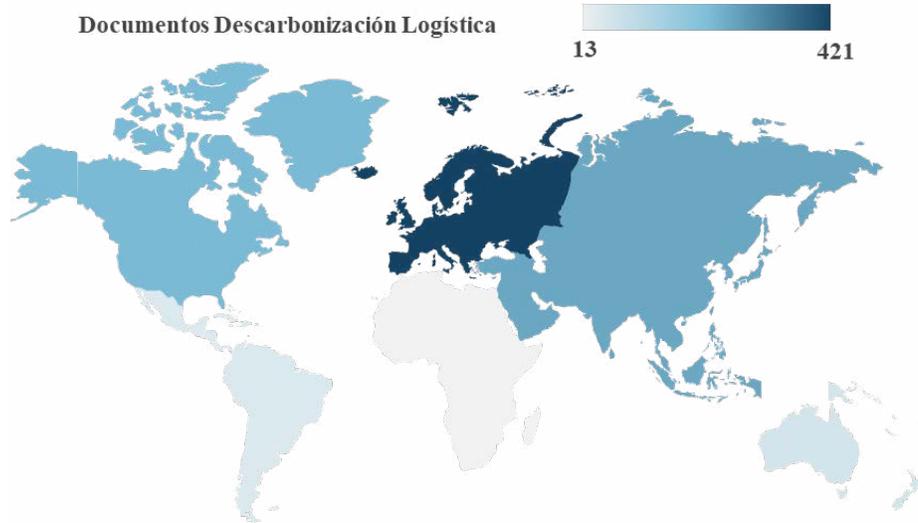


Figura 3. Publicaciones identificadas en SCOPUS por región tomando como criterio de búsqueda el término: descarbonización logística

Considerando lo anterior como referente y teniendo en mente el número de publicaciones latinoamericanas al respecto, son pertinentes las siguientes preguntas: ¿Cómo se está enfrentando el desafío de la descarbonización logística en Latinoamérica?, ¿Qué estrategias se están implantando?, ¿Qué decisiones y acciones tomar en el presente y para el futuro?

Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática de la literatura [16]. La base de datos consultada para identificar publicaciones académicas fue SCOPUS®. La búsqueda se complementó con literatura gris que incluyó informes, políticas, documentos de trabajo y reportes de empresas privadas, organizaciones no gubernamentales y entidades gubernamentales, usando búsquedas personalizadas en Google®. La búsqueda incluyó las siguientes palabras clave: “descarbonización logística”, “transporte de carga limpio”, “logística verde”, “sustentabilidad logística”, y se acotó a resultados de Latinoamérica y el Caribe, o de países pertenecientes a esta región.

La búsqueda arrojó una buena cantidad de documentos. Se realizó la depuración de los documentos hasta llegar a un conjunto relevante respecto del tema de la búsqueda. La Figura 4 muestra la forma que tomó la depuración de documentos hasta llegar a 35 que fueron con base en los cuales se elaboró este artículo.

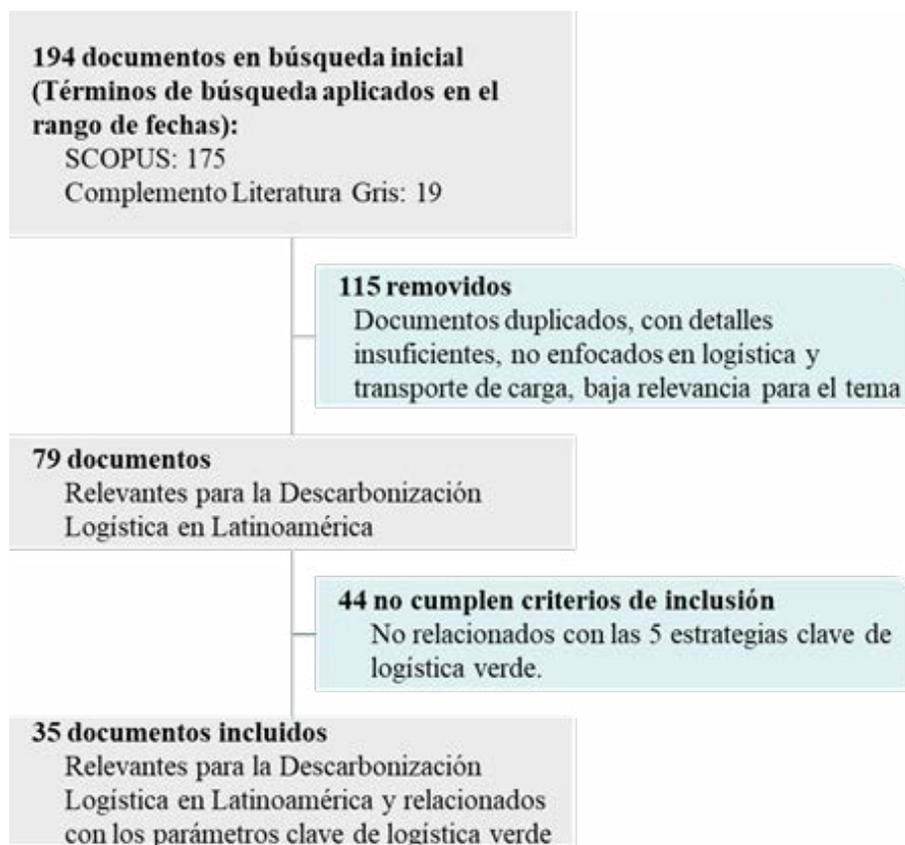


Figura 4. Selección de documentos para la revisión sistemática de la literatura

Se revisaron los títulos y resúmenes de los documentos para identificar los relevantes, excluyendo los duplicados, los que contaran con versiones actualizadas, los dirigidos específicamente al transporte de pasajeros, los de calidad deficiente, con detalle insuficiente y poca relevancia. Además, los documentos considerados fueron aquellos publicados entre 2010 y 2022 que incluyeran contenido respecto de al menos una de las cinco estrategias de descarbonización clave: reparto modal, intensidad del transporte de carga, utilización de activos, eficiencia energética, y contenido de carbono de la energía.

Se incluyeron publicaciones en inglés, español y portugués. En la primera búsqueda, de los 194 documentos recuperados, 79 fueron considerados relevantes, después de la depuración los documentos incluidos en la revisión fueron 35.

De estos 35 documentos revisados, 16 son documentos académicos de fuentes especializadas con revisión y arbitraje por pares, 9 son iniciativas gubernamentales publicadas en documentos o páginas de internet oficiales, 8 son iniciativas público-privadas de instituciones no gubernamentales, regionales o globales con presencia en Latinoamérica y 2 son documentados del sector privado. La Figura 5 muestra la distribución de los documentos revisados por origen.

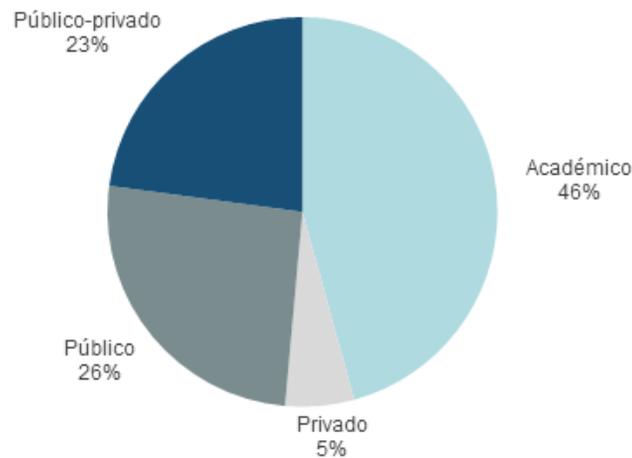


Figura 5. Documentos revisados por origen

Con base en la revisión se construyó la Tabla 1. Esta es una matriz de relación entre los documentos revisados y las 5 estrategias, se asocia también el origen del documento y su alcance geográfico. Es notorio que muy pocos de los documentos revisados incluyen como tema a las 5 estrategias de descarbonización. La revisión consideró un Análisis Estadístico Descriptivo del que se desprenden los hallazgos y resultados que se presentan en la sección dedicada a tal fin.

Tabla 1. Elementos comparados en la revisión de la literatura

Documento	Tipo	Alcance Geográfico	Estrategias clave de descarbonización según el Marco de Logística Verde				
			1	2	3	4	5
(Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020)	Académico	Suramérica	X	X	X	X	X
(Duarte Soliani et al., 2017)	Académico	Brasil	X				X
(Barrosa et al., 2019)	Académico	Brasil	X	X	X		
(Bartholomeu et al., 2016) bem como (b	Académico	Brasil				X	X
(Brito & Silva, 2017)	Académico	Brasil	X	X	X	X	X
(Carvalho et al., 2021)	Académico	Global / Brasil					X
(Wanke et al., 2015)	Académico	Brasil	X	X	X		
(Pinto et al., 2018)	Académico	Brasil	X				

<p>(Engelage et al., 2017)from a single and detailed analysis in an agro-industry of the southern region of Brazil, in order to provide indicatives and possibilities of adequations. Therefore, interviews and verification of internal processes were performed and was established specific and sequential analysis procedures that involves: (i</p>	Académico	Brasil	X	X	X	X	X
<p>(Muñoz-Villamizar et al., 2021)Amazon and Walmart along with other major companies have started offering same-day delivery. That translates into not using full truckload capacities, requiring more frequent dispatch, and in turn, increases transportation cost. However, inefficient routes are not only more expensive for the shipper but they are also more carbon-intensive. In this context, and from an operative level, we analyze the environmental impact of inbound logistics caused by fast shipping. We create a discrete-event simulation model to understand and compare the effect that certain parameters (i.e., delivery windows, inventory management policies, truck type</p>	Académico	México		X	X		
<p>(Solís & Sheinbaum, 2013)</p>	Académico	México					X

<p>(Muñoz-Villamizar et al., 2019)urban freight transport networks must be environmentally sustainable. As a consequence, collaboration strategies have been implemented as one alternative to enhance the efficiency of the supply chain and to reduce its environmental burden. However, there is a lack of knowledge about how to correctly quantify the environmental impact of collaborative urban freight transport networks. To fill this gap, we present an optimization approach for evaluating the environmental performance of collaborative systems by applying the Overall Greenness Performance (OGP</p>	Académico	Colombia		X	X		
--	-----------	----------	--	---	---	--	--

(Orjuela-Castro et al., 2016) such as squares and bubbles fields, on printed forms. OMR is useful for applications in which large numbers of hand-filled forms need to be processed quickly and with a high degree of accuracy, for instance, reading the answer sheets of high-stakes tests. Nowadays, image processing techniques and advancement in computing could help to read the answer sheets, quickly and reducing operational costs. This work introduces a systematic procedure of image processing with two segmentation steps that conclude in the extraction and recognition of marks of answer sheets of Colombian High-Stakes Tests. Some preliminary results show that the accuracy is 99.83%, on average, in the first calibration stage, with 4 blocks of about 400 images, each one. A sampling procedure was performed to determine an adequate number of images to verify the performance of the method in the scenario of the application Saber 11 in the second semester of 2018. The conclusion of the exercise, with around 65.000 images, was 99.7% of accuracy, which was run in an 8 logical processors pc architecture, getting an average speed of 8 sheets per second. Thus making it suitable for real applications or for performing a labeling process for deep learning training.

author: [{"dropping-particle": "", "family": "Orjuela-Castro", "given": "Javier Arturo", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}], [{"dropping-particle": "", "family": "Sepulveda-Garcia", "given": "David Andrés", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}], [{"dropping-particle": "", "family": "Ospina-Contreras", "given": "Ivan Danilo", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}], [{"container-title": "Communications in Computer and Information Science", "id": "ITEM-1", "issued": {"date-parts": ["2016"]}, "page": "165-177", "title": "Effects of Using Multimodal Transport over the Logistics Performance of the Food Chain of Uchuva", "type": "paper-conference", "volume": "657"}, "uris": [{"http://www.mendeley.com/documents/?uuid=7450b157-457f-4dd8-a036-2c0e40e610d4"}], "mendeley": {"formattedCitation": "(Orjuela-Castro et al., 2016"}]

Académico

Colombia

X

(Gómez Montoya et al., 2015)reducciones de las emisiones del CO2 equivalente, e implementación de prácticas verdes amigables con el medio ambiente en este proceso logístico. Materiales y métodos. el modelo de transporte verde integra un componente de gestión (objetivos, estrategia y caracterización	Académico	Colombia		X				
(Gómez Montoya et al., 2017)a reduction of CO2 emissions was achieved, equivalent to 731 kg/month or 37% of issues for preparation of orders. Additionally, the modeling of a Taboo Search metaheuristics was developed to resolve the routing problem for the preparation of orders; this allowed increasing the operation efficiency in about 18.83% and to obtain a reduction of 198 kg of equivalent CO2 per month. Therefore, the green distribution center model, simultaneously, increased the efficiency and reduced the amount of kilograms of CO2, using an approach that had not been addressed in literature for this logistic process. (English	Académico	Colombia			X			
(Herrera Rodriguez et al., 2022)	Académico	Global / Panamá		X	X	X		
(Gradilla, 2012)	Público	México	X	X	X	X	X	X
(Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México, 2021)	Público	México				X	X	
(Iniciativa Climática de México. Programa Transporte Sustentable, 2021)	Público	México						X
(Gobierno de Colombia - Ministerio de Transporte, 2019)	Público	Colombia						X

(Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2021)	Público	Perú				X	X
(Ministerio de Economía. República Argentina, 2022)	Público	Argentina				X	
(Ministerio de Economía. República Argentina, 2021)	Público	Argentina / Chile				X	X
(Agencia de Sostenibilidad Energética, 2020)	Público	Chile			X	X	
(Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018)	Público	Costa Rica	X	X		X	X
(Lía, 2021)	Privado	Latinoamérica				X	X
(Grupo Logístico Andreani, 2021)	Privado	Argentina / Brasil			X	X	X
(Roblero & Longhi, 2021)	Público-privado	Latinoamérica	X	X	X	X	
(Bataille, Waisman, Vogt-Schilb, et al., 2020)"type":"report"},"uris":["http://www.mendeley.com/documents/?uuid=38c7af6d-9868-4cfe-aa39-74a5e8b39cd0"]}], "mendeley":{"formattedCitation":"(Bataille, Waisman, Vogt-Schilb, et al., 2020	Público-privado	Latinoamérica	X				X
(Pineda & Xie, 2021)	Público-privado	Latinoamérica				X	
(Delgado et al., 2019)	Público-privado	Latinoamérica				X	
(Hernandez & Façanha, 2017)	Público-privado	Latinoamérica				X	
(Câmara Araujo, 2021)	Público-privado	Brasil				X	X
(Brakarz et al., 2021)	Público-privado	Brasil	X			X	X
(Blumberg et al., 2014)	Público-privado	México				X	X

1 – Reparto Modal, 2 – Intensidad del transporte de Carga, 3 – Utilización de Activos, 4 – Eficiencia Energética, 5 – Contenido de carbono de la energía

Resultados y discusión

La revisión de la literatura se realizó sobre 35 documentos, con hallazgos respecto del alcance geográfico, los actores involucrados, las estrategias de logística verde que se incluyen como temas principales de los documentos, los horizontes temporales que consideran y propósitos que persiguen. A continuación, se presentan los resultados tratando de responder a las preguntas que dieron origen a esta investigación y que ya fueron mencionadas.



Figura 6. Alcance geográfico de los documentos seleccionados el término: descarbonización logística

Alcance geográfico. Por el número de documentos con origen en Brasil, en contraste con otros países latinoamericanos Brasil es relevante. Brasil es mencionado en 15 de 35 documentos. Después de Brasil la mención en los documentos es México, Argentina, Colombia y Chile con presencia 11, 10, 9 y 8 documentos respectivamente (véase la Fig. 6). Estos números pueden asociarse con la relevancia de los países en términos de logística global y el tamaño de su población y de su mercado. Sin embargo, Centroamérica tiene poca participación en los documentos revisados, esto llama la atención si se considera que Panamá es de gran importancia logística al nivel no sólo regional sino global.

Estrategias de Logística Verde consideradas. Respecto de las estrategias de Logística Verde, las de mayor mención son: Eficiencia energética y Contenido de carbono de la energía. Por su lado, Reparto modal se registró en 13 documentos sobre todo de carácter académico y resultado de colaboraciones público-privadas. La estrategia Utilización de activos se aborda también en 13 documentos de carácter privado y académico. Respecto de la estrategia Intensidad del transporte de carga esta se incluye en 12 documentos,

en particular del ámbito académico. La Fig. 7 muestra el número de documentos que incluyen a las estrategias como temas relevantes. Por su parte, en la Fig. 8 se asocia la naturaleza o carácter de los documentos a las estrategias.

Respecto de la aplicación de las estrategias, la de Eficiencia energética es la más citada y aplicada, en particular por los beneficios económicos asociados; permiten ahorros de entre 3.5 y 30% en el consumo de combustible, esto es, entre el 20 y el 40% de los costos operativos del transporte de carga e incide en la mejora de la seguridad vial [44].

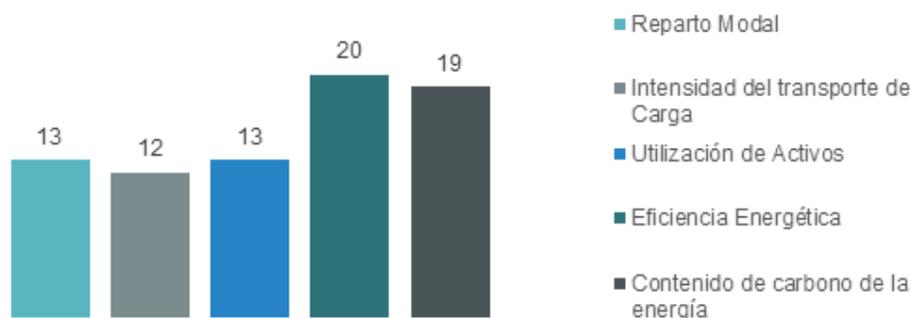


Figura 7. Inclusión de las estrategias de Logística Verde por número de documentos

En contraste, la estrategia de Contenido de carbono de la energía se incluye en los documentos como una ambición o un reto; se identificaron pocas aplicaciones con bajo impacto y altas limitantes, sobre todo relacionadas con la infraestructura, el valor de capital y el número de empleos que se vería afectado en empresas vinculadas con la refinación y distribución de combustibles fósiles (Vergara et al., 2016).

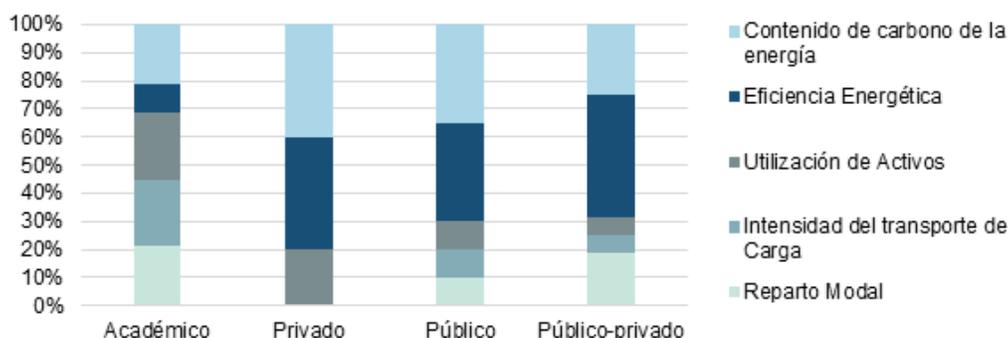


Figura 8. Tipo de documento y estrategias de Logística Verde

Se identificaron diferentes iniciativas que se realizan o proponen para la descarbonización, derivadas principalmente del acuerdo de París, pero también obstáculos para su implementación. A continuación, se listan las iniciativas asociadas a las estrategias de Logística Verde.

Estrategia: Reparto modal

Iniciativas:

Diseño de redes multimodales, reduciendo transporte terrestre y aéreo, y aumentando ferroviario y marítimo (Duarte Soliani et al., 2017) (Barrosa et al., 2019) (Brito & Silva, 2017) (Wanke et al., 2015) (Pinto et al., 2018) (Engelage et al., 2017) (Orjuela-Castro et al., 2016) (Herrera Rodriguez et al., 2022) (Gradilla, 2012) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México, 2021) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018) (Roblero & Longhi, 2021) (Bataille, Waisman, Vogt-Schilb, et al., 2020) (Brakarz et al., 2021). Análisis de sensibilidad para evaluar distintos modos (Wanke et al., 2015).

Estrategia: Intensidad del transporte de carga

Iniciativas:

Optimización del ruteo (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020) (Barrosa et al., 2019) (Brito & Silva, 2017) (Wanke et al., 2015) (Engelage et al., 2017) (Muñoz-Villamizar et al., 2019) (Gómez Montoya et al., 2015) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018).

Diseño de políticas de inventario (Barrosa et al., 2019) (Bartholomeu et al., 2016) (Brito & Silva, 2017) (Herrera Rodriguez et al., 2022).

Diseño de red (Barrosa et al., 2019) (Wanke et al., 2015) (Bartholomeu et al., 2016) (Herrera Rodriguez et al., 2022).

Redes de distribución colaborativa (Engelage et al., 2017) (Muñoz-Villamizar et al., 2019) (Gradilla, 2012) (Roblero & Longhi, 2021).

Modificación de hábitos de consumo (Muñoz-Villamizar et al., 2021) (Herrera Rodriguez et al., 2022) (Gradilla, 2012) (Roblero & Longhi, 2021).

Reducción y tercerización de la flota (Engelage et al., 2017).

Estrategia: Utilización de activos

Iniciativas:

Implementación de centros de consolidación de carga (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020) (Barrosa et al., 2019) (Muñoz-Villamizar et al., 2021) (Gradilla, 2012) (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2020) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018) (Roblero & Longhi, 2021).

Maximización de la capacidad utilizada (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020) (Brito & Silva, 2017) (Engelage et al., 2017) (Muñoz-Villamizar et al., 2021) (Herrera Rodriguez et al., 2022) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018) (Grupo Logístico Andreani, 2021).

Reducción de viajes vacíos (Engelage et al., 2017) (Muñoz-Villamizar et al., 2019) (Gómez Montoya et al., 2017) (Gradilla, 2012).

Software para la optimización logística (Lía, 2021) (Roblero & Longhi, 2021)

Uso de Bitrenes (Lía, 2021)(Grupo Logístico Andreani, 2021).
Rastreo de vehículos (Engelage et al., 2017) (Roblero & Longhi, 2021).

Estrategia: Eficiencia energética

Iniciativas:

Entrenamientos en conducción ecoeficiente (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020) (Bartholomeu et al., 2016) (Gradilla, 2012) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México, 2021) (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2021) (Ministerio de Economía. República Argentina, 2022) (Ministerio de Economía. República Argentina, 2021) (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2020) (Lía, 2021) (Pineda & Xie, 2021) (Hernandez & Façanha, 2017) (Câmara Araujo, 2021).

Control de horarios de recolección, distribución y tiempos de ciclo (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020) (Engelage et al., 2017) (Herrera Rodriguez et al., 2022) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018) (Lía, 2021) (Roblero & Longhi, 2021).(Grupo Logístico Andreani, 2021)

Mantenimiento preventivo de los vehículos (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020) (Bartholomeu et al., 2016) (Engelage et al., 2017) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México, 2021) (Ministerio de Economía. República Argentina, 2022) (Ministerio de Economía. República Argentina, 2021) (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2020) (Lía, 2021) (Hernandez & Façanha, 2017) (Câmara Araujo, 2021) (Brakarz et al., 2021).

Mejoras tecnológicas de los vehículos (aerodinámica, eficiencia de motor, telemetría, resistencia de los neumáticos) (Bartholomeu et al., 2016) (Gradilla, 2012) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México, 2021) (Ministerio de Economía. República Argentina, 2022) (Ministerio de Economía. República Argentina, 2021) (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2020) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018) (Lía, 2021) (Grupo Logístico Andreani, 2021) (Delgado et al., 2019) (Hernandez & Façanha, 2017) (Câmara Araujo, 2021).

Legislación de límite o control de emisiones (Brito & Silva, 2017) (Gradilla, 2012) (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2020) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018) (Blumberg et al., 2014).

Estrategia: Contenido de carbono de la energía

Iniciativas:

Reducción del consumo de combustibles fósiles (Duarte Soliani et al., 2017) (Bartholomeu et al., 2016)(Brito & Silva, 2017)(Solís & Sheinbaum, 2013)(Gra-

dilla, 2012)(Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018)(Lía, 2021)(Câmara Araujo, 2021)(Brakarz et al., 2021).

Innovación tecnológica relacionada con el uso de biocombustibles, vehículos eléctricos e híbridos (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020)(Carvalho et al., 2021)(Engelage et al., 2017)(Gradilla, 2012)(Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018)(Grupo Logístico Andreani, 2021)(Bataille, Waisman, Vogt-Schilb, et al., 2020)(Brakarz et al., 2021) (Blumberg et al., 2014).

Renovación de flotas (Bartholomeu et al., 2016)(Iniciativa Climática de México. Programa Transporte Sustentable, 2021)(Gobierno de Colombia - Ministerio de Transporte, 2019)(Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2021)(Ministerio de Economía. República Argentina, 2021) (Costa Rica. Gobierno del Bicentenario, 2018) (Brakarz et al., 2021).

Respecto a las barreras para la implantación de las estrategias y de sus iniciativas, se identificaron las siguientes (Roblero & Longhi, 2021):

- Centros urbanos densos sin infraestructura disponible para la logística,
- Zonas industriales y comerciales incrustadas en el tejido residencial,
- Informalidad en el sector del transporte,
- Cultura de desacato a las normas, e
- Inseguridad.

También se mencionan: la no coordinación entre responsables ambientales y operativos de las empresas (Câmara Araujo, 2021), la infraestructura disponible, principalmente corredores de carga para vehículos eléctricos (Vergara et al., 2016), que muchas vías no están pavimentadas (Barrosa et al., 2019)(Brakarz et al., 2021), la dificultad que tienen los hombre-camión y los pequeños operadores logísticos para acceder a programas de transporte verde y para generar reportes de sustentabilidad (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020); estos suelen ser dueños de la flota más antigua en circulación (Hernandez & Façanha, 2017). También deben contarse, el rápido crecimiento de la demanda de transporte (Muñoz-Villamizar et al., 2019)(Gradilla, 2012) y los hábitos de consumo, estos últimos son además un reto dado que con el aumento del comercio electrónico se han desencadenado prácticas de “fast shipping” (Muñoz-Villamizar et al., 2021), que implican que la consolidación y utilización de los vehículos disminuya y que los tiempos de transporte multimodal no sean competitivos (Duarte Soliani et al., 2017) (Herrera Rodriguez et al., 2022). Súmese los recursos financieros siempre escasos que los gobiernos asignan a proyectos de transporte limpio e infraestructura para el transporte de carga (Hernandez & Façanha, 2017)(Brakarz et al., 2021).

Además de barreras se identifican como oportunidades: el marco regulatorio que incluye estándares de rendimiento ambiental fácilmente alcanzables (Lía, 2021), programas de

mantenimiento (Hernandez & Façanha, 2017) y la modificación a los beneficios impositivos. Los beneficios impositivos de forma directa o indirecta reducen las oportunidades de descarbonización logística (Vergara et al., 2016)(Barrosa et al., 2019).

Actores involucrados: En la Figura 9 se asocia a los actores con la naturaleza o carácter de los documentos. Sobresalen las colaboraciones público-privadas y las públicas. Los documentos académicos y privados mayormente recopilan casos de estudio del sector privado.

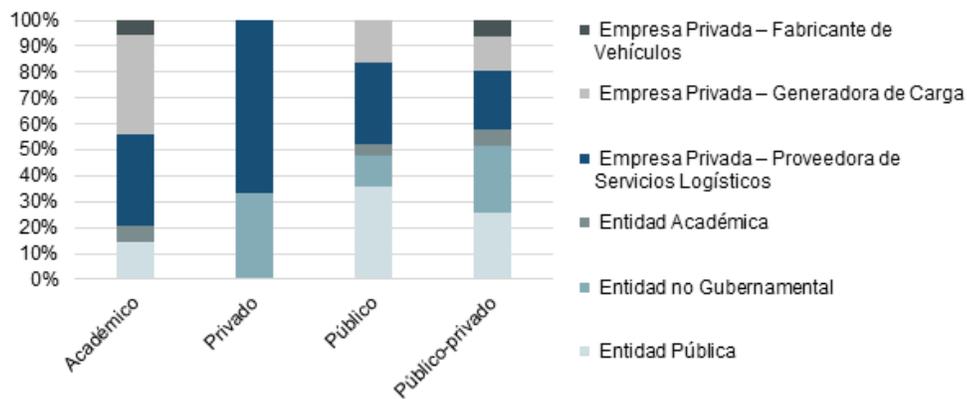


Figura 9. Actores involucrados y carácter de los documentos

En cuanto a los actores clave, esto es los responsables de las acciones en las iniciativas, sobresalen las empresas privadas generadoras de carga. Véase la Fig. 10. Ellas son las consideradas responsables y, sin embargo, no son autoras de iniciativas respecto de la descarbonización logística. Esto sugiere desinterés, falta de compromiso o que no cuentan con la madurez y herramientas de gestión respecto de la sustentabilidad en sus operaciones logísticas. También es de resaltar que un quinto de los documentos señala a más de un actor clave, es decir, se consideran a muchos como responsables de los resultados siendo necesaria la colaboración.

La colaboración entre actores implica alinear intereses a través de algunos mecanismos, sobre todo los intereses de los actores públicos y privados, lo que permitiría el diseño e implementación de políticas y tecnologías para la descarbonización logística (Roblero & Longhi, 2021). Así, cobra relevancia el diseño de redes colaborativas, por ejemplo, entre actores privados que comparten vehículos, rutas y clientes, que consolidan la demanda mejorando la eficiencia individual. En el caso de Bogotá se redujo 11% las emisiones de CO2 y se mejoró el nivel de servicio y el costo (Muñoz-Villamizar et al., 2019). El Instituto Mexicano del Transporte refuerza la idea de las redes colaborativas, señalando que la adaptación del sistema de transporte respecto del cambio climático requiere resiliencia que emerge de la preparación, coordinación y colaboración entre organizaciones (Gradi-lla, 2012).

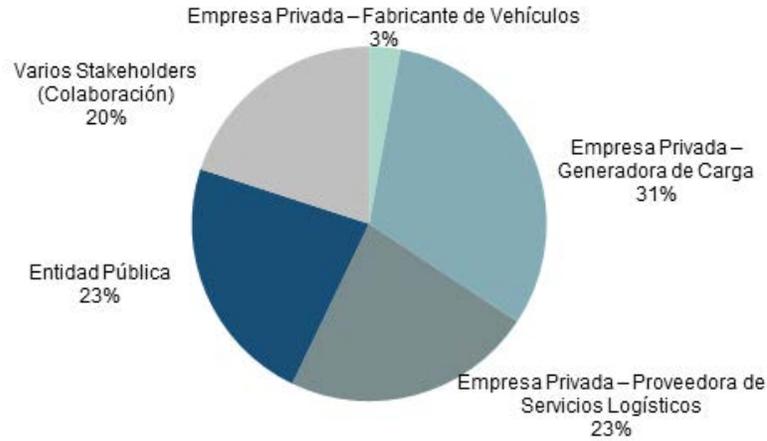
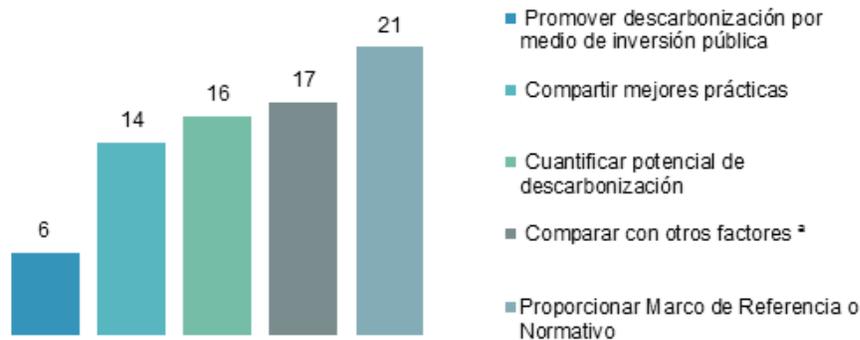


Figura 10. Participación de actores clave

Propósitos de los documentos. El principal propósito de los documentos revisados es ofrecer marcos de referencia o normativos. Estos marcos son referentes de las iniciativas de Logística Verde o para la descarbonización de un país como un todo, ningún marco se refiere a la región. La Figura 11 muestra los propósitos de los documentos revisados.



*Económicos, sociales, de productividad, nivel de servicio o eficiencia

Figura 11. Propósito de los documentos revisados

De los documentos revisados, 17 se enfocan en la comparación entre las emisiones de actividades logísticas y las de otras actividades económicas y sociales. También en la asociación con productividad, nivel de servicio o eficiencia. Se reconoce que el ahorro es el principal motivo para implementar prácticas sustentables principalmente de eficiencia energética (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020)(Pineda & Xie, 2021). Las estrategias de Logística Verde utilizadas como herramientas de toma de decisiones conllevan el ahorro de hasta 60% en combustible (Brito & Silva, 2017). Teniendo como propósito el diseño de una red, el caso brasilero es particular, los escenarios con mayor beneficio económico a la vez son los que generan mayores emisiones. Tener costos mayores de transporte y rutas de entrega más largas genera beneficios económicos im-

portantes (Barrosa et al., 2019). De forma similar, un cambio de modo de transporte en Brasil, a ferrocarril, no es atractivo ni factible a pesar de la reducción potencial en emisiones (Wanke et al., 2015). Para el caso de la exportación de fruta en Colombia, el patrón es similar al brasileño, hay escenarios donde a pesar de la mayor reducción de emisiones los costos son muy altos. Los escenarios multimodales que generan reducción en costos y emisiones se consideran óptimos (Orjuela-Castro et al., 2016).

En la búsqueda de mejorar la eficiencia, se documenta la implantación de un modelo verde que llevó a la reducción de emisiones en 11.7%, mejorando la eficiencia de 9.9% a 12.9% (Gómez Montoya et al., 2015) reducciones de las emisiones del CO2 equivalente, e implementación de prácticas verdes amigables con el medio ambiente en este proceso logístico. Materiales y métodos. el modelo de transporte verde integra un componente de gestión (objetivos, estrategia y caracterización. Resultados similares se obtienen para el caso de un centro de distribución verde en Colombia donde la reducción de emisiones fue de 37% y el incremento de la eficiencia operativa de 18.8% (Gómez Montoya et al., 2017).

Cuantificar el potencial de descarbonización es otro de los propósitos identificados. Sin embargo, en este caso es evidente la no estandarización de las metodologías. Entre las metodologías consideradas están: la AM0090 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, específica para cambios modales (Bartholomeu et al., 2016) la EPA Line-Haul Tier III de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para motores y vehículos de carretera y fuera de carretera (Pinto et al., 2018). También se identificaron metodologías genéricas no necesariamente asociadas a la logística, entre ellas: el enfoque de ciclo de vida (Wanke et al., 2015), el Overall Greenness Performance (OGP) (Muñoz-Villamizar et al., 2019) y la metodología del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (Gómez Montoya et al., 2015) (Gómez Montoya et al., 2017).

No utilizar un método estandarizado implica no garantizar la fiabilidad y comparabilidad de los resultados. En respuesta a esto, el Smart Freight Center de los Países Bajos reunió a la comunidad logística y constituyó el denominado Marco Operativo del Global Logistics Emissions Council (GLEC) (Smart Freight Centre, 2019), reconocido a nivel mundial y que tiene como propósitos: contabilizar e informar sobre emisiones logísticas. Considera metodologías e investigaciones preexistentes y reconocidas para medir emisiones en diferentes modos de transporte. La Figura 12 muestra las metodologías utilizadas. El GLEC puede implementarse en empresas generadoras de carga, transportistas y proveedores de servicios logísticos.

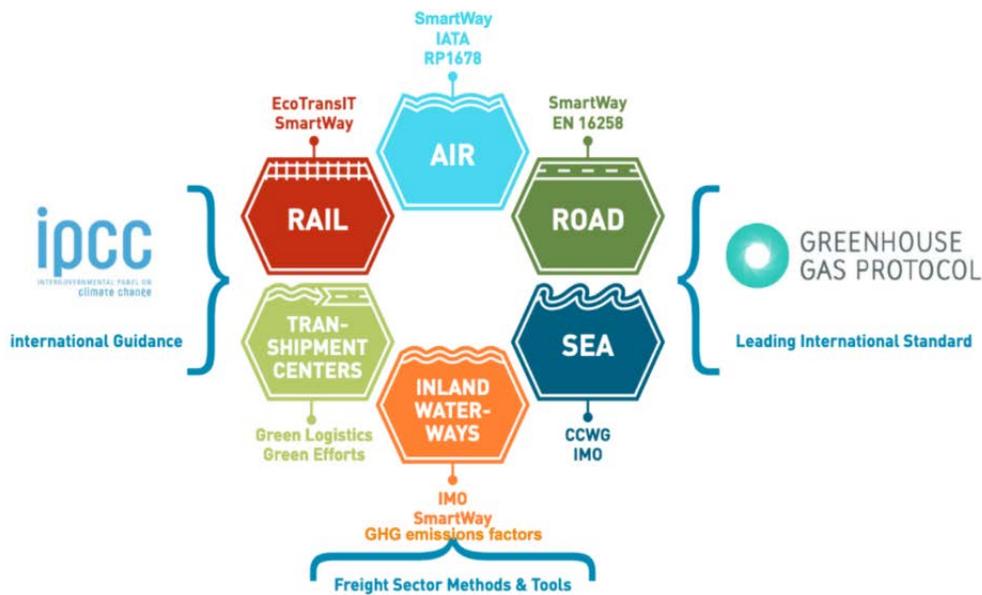


Figura 12. Metodologías del marco GLEC (DFGE – Institute for Energy Ecology and Economy, 2022)

Horizonte temporal de las iniciativas. En la mayoría de los casos las iniciativas son de corto plazo, describen la situación y buscan la implementación de estrategias operativas. De entre los documentos revisados 6 consideraron como plazo el 2030 y 3 el 2050. La Figura 13 presenta el horizonte temporal de las iniciativas.

Los resultados anteriores marcan un alejamiento con los objetivos planteados en el Acuerdo de París en el que se determinó limitar el aumento de la temperatura global en 2°C reduciendo las emisiones netas mundiales en 45% para 2030 y a “cero neto” para 2050 (Organización de las Naciones Unidas, 2022).

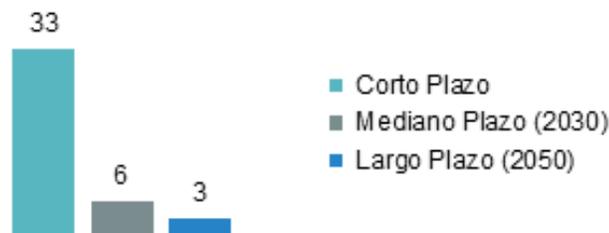


Figura 13. Horizonte temporal de las iniciativas documentadas

Algunas brechas identificadas tomando como referencia el contraste entre la Encuesta de Situación de la Logística Sustentable Regional (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020), que incluye 6 de los 26 países de Latinoamérica y el Caribe, y el marco europeo ya descrito, son: la adopción de energías renovables (menos de 20% en Lati-

noamérica); la digitalización (en los documentos revisados se considerada aislada y no como factor transformador) y la renovación de flota. Por otro lado, la medición de huella de carbono se realiza sólo en 20% de las empresas latinoamericanas sin especificar si a partir de la medición se establecen objetivos de reducción. En Latinoamérica pareciera no haber consenso respecto a la reducción de costos a partir de implementar estrategias de descarbonización.

Respecto a las coincidencias, la necesidad de conocimientos y habilidades es común en ambas regiones, así, en Latinoamérica 50% de las empresas cuentan con programas de formación sobre gestión ambiental (Observatorio de Logística Sustentable (OLS), 2020). Hay coincidencia en la necesidad de coordinar los sectores público y privado.

¿Qué decisiones y acciones tomar en el presente y para el futuro? Se identifican dos esfuerzos de investigación y trabajo: involucramiento de los actores y cambios en las operaciones logísticas de transporte (OLT). El esfuerzo principal deberá enfocarse en el cierre de brechas tomando como referente a Europa, partiendo de la contabilidad y reporte de emisiones logísticas en el corto plazo ganando así la capacidad de entender la situación actual y así establecer objetivos y gestionar los cambios pertinentes. Entre los cambios a considerar están: la renovación de la flota, cambio a energías renovables en un plazo no mayor a 10 años y la digitalización en el mediano y largo plazo mejorando la visibilidad de la cadena de suministro y de los sistemas de gestión del transporte. Además, abordar para reducir las barreras de la región, esto es, infraestructura, marcos regulatorios y fiscales e internalización de los beneficios ambientales y de salud por la descarbonización constante a lo largo del tiempo.

También en el corto plazo, se requiere la integración activa y participación consiente de las empresas generadoras de carga y de los organismos públicos y privados, sobre todo en los países del Caribe, que pueden jugar un papel importante en la consolidación de las estrategias.

La agenda de cambios en las OLT debe considerar, en el corto plazo, la inclusión de factores ambientales en el diseño de redes de distribución y en iniciativas de optimización de ruteo. En ello deberá pensarse en decisiones que tengan impacto en el futuro. De manera

similar, la gestión de la capacidad de transporte deberá incluir y escalar el uso de estrategias de eficiencia energética ya implementadas en la región. En el mediano plazo, y en concordancia con los esfuerzos públicos en términos de disponibilidad de infraestructura, la selección y operación de los modos de transporte, deberá promover aquellos con menos emisiones (marítimo y ferroviario, sobre terrestre y aéreo). En términos generales, las OLT tendrían que realizarse en forma colaborativa, entre actores públicos y privados, en las cadenas de suministro y no de forma individual.

Conclusiones

La descarbonización logística en Latinoamérica es una meta asociada al Acuerdo de París. Su alcance y horizonte temporal es menor respecto del contexto global y el referente europeo. La estrategia que ha tenido mayor adopción es respecto de eficiencia energética. La razón de esto es que es la estrategia a la que se le asocian más beneficios económicos y de seguridad. La puesta en marcha de la estrategia incluye: programas de transporte limpio, esfuerzos de entidades públicas y colaboraciones público-privadas en países y no entre países de la región, iniciativas de conducción ecoeficiente, de mantenimiento preventivo y mejoras tecnológicas en los vehículos. La estrategia de gestión de la intensidad del transporte de carga y utilización de activos ha llamado más la atención en grupos académicos. Es en la academia donde han surgido planteamientos e iniciativas de optimización del ruteo, diseño de políticas de inventario, diseño de redes, esquemas de consolidación de la carga, cubicaje, uso de software para rastreo y optimización logística, entre otras. Las estrategias de reducción de contenido de carbono de la energía y de reparto modal hacia aquellos con menos emisiones son una ambición, su implantación está limitada por barreras ya identificadas, específicamente la disponibilidad de infraestructura y marcos regulatorios obsoletos.

Es necesaria la intervención e involucramiento de los actores clave públicos y privados en la región. En este sentido, puede utilizarse como base la experiencia europea. Es prioridad reducir las brechas entre la situación latinoamericana y la europea, para ello se considera relevante:

1. La estandarización de metodologías para la contabilidad y reporte de emisiones, por ejemplo, el marco GLEC para empresas generadoras de carga, transportistas y pro-

veedores de servicios logísticos, inclusive pymes. Siempre involucrando a agentes públicos y privados con el respaldo de entidades académicas,

2. El impulso de políticas públicas que impliquen estándares ambientales más rigurosos, como ejemplo, respecto de la renovación de flota,
3. Inversión en infraestructura, investigación y desarrollo en energías renovables para el transporte y la digitalización, y
4. El diseño de programas públicos y académicos que ofrezcan a la comunidad logística y consumidores en general información respecto de la internalización de los beneficios ambientales y a la salud por la descarbonización.

Respecto de las OLT, estas tienen que modificarse considerando los objetivos de desarrollo sostenible, incluir criterios ambientales además de los tradicionales de costo y nivel de servicio, con miras a constituir redes de distribución multimodal y colaborativas.

Referencias

- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2020). Giro Limpio – La ruta verde para Chile. <https://www.girolimpio.cl/>
- Barrosa, R. de C., Sampaio, M., & Correa, J. S. (2019). Impact of the inclusion of variable CO2 cost in the distribution network design. *Production*. Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 29.
- Bartholomeu, D. B., Péra, T. G., & Caixeta-Filho, J. V. (2016). Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO2 no transporte rodoviário de cargas. *Journal of Transport Literature*, 10(3), 15–19.
- Bataille, C., Waisman, H., Briand, Y., Svensson, J., Vogt-Schilb, A., Jaramillo, M., Delgado, R., Arguello, R., Clarke, L., Wild, T., Lallana, F., Bravo, G., Nadal, G., Le Treut, G., Godinez, G., Quiros-Tortos, J., Pereira, E., Howells, M., Buirá, D., ... Imperio, M. (2020). Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities. *Energy Strategy Reviews*, 30.
- Bataille, C., Waisman, H., Vogt-Schilb, A., Jaramillo, M., Delgado, R., Argüello, R., Clarke, L., Wild, T., Lallana, F., Bravo, G., LeTreut, G., Nadal, G., Godinez, G., Quiros-Tortos, J., Pereira, E., Howells, M., Buirá, D., Tovilla, J., Farbes, J., ... Svensson, J. (2020). Rutas de descarbonización profunda en América Latina: Desafíos y oportunidades. In Documento de Trabajo del BID No IDB-WP-01157.
- Blumberg, K., Posada, F., & Miller, J. (2014). Actualización de la NOM-044. Información para la toma de decisiones. International Council on Clean Transportation.
- Bongardt, D., Stiller, L., Swart, A., & Wagner, A. (2019). Sustainable Urban Transport: Avoid-Shift-Improve (A-S-I). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Brakarz, B., Ribeiro, K., Pereira Queiroz e Silva, T. L., Gomes Sousa, C. E., Lima Neto, V. C., & Amorim, L. (2021). *InfraLog: Uma rota para descarbonização do setor de*

transporte no Brasil. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://blogs.iadb.org/brasil/pt-br/infralog-uma-rota-para-descarbonizacao-do-setor-de-transporte-no-brasil/>

- Brito, M. F. de, & Silva, J. L. G. da. (2017). Logística verde: Uma ferramenta estratégica na tomada de decisão. *Espacios*, 38(18).
- Câmara Araujo, C. S. (2021). Freight in Brazil. An assessment and outlook for improving environmental performance (Issue September).
- Carvalho, F., Portugal Pereira, J., Junginger, M., & Szklo, A. (2021). Biofuels for maritime transportation: A spatial, techno-economic, and logistic analysis in brazil, europe, south africa, and the usa. *Energies*, 14(16).
- Costa Rica. Gobierno del Bicentenario. (2018). Plan Nacional de Descarbonización. In Dirección de Cambio Climático (pp. 40–42).
- Delgado, O., Rodríguez, F., & Façanha, C. (2019). Technology verification tool for green freight programs: Application of vehicle simulation tools to accelerate technology uptake. The International Council on Clean Transportation.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2021). Transporte de carga sostenible y eficiente (TRANSfer III). <https://www.giz.de/en/worldwide/87457.html>
- DFGE – Institute for Energy Ecology and Economy. (2022). GLEC Framework update: common approach assess logistics emissions. <https://dfge.de/glec-framework-a-common-approach-to-logistics-emissions-accounting/>
- Duarte Soliani, R., Tiradentes, A., & Jollebeck, L. (2017). A Sustentabilidade no Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil. XXIV Simpósio de Engenharia de Produção.
- Edwards, G. (2017). 3 aspectos clave de los planes de descarbonización 2050. Banco Interamericano de Desarrollo (“BID”). <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/3-aspectos-clave-de-los-planes-de-descarbonizacion-2050/>
- Engelage, E., Borgert, A., Gasparetto, V., Lunkes, R. J., & Schnorrenberger, D. (2017). Cost management in green logistics: Analysis in an agro-industry. *Custos e Agronegocio*, 13(1), 174–205.
- Gobierno de Colombia - Ministerio de Transporte. (2019). Programa de Modernización de Vehículos de Carga. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/7311/programa-de-modernizacion-de-vehiculos-de-carga/>
- Gómez Montoya, R. A., Correa Espinal, A. A., & Hernández Vahos, J. D. (2015). Transporte verde: eficiencia y reducción de CO2 integrando gestión, tecnologías de información y comunicaciones (TIC) y un metaheurístico. *Producción + Limpia*, 10(2), 53–68.
- Gómez Montoya, R. A., Correa Espinal, A. A., & Hernández Vahos, J. D. (2017). Modelo de centro de distribución verde: amigabilidad con el medio ambiente y eficiencia operacional usando un enfoque de procesos y un metaheurístico de búsqueda tabú. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 199–217.
- Gradilla, L. A. (2012). Transporte de carga en México: transición hacia un sistema sustentable. 383. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt383.pdf>
- Grupo Logístico Andreani. (2021). Andreani. Reporte de Sustentabilidad 2021.
- Hernandez, U., & Façanha, C. (2017). Expanding and Aligning Green Freight Programs. Proceedings of the Latin America Workshop on Green Freight Programs. International Council on Clean Transportation.

- Herrera Rodriguez, M., Agrell, P. J., Manrique-de-Lara-Peñate, C., & Trujillo, L. (2022). A multi-criteria fleet deployment model for cost, time and environmental impact. *International Journal of Production Economics*, 243.
- IEA. (2021). Greenhouse Gas Emissions from Energy 2021 Database documentation. www.iea.org
- Iniciativa Climática de México. Programa Transporte Sustentable. (2021). Manual para el diseño de programas de renovación de flotas (p. 45). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). <https://ciudadesytransporte.mx/wp-content/uploads/2021/06/Manual-para-el-diseño-de-programas-de-renovación-de-flotas.pdf>
- Lía, F. (2021). Casos de Éxito: Implementación de Medidas de Eficiencia Energética en Transporte de Cargas. PLATAFORMA REGIONAL LEDS LAC.
- McKinnon, A. C. (2018). Decarbonizing Logistics: Distributing Goods in a Low Carbon World. Kogan Page.
- McKinnon, A. C. (2021). Why Decarbonise Logistics? KÜHNE LOGISTICS UNIVERSITY. https://digital-lectures.klu.org/kompetenzbereich_digital_lectures/digital_lectures/bundle_decarbonising_logistics/kurs.html?Tutorialid=89
- McKinnon, A. C., Browne, M., Whiteing, A. E., & Piecyk, M. (2015). Green logistics: improving the environmental sustainability of logistics (3rd ed.). Kogan Page.
- McKinnon, A. C., & Petersen, M. (2021). Measuring Industry's Temperature: An Environmental Progress Report on European Logistics.
- McKinnon, A. C., & Woodburn, A. (1996). Logistical restructuring and road freight traffic growth. *Transportation* 23:2, 23(2), 141–161. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00170033>
- Meyer, T. (2020). Decarbonizing road freight transportation – A bibliometric and network analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 89.
- Ministerio de Economía. República Argentina. (2021). Argentina y Chile armonizarán los programas Transporte Inteligente y Giro Limpio. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/argentina-y-chile-armonizaran-los-programas-transporte-inteligente-y-giro-limpio>
- Ministerio de Economía. República Argentina. (2022). Programa Transporte Inteligente. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/eficiencia-energetica/transporteinteligente>
- Muñoz-Villamizar, A., Solano-Charris, E. L., Santos, J., & Montoya-Torres, J. R. (2019). Measuring environmental impact of collaborative urban transport networks: A case study. *Lecture Notes in Computer Science*, 53–66.
- Muñoz-Villamizar, A., Velázquez-Martínez, J. C., Haro, P., Ferrer, A., & Mariño, R. (2021). The environmental impact of fast shipping ecommerce in inbound logistics operations: A case study in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 283.
- Observatorio de Logística Sustentable (OLS). (2020). Encuesta de Situación de la Logística Sustentable Regional.
- Organización de las Naciones Unidas. (2022). Cambio climático. Desafíos Globales. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>
- Orjuela-Castro, J. A., Sepulveda-Garcia, D. A., & Ospina-Contreras, I. D. (2016). Effects of Using Multimodal Transport over the Logistics Performance of the Food Chain of Uchuva. *Communications in Computer and Information Science*, 657, 165–177.

- Pineda, L., & Xie, Y. (2021). Programas de Eco-condición (Eco-driving) de camiones. Estado actual en América Latina y mejores prácticas internacionales. International Council on Clean Transportation.
- Pinto, J. T. de M., Mistage, O., Bilotta, P., & Helmers, E. (2018). Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation. *Environmental Development*, 25, 100–110.
- Roblero, A., & Longhi, S. (2021). La colaboración público-privada hacia una logística urbana sostenible : el cambio climático como catalizador. ArticuLAC.
- Schipper, L., & Marie-Lilliu, C. (1999). Transportation and CO2 emissions: flexing the link - a path for the World Bank. Environment Department Papers - Climate Change Series No. 69, 1–86.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México. (2021). Programa Transporte Limpio. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programa-transporte-limpio-190236>
- Smart Freight Centre. (2019). Global Logistics Emissions Council Framework.
- Solís, J. C., & Sheinbaum, C. (2013). Energy consumption and greenhouse gas emission trends in Mexican road transport. *Energy for Sustainable Development*, 17(3), 280–287.
- United Nations. (2022). El Acuerdo de París. 2022 United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- Vennix, E., Helmi, T., & Ament, M. (2022). What is decarbonisation? Future of Energy | Deloitte Netherlands. <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/energy-resources-industrials/articles/what-is-decarbonisation.html>
- Vergara, W., Fenhann, J. V., & Schletz, M. (2016). Carbono Cero América Latina - Una vía para la descarbonización neta de la economía regional para mediados de este siglo: Documento de visión. In Documento de Visión. UNEP DTU Partnership. http://orbit.dtu.dk/files/123116630/Carbono_Cero.pdf
- Wanke, P., Correa, H., Jacob, J., & Santos, T. (2015). Including carbon emissions in the planning of logistic networks: A Brazilian case. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 7(6), 655–675.

Marco metodológico para el desarrollo de un plan de resiliencia basado en riesgos aplicado a un hub logístico

Jeancarlos Chen, Luisa Castro, Danna Ramírez, Fabio Reinoso y
Yorlenis Sánchez, Jorge Barnett
Georgia Tech Panama Logistics Innovation and Research Center

Resumen— *El complejo entorno que hoy en día se vive debido a la vulnerabilidad de las interrupciones en la cadena de suministro, ha mostrado que son frágiles, ocasionando cuellos de botella, escasez y, encarecimiento de productos, impidiendo así que la oferta se mantenga al día con la demanda. El hub logístico de Panamá al ser un puente estratégico de conexión hace que la exposición a las disrupciones pueda ocasionar consecuencias en la reputación y en la actividad comercial. La investigación revela que sí bien se viene trabajando en medidas para reducir el impacto de algunos riesgos a nivel país, para el sector logístico no se evidencia un análisis bajo un marco metodológico que considere la gestión de riesgos de una manera integral, que permita a las partes interesadas tomar acciones oportunas para mitigar riesgos y aumentar la resiliencia. Debido a esta realidad, este estudio tiene el propósito de establecer una metodología que facilite la identificación de los principales riesgos y amenazas a los que está expuesto el hub logístico y apoye la toma de decisiones a través de un plan de resiliencia. Bajo este objetivo, se diseña un marco metodológico tomando como referencia la norma ISO 23313, la cual facilita la adaptación de este marco a un sistema y cuenta con lineamientos sobre la gestión de riesgos en la cadena de suministro y la resiliencia en la continuidad del negocio. Hasta el momento se ha desarrollado la etapa 1, arrojando un primer diagnóstico sobre el estado actual de los riesgos y resiliencia en el hub logístico.*

Palabras Clave: Plan de resiliencia; marco metodológico, riesgos; Hub Logístico; disrupciones; partes interesadas

Abstract— *The complex environment that exists today due to the vulnerability of interruptions in the supply chain, has shown that they are fragile, causing bottlenecks, shortages and rising prices of products, thus preventing supply from keeping up with demand. The Logistics Hub of Panama, being a strategic logistics connection bridge, means that exposure to disruptions can have consequences for reputation and commercial activity. The research reveals that although measures are being worked on to reduce the impact of some risks at the country level, for the logistics sector there is no evidence of an analysis under a methodological framework that considers risk management in a comprehensi-*

ve manner, which allows stakeholders take timely actions to mitigate risks and increase resilience. Due to this reality, this study has the purpose of establishing a methodology that facilitates the identification of the main risks and threats to which the logistics hub is exposed and supports decision-making through a resilience plan. Under this objective, a methodological framework is designed taking the ISO 23313 standard as a reference, which facilitates the adaptation of this framework to a system and has guidelines on risk management in the supply chain and resilience in business continuity. Stage 1 of the methodology has been developed, providing a first diagnostic approach to the current state of risks and resilience in the logistics hub.

Introducción

La resiliencia en la cadena de suministro global es de vital importancia para mantener la continuidad de los negocios, la producción, y el comercio en la economía. Para poder llegar al último eslabón debe intervenir un complejo entramado de actores, cuya coordinación y confiabilidad son claves para que el producto llegue en el tiempo y lugar requerido. El complejo entorno en el que operan hoy las cadenas de suministro ha expuesto sus debilidades y falencias, generando interrupciones a los flujos de mercancía, ocasionando cuellos de botella y escasez de suministros, y encarecimiento de los productos, impidiendo así que la oferta se pueda mantener al día con el aumento de la demanda. Ante este panorama, se hace necesario contar con sistemas y procesos resilientes, dejando atrás un enfoque basado únicamente en la eficiencia y productividad. Ahora más que nunca, es importante considerar la flexibilidad operativa ante cualquier escenario.

El hub logístico de Panamá, visto como un sistema integrado por nodos logísticos, redes de conectividad y procesos debe trabajar de manera conjunta para garantizar la continuidad de los servicios logísticos brindados a las cadenas globales de valor. El país al ser un puente estratégico de conexión logística hace que la exposición a los riesgos pueda ocasionar consecuencias en la reputación como ruta y en la actividad comercial nacional e internacional. El Canal de Panamá, por ejemplo, se ha convertido en un punto clave para el tránsito global que permite conectar a dos océanos, y el comercio marítimo de bienes por el cual pasa aproximadamente entre el 3% y 6% del comercio mundial, dependiendo del tipo de mercancías [1], adicionalmente, Panamá cuenta con el mejor desempeño de conectividad marítima (LSCI por sus siglas en inglés) en la región de América Latina y el Caribe [2], haciendo que el Hub logístico no esté exento de cualquier disrupción. Con la pandemia, por ejemplo, la Zona Libre de Colón, que es una plataforma de redistribución para la región, se contrajo 20% al cierre del 2020, según datos oficiales.

La política de cero COVID en China, las tensiones comerciales entre varios países, y más recientemente la guerra entre Rusia y Ucrania, ha demostrado que las interrupciones en la cadena de suministro continuarán, afectando aún más los precios de los productos y disponibilidad de buques y contenedores. La cadena global de suministro ya estaba susceptible a raíz de la pandemia, y la guerra puede empeorar la situación. Específicamente para Panamá, la guerra tiene relevancia porque aumentará directamente los costos energéticos, incrementará los precios en los alimentos e indirectamente la producción agrícola local por su impacto sobre el costo de los fertilizantes [3]. Según reportes del Canal de Panamá, el volumen del tránsito de Gas Natural Licuado por la vía interoceánica se ha visto afectado, lo que ha provocado una menor recaudación de peajes [4].

En vista de esta realidad, este documento tiene la finalidad de establecer un marco metodológico que facilite la identificación de los principales riesgos y amenazas a los que está expuesto el hub logístico y apoye la toma de decisiones a través de un plan de resiliencia.

Para lograr esto se plantea contestar las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son los riesgos y amenazas a los que está expuesto el hub logístico de Panamá? ¿Qué medidas de gestión de riesgos existen en el hub logístico? ¿Cuál podría ser una metodología para desarrollar un plan de resiliencia que abarque la gestión de riesgos y la cadena de suministro?

Al ser el riesgo un factor global y de importancia de estudio para cualquier tipo de sistemas, es necesario, contar con mecanismos que ayuden a identificar aquellas interrupciones que pueden afectar su funcionamiento, sobre todo porque los entornos son cada vez más dinámicos.

De acuerdo con lo investigado, se pudo evidenciar que Panamá ha establecido un marco legal para desarrollar un Plan Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres, con la finalidad de aumentar la resiliencia y prevenir algunos riesgos asociados a los desastres naturales. Sin embargo, no se halló evidencia de una política o plan nacional enfocado en los riesgos específicos al hub logístico y sus componentes. Es importante mencionar que sí se encontraron planes de contingencia y/o continuidad del negocio específicos para algunos activos logísticos.

Los puntos antes expuestos refuerzan la necesidad de estar mejor preparados para entornos cada vez más inciertos y en trabajar coordinadamente para poder mitigar los riesgos que podrían afectar al hub logístico. El plan de resiliencia propuesto abarca los riesgos en varias dimensiones (ambientales, sociales, políticos, salud, entre otros), aunado a que sea desarrollado como un componente integrante y funcional para el hub. La gestión de riesgos puede verse desde dos puntos de vista: desde una perspectiva reactiva enfo-

cada en gestionarlos en el momento que ocurran sin estar adecuadamente preparados, o desde la perspectiva de gestionarlos a través del diagnóstico y prevención de estos.

En los últimos años han surgido diversas metodologías, marcos de referencia, y planes de resiliencia orientados a fortalecer la cadena de suministro como un mecanismo de mitigación de riesgos. Algunas de las metodologías buscan robustecer la cadena de suministro a lo interno, haciendo más resiliente a la cadena contra los factores que puedan afectar a las operaciones, la demanda o la capacidad. Por otro lado, otras metodologías buscan levantar un marco que permita mitigar los riesgos externos que puedan afectar a la cadena, ya sea las consecuencias causadas por distintas interrupciones, o levantamiento de medidas de continuidad de negocios.

Son varias las normas y estándares que guardan relación con la seguridad, riesgo, y la resiliencia de la cadena de suministro a nivel internacional. Algunas pueden usarse para obtener la certificación por parte de un organismo certificador, mientras que otras sirven más como marcos de referencia conceptuales para complementar el entendimiento de mejores prácticas y guías de aplicación para la gestión del riesgo y la mejora continua.

Dentro de lo investigado se encontraron organizaciones especializadas en materia de resiliencia y riesgos que han elaborado sus propios modelos basados en estándares internacionales como las normas ISO (Organización Internacional de Normalización), en algunos casos dirigidos a empresas y en otros a aumentar la resiliencia de los colaboradores. Entre estas resaltamos ICOR (The International Consortium for Organizational Resilience), BCI (Business Continuity Institute) y Riskmethods.

Por lo tanto, se deseaba que la propuesta del marco metodológico para el desarrollo de un plan de resiliencia para el hub logístico fuera igualmente basado en estándares reconocidos mundialmente, eligiendo específicamente la norma ISO 22313: Seguridad y resiliencia [5], diseñada por la Organización Internacional de Normalización. Esta norma, así como muchas otras sobre riesgos, seguridad en la cadena de suministro, resiliencia y continuidad de negocios son elaboradas por el comité técnico ISO/TC 292 donde hay más de 50 países involucrados y que desde el 2015 trabajan estos temas y son responsables de más de 40 normas internacionales publicadas [6]. Tanto ICOR como BCI hacen parte de las organizaciones de enlace del comité técnico ISO/TC 292 [6].

La norma ISO 22313, fue recientemente actualizada para satisfacer las nuevas necesidades, aclara términos importantes sobre continuidad de negocios e integra la evaluación del riesgo con la finalidad de poder analizar el impacto y posibles soluciones de continuidad y resiliencia, esto aunado a que facilita su aplicabilidad para cualquier industria sin importar el tamaño, debido a que el enfoque de esta guía depende del entorno y

la complejidad que se pretenda analizar [7]. Esta norma busca orientar y recomendar buenas prácticas, para la continuidad del negocio a través de la resiliencia. Este tipo de estándares posibilitan la implementación de estrategias para mitigar el riesgo, y monitorearlos, así como establecer escenarios de afectación y su impacto. El propósito del plan de resiliencia es que sea un mecanismo que brinde a las partes interesadas del sector información relevante sobre cómo gestionar los riesgos y permita que los servicios ofrecidos por el hub logístico no se vean interrumpidos abruptamente por disrupciones.

Para el marco metodológico, se extraen elementos claves de la norma para elaborar el plan de resiliencia, y que se podrían adaptar al hub logístico panameño, es por eso que se divide en cuatro fases: (1) diagnóstico, (2) diseño, (3) evaluación y (4) monitoreo. En la fase de diagnóstico se tiene en cuenta los activos del hub logístico y los principales riesgos identificados en informes y estudios recientes, con el fin de evaluar aquellos riesgos que podrían afectar los nodos logísticos del país, las redes de conectividad y los procesos críticos. En la fase de diseño se realiza un plan de acción para cerrar las brechas de lo analizado en el diagnóstico; posteriormente, en la evaluación, se determina las amenazas y riesgos específicos que enfrenta el hub logístico; y finalmente, en la última fase que es el monitoreo, se establece cómo será el seguimiento y control a la gestión de riesgos.

Este artículo se presenta en cuatro secciones. La primera sección es una introducción a la investigación que se está desarrollando para la elaboración de un marco metodológico de un plan de resiliencia aplicado al hub logístico panameño. En la segunda sección se presenta una revisión literaria que aborda definiciones y enfoques de la gestión de riesgos y resiliencia en la cadena de suministro. La tercera sección presenta un análisis de los resultados hasta ahora alcanzados, y en la cuarta sección las conclusiones y trabajo futuro de la investigación.

Revisión Literaria

El concepto de un hub logístico ha ido evolucionando a través del tiempo y no tiene una definición definitiva [8,9]. El mismo tiene sus orígenes en la industria aérea, y hace referencia a un sitio estratégicamente localizado en un aeropuerto utilizado como un centro de consolidación para pasajeros generalmente servidos por un solo transportista [10]. Paralelo a esto el concepto aparece entonces en la arquitectura de “Hub-and-Spoke” la cual tuvo un auge en la industria de transporte de carga aérea en los Estados Unidos [12] e involucra envíos provenientes de diferentes orígenes consolidados en terminales principales (hub) y redireccionadas a sus respectivos destinos por conexiones radiales (spokes) [8]. Vemos también como la definición de hub se expande más allá de la industria aérea en [11] donde se define un área específica en la cual todas las actividades relacionadas al transporte, logística y distribución de bienes, tanto para tránsito nacional

e internacional son efectuadas por varios operadores. Otros relacionan el concepto de hub con clúster logístico definido como una concentración geográfica de negocios, proveedores, e instituciones asociadas interconectadas en un campo específico, enlazados por puntos en común y complementarios, donde llega carga de diferentes orígenes y es organizada de acuerdo a las necesidades de los destinos [12].

En paralelo a la definición de hub vemos también el concepto de centro logístico. Existen muchas características que se han utilizado para describirlo, entre las cuales se encuentran, centro de distribución, almacén central, terminal de carga, nodo de transporte, plataforma logística, entre otros [9]. Un reporte de las Naciones Unidas define a un centro logístico como un lugar equipado con las facilidades públicas necesarias para desempeñar todas las actividades relacionadas a la logística [13].

En medio de múltiples definiciones obtenemos entonces un concepto que apunta a las capacidades que debe tener un hub logístico. Debido a su naturaleza, la confiabilidad es un elemento importante que tiene incidencia sobre el desempeño de la cadena de suministro usuarias del hub, ya que sirve como elemento conector entre distintas etapas de la cadena. Por esta misma razón, el riesgo que impacte a un hub logístico puede tener repercusiones a través de toda la cadena de suministro, materializándose en pérdidas económicas y sociales.

El riesgo es un elemento universal el cual forma parte de todo tipo de sistemas. En su definición más amplia, indica la exposición a la incertidumbre y a la posibilidad de pérdida, o a cualquier otra circunstancia adversa que pueda tener efectos negativos [14]. A través de los años, la cadena de suministro a nivel mundial ha aprovechado las tendencias de la globalización para realizar grandes economías de escala en términos de producción, administración, distribución, mercadeo y demás [15]. Sin embargo, todas las ventajas y oportunidades asociadas con la cadena de suministro global conllevan un significativo incremento en el nivel de riesgos enfrentados tanto por los actores privados como públicos en los mercados de hoy en día.

Adicional a esto, según [17] la cadena de suministro ha enfrentado desafíos como la alta variabilidad en la demanda, corta vida de los productos, y diferentes expectativas y requerimientos de los clientes; la adaptación a estos retos ha incrementado la complejidad de la cadena de suministro y ha resultado en más inestabilidad e imprevisibilidad.

Una categorización inicial de los riesgos que afectan a la cadena de suministro por parte de Simchi-Levi Kaminsky y Simchi-Levi [16] los clasifican en controlables e incontrolables. Los controlables son aquellos que incluyen el desempeño de los proveedores, la precisión de los pronósticos y los problemas operativos. Por otro lado, los incontrolables

incluyen a los desastres naturales, riesgos geopolíticos, epidemias, pandemias, y ataques terroristas para mencionar algunos ejemplos. De Souza, Goh y Meng [18] los segmentan en operacionales y disruptivos. Los operacionales siendo aquellos afectados por la incertidumbre en la oferta, el costo y la demanda, mientras que los disruptivos incluyen los desastres, la inestabilidad política, crisis financiera, paros laborales, entre otros. Rodrigue [19] categoriza a los riesgos de la cadena de suministro en riesgos de suministro, riesgos de demanda, y riesgos operativos, mientras que los aspectos incontrolables o disruptivos los denomina factores ambientales, geopolíticos, económicos y tecnológicos. Otras publicaciones clasifican a los riesgos en interrupciones, demoras, riesgos de sistemas, riesgos de pronósticos, riesgos de propiedad intelectual, riesgos de adquisiciones, riesgos de cuentas por cobrar, riesgos de inventario, y riesgo de capacidad [20].

Evidentemente las cadenas globales no sólo están expuestas a las fuerzas de la oferta y la demanda, sino que también lo están a factores disruptivos e incontrolables que puedan ocasionar cuellos de botella en nodos principales de la cadena, llevar al cierre de líneas de producción, e impactar sobre fuentes de materia prima que son esenciales para la producción de todo tipo de productos finales desde automóviles hasta productos farmacéuticos.

Jüttner, Peck, y Christopher [21] buscaron clarificar y dar una definición de la gestión de riesgos de la cadena de suministro, y la definen como “la identificación de fuentes potenciales de riesgo e implementación de estrategias apropiadas por medio de un enfoque coordinado para reducir vulnerabilidades en la cadena de suministro.”

Frente a los riesgos que afectan a la cadena de suministro a través de los años han surgido diferentes propuestas, estudios, metodologías, y marcos de referencia para controlar y mitigar el riesgo. Svensson [22] realiza uno de los primeros estudios que desarrollaron el concepto de la vulnerabilidad de la cadena de suministro desde el punto de vista de los flujos logísticos entrantes desde los nodos de manufactura. Zsidisin, Panelli, y Upton [23] realizaron un estudio por medio de entrevistas a compañías en donde buscaron analizar cómo creaban planes de contingencia, implementan mejoras en los procesos y estrategias de redundancia en respuesta a los riesgos percibidos. Sobre la línea de los planes de contingencia, Skipper y Hanna [24] examinaron la planificación de contingencias para minimizar la exposición al riesgo de una interrupción en la cadena de suministro. Específicamente, analizaron la relación entre los atributos de contingencia y flexibilidad, y el grado en que el contar con estrategias específicas apoya en la reducción de los impactos del riesgo.

Christopher y Peck [25] nos brindan una de las primeras definiciones en la literatura sobre la resiliencia de la cadena de suministro, en donde la definen basándose en los cuatro

componentes de reingeniería, colaboración, agilidad, y una cultura de gestión del riesgo en la cadena de suministro. Manuj y Mentzer [26] crean un modelo para proveer dirección para la elección de estrategias de gestión del riesgo dependiendo del contexto y el ambiente de la cadena de suministro.

Colicchia, Dallari, y Melacini [27] sugieren un enfoque para incrementar la resiliencia de la cadena de suministro en un contexto global, en donde evaluaron como el incremento de distancias entre orígenes de la carga y los mercados finales añaden incertidumbre a la continuidad del suministro por tiempos de entrega más largos y variables.

Kamalahmadi y Parast [28] en un estudio de revisión literaria proponen definiciones para la resiliencia en la cadena de suministro con base a diferentes etapas. Construyen un marco de referencia en donde destacan los principios de resiliencia de la cadena de suministro, principalmente la reingeniería, la colaboración, agilidad, y la creación de una cultura de innovación para la gestión de riesgos en la cadena de suministro. Otros estudios como los de Ribeiro y Barbosa-Povoa [29] se enfocan en el análisis cuantitativo de la resiliencia. En este estudio hacen una evaluación del desarrollo de los métodos cuantitativos para el apoyo en la toma de decisiones de una cadena de suministro resiliente, y también proponen una definición apoyada en un marco de referencia que incluye los elementos esenciales como el evento de enfoque, la respuesta adaptativa, la velocidad, y el nivel de desempeño.

Para desarrollar planes y evaluar la resiliencia de la cadena de suministro y sus elementos también se hace un acercamiento desde el punto de vista de los estándares internacionales. Scannell, Curkovic y Wagner [30] utilizaron datos de sondeos y entrevistas para sugerir que la ISO 31000, la cual se encuentra en el contexto de la gestión del riesgo empresarial, puede ser enlazada con la gestión del riesgo en la cadena de suministro. En su estudio determinaron que la ISO 31000 abarca el marco metodológico existente en la gestión del riesgo de la cadena de suministro, e incluso es más exhaustivo. Sobre esta misma línea, de Oliveira, Marins, Rocha, y Salomon [31] desarrollaron una revisión literaria sistemática, en donde compararon y armonizaron pasos propuestos con la gestión del riesgo en la cadena de suministro y desarrollaron una hoja de ruta para identificar y priorizar cuáles técnicas y herramientas de la ISO 31000 se pueden integrar con los procedimientos de la gestión del riesgo en la cadena de suministro por medio del proceso analítico jerárquico. En su estudio encontraron que la ISO 31000 puede ser utilizada beneficiosamente como un método estandarizado para la gestión del riesgo en la cadena de suministro. Kusriani y Hanim [32] aplicaron la ISO 28001 en un proveedor de servicios logísticos para analizar el cumplimiento, los riesgos de la cadena de suministro y proponen medidas de mitigación. Adicionalmente, diseñaron un plan de mitigación de riesgos basado en el Análisis del Modo y Efecto de Fallas (AMEF) en donde calculan el número

de prioridad de riesgo (RPN por sus siglas en inglés) para indicar el nivel de la disrupción y prioridad de mitigación. Polemi y Kotzanikolaou [33] proponen una metodología basada en la ISO 28001 para evaluación del riesgo general en toda la cadena de suministro. Los valores de riesgo usualmente son utilizados para generar una política de seguridad en la cadena de suministro, que permita la identificación de los controles de seguridad mínimos necesarios para cada participante de la cadena.

Sobre la base de la información recolectada de la revisión literaria es evidente que la literatura aborda los principios de la gestión del riesgo y la resiliencia en la cadena de suministro cada uno dentro de su propia esfera. Desde el punto de vista de planes de contingencia y/o continuidad de negocio, se pudo establecer que son aplicados por empresas en diversos sectores, en donde consideran la comunicación y las partes interesadas para la toma de decisiones y la mejora continua.

Tanto los conceptos de resiliencia y riesgos, como los planes están principalmente orientados a organizaciones, pero no a un sistema como un hub logístico. En vista de un marco que comprendiera todos estos elementos se toma como referencia la Norma ISO 23313 como fundamento para el desarrollo del plan de resiliencia para el hub logístico.

Análisis de los resultados

Tanto las ciudades como las organizaciones han visto en los planes de resiliencia o de riesgos, ejercicios necesarios para estar mejor preparados frente a las crisis, la finalidad de estos documentos es poder mejorar el nivel de resistencia ante circunstancias cambiantes que puedan generar los riesgos, permitiendo conocer los puntos ciegos y deficiencias que se tienen, para tener estrategias de respuesta.

El primer resultado fue un análisis comparativo de los estándares internacionales que se pueden utilizar de referencia para el diseño de una metodología para desarrollar un plan de resiliencia. Se consideraron los documentos incluidos en la Fig. 1 como base metodológica, buscando implementar las mejoras prácticas que ofrecen al contexto del hub logístico panameño. De los estándares listados, el que mejor se adapta a un sistema y que ofrece lineamientos tanto para el análisis de gestión de riesgos como para la continuidad de negocios, fue la norma ISO 23313:2020, debido a que explica cómo se puede establecer una estructura de respuesta a través de un plan de resiliencia, de modo que incluya las partes interesadas y se pueda responder y recuperarse de situaciones a través del tratamiento y el impacto cuando ocurre una interrupción.

Tabla 1. Estándares seleccionados aplicables al estudio

Estándares en temas de resiliencia, riesgos y continuidad de negocio		
Norma ISO	Área de enfoque	Descripción
22313:2020	Seguridad y resiliencia. Sistemas de gestión de la continuidad del negocio.	Orientación para aplicación de requisitos del sistema de gestión de la continuidad del negocio (BCMS). Permite a la organización controlar, evaluar y mejorar la continuidad de su negocio.
22320:2018	Seguridad y resiliencia – Gestión de emergencias – Directrices para la gestión de incidentes	Proporciona orientación para que las organizaciones mejoren su manejo de todo tipo de incidentes (por ejemplo; emergencias, crisis, interrupciones y desastres).
28001:2007	Sistemas de gestión de seguridad para la cadena de suministro - Mejores prácticas para implementar planes, evaluaciones y seguridad	Ayuda a una organización a establecer niveles adecuados de seguridad dentro de la(s) parte(s) de una cadena de suministro.
31000:2018	Gestión de riesgos – Directrices	Proporciona pautas sobre la gestión del riesgo que enfrentan las organizaciones
31010:2019	Gestión de riesgos — Técnicas de evaluación de riesgos	Da orientación sobre la selección y aplicación de técnicas para evaluar el riesgo. El documento proporciona resúmenes de una variedad de técnicas, con referencias a otros estándares donde las técnicas se describen con más detalle.

El plan de resiliencia que se propone para el hub logístico surge bajo la premisa de que es importante realizar un análisis de riesgos para aquellos activos logísticos de mayor relevancia, particularmente los que integran la Zona Interoceánica consolidada en torno al Canal de Panamá. La Estrategia Logística Nacional de Panamá 2030 [34] lista entre los componentes de la Zona Interoceánica al Canal de Panamá, los puertos que están en el lado Pacífico y Atlántico, el Aeropuerto Internacional de Tocumen, las Zonas Económicas Especiales y el corredor interoceánico. Esta misma estrategia define como uno de sus subsistemas críticos al Hub Central de la Zona Interoceánica, por ser el elemento troncal que brinda soporte a todos los otros subsistemas estratégicos del país. El plan de resiliencia basado en riesgos no puede verse como una investigación aislada, más bien debe considerarse como un elemento integrador, que recoja información de las partes interesadas y que su aplicación sea funcional para que se fomente la gestión de riesgos y la resiliencia como parte de la propuesta de valor del hub logístico.

Por tal razón, se define un marco metodológico general compuesto por cuatro (4) etapas descrito en la Fig. 1, el cual explica los pasos para el desarrollo del plan de resiliencia basado en riesgos, que básicamente se compone de la ejecución de las primeras 3 etapas (Diagnóstico, Diseño y Evaluación); finalmente, se establece una última etapa para el seguimiento y control a través de indicadores. Para que exista un entorno de mejora continua es necesario la aplicación de unas tareas transversales como la educación y sensibilización, actualización de los parámetros y el modelo de la gestión de riesgos, y la ejecución de proyectos que sirvan para actualizar y comprender el entorno cambiante.

Hasta el momento, se ha ejecutado la primera etapa, la cual consistió en un diagnóstico, compuesto por cuatro (4) actividades de primer nivel: (a) análisis del sector logístico, (b) establecimiento de las partes interesadas que conforman el hub, (c) identificación de los activos críticos, y (d) un análisis para diagnosticar las brechas encontradas incorporando los elementos de riesgos identificados (Fig. 1).

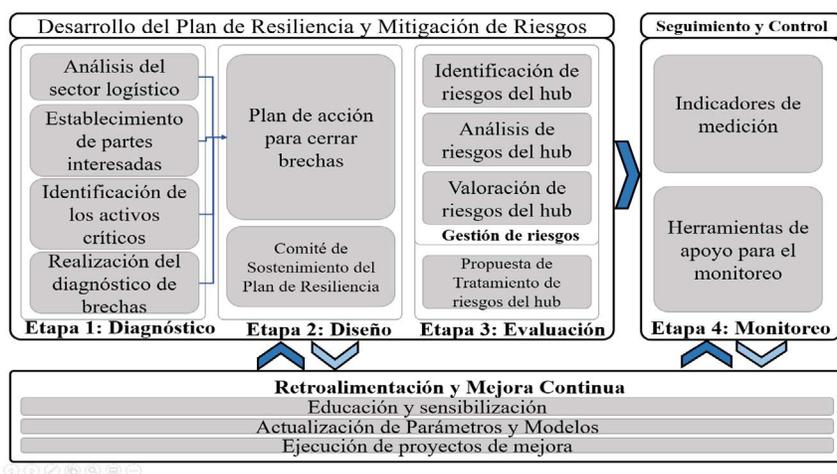


Figura 1. Marco metodológico para el desarrollo del plan de resiliencia basado en riesgos
Fuente: elaboración propia

Inicialmente, se realizó un análisis de los planes, guías, programas, procedimientos, manuales o certificaciones asociadas a la gestión de riesgos y/o resiliencia con los que cuenta cada activo logístico identificado en el hub. Para esto se tuvo en consideración los documentos ya elaborados en el sector logístico de Panamá, así como normas internacionales o lineamientos que se deban cumplir para una adecuada operación, incluyendo las pólizas de seguros, que en determinadas circunstancias ayudan al tratamiento de los riesgos.

Durante la investigación, se pudo evidenciar que el gobierno de Panamá viene impulsando medidas para reducir el impacto de algunos riesgos, específicamente, los causados

por desastres naturales. Con la finalidad de aumentar la resiliencia, el legislativo promulga la Ley 7 de 2005 con su reglamento y establece una política nacional de gestión de riesgos [35]. Para esto se desarrolla un Plan Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres, sin embargo, la última actualización de dicho plan fue en 2015. Por el momento, se está a la espera de la publicación de un nuevo documento, el cual se realiza con un proceso de consultas con representantes del sector público, privado, académico y sociedad civil en general; y del apoyo de organismos internacionales.

Esta etapa también incluyó el establecimiento de las partes interesadas, que abarcó la identificación de los actores institucionales que conforman el hub logístico, delimitado por los parámetros del estudio. Por actor institucional se denomina una entidad pública, privada o académica con institucionalidad propia y autonomía de acción, que participa dentro de o está conectado a algún nodo del hub logístico, gestiona algún activo que interconecte dichos nodos; o lidera la actuación conjunta con interés común (ejemplos de este último caso son las organizaciones gremiales o empresariales, donde cada una puede contar con decenas o cientos de entidades representadas). Dicha identificación derivó en más de sesenta (60) actores institucionales, distribuidos entre doce (12) grupos de acción.

Los activos críticos seleccionados para el estudio fueron aquellos que se ubican en la Zona Interoceánica por considerarse claves en la Estrategia Nacional Logística [34], debido a que en esta zona opera una gran gama de servicios de valor agregado y auxiliares que sirven a las distintas cadenas logísticas y adicionalmente, operan varios sistemas de apoyo a los procesos de comercio exterior.

A fin de llevar a cabo el diagnóstico de brechas relacionadas a la exposición de riesgos de esta etapa, se levanta una matriz con las disrupciones más relevantes que hayan causado algún impacto en los últimos cinco (5) años con niveles heterogéneos de impacto sobre las operaciones de los distintos nodos y actores. Entre los eventos identificados y evaluados se pueden mencionar el paro sufrido en el 2019 en el Puerto de Balboa donde se afectó la operación de dicha terminal [36], los cierres que se han presentado en la entrada a la ciudad de Colón y sus nodos logísticos de comercio exterior [37], la interrupción de la ruta del ferrocarril interoceánico a causa de una colisión de un buque con un puente del ferrocarril [38], y los cierres en el cruce fronterizo Panamá-Costa Rica durante la pandemia [39]. Para cada evento se considera la duración y el impacto causado, así como los nodos afectados de manera directa e indirecta por la disrupción. En la Fig. II se presentan las disrupciones levantadas hasta el momento; en un primer análisis se pudo establecer que la parte social representa el 22% (que incluyen temas de paro laboral y protestas en general) y de salud 21% asociadas por la pandemia del COVID, apreciando igualmente un ligero aumento de frecuencia de dichos incidentes en la segunda mitad

de dicho período respecto a la primera mitad, aunque esto puede ser parcialmente justificable por la situación coyuntural generada por la pandemia COVID-19 (debido a las consecuencias económicas directas que pueden incidir sobre las dimensiones sociales y de salud), y por una combinación de sesgos de disponibilidad y selección de datos, pues hay más volumen de información disponible de manera pública y mayor anuencia de los impactos para los años más recientes.

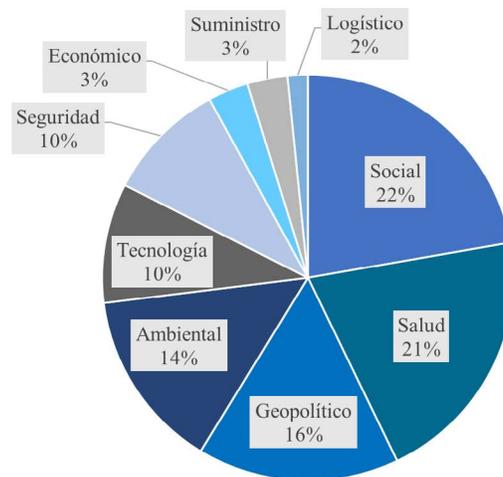


Figura 2. Factores de riesgo identificados en las noticias de los últimos 5 años

Otro dato importante fueron los temas geopolíticos y ambientales que representaron alrededor del 16% y 14% respectivamente de la información recabada, esto básicamente haciendo alusión a las disputas arancelarias y comerciales de Panamá con otros países y actualmente la afectación en el tránsito de buques por el canal debido a la guerra entre Ucrania y Rusia. Finalmente, en el tema ambiental las inundaciones, la escasez del agua y derrames de hidrocarburos fueron las interrupciones que más se presentaron. En una proporción más baja está el tema tecnológico y seguridad. En la parte tecnológica se evidenció afectaciones en los sistemas y herramientas que intervienen en los aspectos logísticos del país, pero encaminadas básicamente al comercio exterior. En la parte de seguridad se encontraron eventos asociados principalmente a infraestructura deficiente y falta de capacitación para solventar incendios.

Para validar los impactos de los eventos, una porción relevante de los datos recolectados fue contrastada con actores identificados en la fase diagnóstica cuyas áreas de actuación se hayan visto afectadas por dichas interrupciones particulares. Esto permitió una tipificación preliminar de los impactos generales ocasionados por los eventos disruptivos. El resultado de estos levantamientos de datos queda entonces estructurado en un análisis consensuado con los principales actores, que permite generar un contexto consolidado del nivel de riesgo a interrupciones al que está sometido el hub como un todo, en contraste a sus componentes particulares.

La relevancia de considerar el hub como un ente agregado radica en la naturaleza articuladora de cadenas globales de valor que posee dicho hub. En contraste a nodos puramente generadores o consumidores de carga, el hub logístico de Panamá es un eslabón articulador para la intermodalidad y adición de valor en las cadenas de suministro globales. Por tal razón, existe una mayor dependencia del hub de las dimensiones de desempeño orientadas a confiabilidad y fluidez en la atracción de mayores flujos de mercancía. Estas dimensiones de desempeño requieren una interacción coordinada entre diversos actores del hub, por lo que los impactos locales generados por un riesgo particular se traducen en impactos generalizados al desempeño del hub. Igualmente, los esfuerzos de mitigación de riesgos de actores particulares deben ser complementados con estrategias integrales de mitigación de riesgos a nivel del sistema, para potenciar la efectividad de dichos esfuerzos.

Conclusiones y trabajo futuro

Uno de los grandes retos de la cadena de suministro es superar las pruebas que dejó la pandemia del COVID-19, que mostró la necesidad de trabajar en estrategias más acordes a la realidad tomando como referencia los riesgos y la colaboración de las partes, afrontando de esta manera las exigencias del entorno mundial. En este contexto, es preciso tener mayor visibilidad para predecir, evaluar, gestionar y mitigar cualquier riesgo, y más aún contar con metodologías que puedan ser acopladas a sistemas diversos, como lo es un hub logístico.

Con lo desarrollado del proyecto hasta ahora se puede concluir que a pesar de la carencia de investigaciones que contengan metodologías para la elaboración de Planes de Resiliencia como sistemas integrados que faciliten la gestión de riesgos al nivel de hub logístico, sí se pudo encontrar diversos estándares y principios para la evaluación estructurada de los riesgos en la cadena de suministro.

Un ejemplo de ello es la ISO 31000 “Gestión del Riesgo-Directrices”, la cual es referenciada en la ISO 23313 para realizar análisis y evaluación de las interrupciones. Por otro lado, los riesgos y la resiliencia vienen de la mano, porque esta última permite mejorar la capacidad de funcionamiento y recuperación de los sistemas al tratar de manera integral los riesgos. Los acontecimientos recientes hacen que las empresas y los países quieran estar mejor preparados para las interrupciones, así como tener una mirada más holística de los sistemas, procurando entender que la eficiencia en las operaciones y la productividad, ya no son suficientes si no se tiene en cuenta un mapeo de los riesgos, para tratarlos y en lo posible mitigarlos.

Una vez que los riesgos se han identificado, valorado y clasificado, es cuando se constituyen los Planes de Resiliencia, los cuales incluyen las directrices para abordar la contingencia, y su mejor tratamiento.

Este tipo de trabajos no son posibles sin la participación de las partes interesadas, quienes son elementos claves para el análisis de las interrupciones, y en sí para garantizar la fluidez y el funcionamiento normal del hub. La identificación, sensibilización e intercambio de conocimiento con estas partes interesadas ha sido un componente vital de las etapas iniciales en el desarrollo del plan de resiliencia.

El marco metodológico propuesto, resumido en la Fig. I, constituye un aporte al conocimiento local en materia de gestión de riesgos logísticos, al definir una hoja de ruta que resulte a futuro en un plan integral de mitigación de riesgos para el hub logístico panameño. De dicho marco, se ha presentado los resultados del diagnóstico (etapa 1), que ha permitido identificar brechas existentes en cuanto a la legislación y/o reglamentación para el funcionamiento de los activos logísticos, especialmente en los que son concesionados, para que se considere la gestión de riesgos, y de esta forma se incluyan algunos elementos asociados a los seguros. La fiscalización de las entidades del estado es importante para el cumplimiento de lineamientos establecidos en la legislación con la finalidad de mitigar algunos riesgos que puedan afectar la infraestructura, el medio ambiente y la reputación del hub.

Si bien las evaluaciones resultantes de la primera etapa pueden parecer subjetivas, la metodología que recomienda la ISO 23313 ayuda a tratar de clasificar de la mejor forma posible los peligros que se identificaron y establecer un marco metodológico que sea flexible y actualizado en el tiempo. Se espera que futuras investigaciones nutran de más conocimiento la metodología propuesta.

La etapa 2 definida dentro de dicho marco metodológico fue iniciada y continua en desarrollo, se espera que los resultados que arroje el plan de acción, sirva para cerrar brechas existentes en cuanto a la legislación y/o reglamentación sobre los lineamientos ya sea de concesión o de funcionamiento de los activos logísticos, para que se consideren algunos seguros que ayuden al tratamiento de los riesgos y se mejore la fiscalización de las entidades del estado con la finalidad de mitigar ciertos riesgos que puedan afectar la infraestructura, la parte ambiental y la reputación del hub.

Dentro de esta etapa se tiene definido, establecer un comité donde participen las partes interesadas, el cual podría ser un mecanismo para mantener la coordinación y la identificación de los posibles fallos que pueden llegar a comprometer la fluidez y el funcionamiento normal del hub. Como trabajo futuro se contempla la ejecución de las etapas

3 y 4, que servirán para el desarrollo del proceso de gestión de riesgos que incluye el seguimiento y control a través del levantamiento y establecimiento de indicadores. Los indicadores serán establecidos a los nodos logísticos, a las redes conectoras y a los procesos con la finalidad de servir de alerta y se tenga conocimiento cuales están fuera de los límites que se consideren aceptables.

Para el monitoreo, se incluirá el diseño de un mapa interactivo, que estará disponible para el usuario como una herramienta digital, para esto se hará una revisión de las tecnologías disponibles. A través del mapa se podrá visualizar e identificar los riesgos críticos del conglomerado logístico, como apoyo a la toma de decisiones en respuesta a una posible disrupción.

Dada la naturaleza integral y continua de la gestión de riesgos, se hará énfasis en la educación de los actores del sector logístico en cuanto a la importancia y relevancia de la resiliencia como parte de la propuesta de valor del Hub Logístico Panameño. Sin el capital humano, no sería posible que la cadena de suministro global funcione. Por tal motivo, la sensibilización local, y el desarrollo de proyectos colaborativos con los sectores público, privado y académico, contribuyen a crear una cultura de resiliencia en el sector, y proporciona una base de conocimiento para responder ágilmente a las disrupciones que puedan darse en los sistemas físicos, tecnológico y humanos a nivel local, regional y global.

Finalmente, el Plan de Resiliencia resultante será un insumo que contribuya a la elaboración de políticas públicas conducentes al fortalecimiento de los sistemas que dan soporte al hub logístico, con sustento en datos, metodologías y conocimiento, y orientadas al desarrollo integral y sostenible del país.

Reconocimientos

Los autores agradecen el financiamiento proporcionado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT) para el desarrollo de este proyecto bajo la Convocatoria Pública de Fomento a I+D Orientada por Misión Logística (IOML) 2020, bajo el proyecto PFID-IOML-2021-16.

Referencias

- F. Paúl. “Cuáles son, además del canal de Suez, los otros 3 grandes pasos marítimos del comercio internacional (y qué tan vitales son para la economía).” BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticiasinternacional-56564954> (acceso en Mayo 5, 2022).

- Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD). LSCI Informe Primer trimestre del 2022.
- E. Tapiero. “Análisis de la guerra de Rusia y su impacto en el comercio global.” COEL. <https://www.coelpanama.org/post/analisis-de-la-guerra-de-rusia-y-su-impacto-en-el-comercio-global> (acceso en Julio 2022)
- C. Morris. “Canal de Panamá afectado por guerra entre Rusia y Ucrania.” ECO News. <https://www.ecotvpanama.com/eco-news/programas/canal-panama-afectado-guerra-rusia-y-ucrania-n5714222> (acceso en Julio 2022)
- ISO 22313:2020 Seguridad y resiliencia – Sistemas de gestión de la continuidad de negocios – Guía en el uso de la ISO 22301. <https://www.iso.org/standard/75107.html>
- ISO/TC 292. Comité Técnico. Seguridad y resiliencia. <https://www.iso.org/committee/5259148.html>
- “ISO ha publicado una nueva edición de la ISO 22313 en sistemas de gestión de la continuidad de negocios”. <https://www.isotc292online.org/news-archive/iso-has-published-a-new-edition-of-iso-22313-on-business-continuity-management-systems/>
- H. S. Nam, and D. W. Song, “Defining maritime logistics Hub and its implication for container port,” *Maritime Policy & Management*, 38(3), pp. 269-292, 2011, doi: 10.1080/03088839.2011.572705.
- K. Rimienè, and D. Grundey, “Logistics centre concept through evolution and definition,” *Engineering economics*, vol. 54, no. 4, pp. 87-95, 2007, doi:
- J. L. Cavinato. *Transportation-logistics dictionary*. 3rd ed. Springer Science & Business Media, 2012.
- Europlatforms, E. E. I. G., *Logistics centres directions for use*. A report by EUROPLATFORMS EEIG, 2004.
- D. Munoz, and M. L. Rivera Virgüez, “Development of Panama as a logistics Hub and the impact on Latin America” M. Eng. Thesis, Engineering Systems Division, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- Commercial Development of Regional Ports as Logistics Centres. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific ESCAP, Naciones Unidas, Nueva York. 2002.
- “Riesgo/Risk,” *Oxford English Dictionary* (Online ed.). Oxford University Press.
- T. Levitt, “The globalization of markets,” in *Readings in international business: a decision approach*, MIT Press, 1993, pp. 249-252
- D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi. *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies*. Tata McGraw-Hill Education, 2008.
- D. Stefanovic, N. Stefanovic, and B. Radenkovic. “Supply network modelling and simulation methodology,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, no. 4, pp. 743-766, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.01.001>.
- R. De Souza, M. Goh, and F. Meng. “A Risk Management Framework for Supply Chain Networks”, The Logistics Institute Asia Pacific White Paper, Volume 07-Aug-SCO03. Agosto 2007. https://www.tliap.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2019/04/07-Aug-SCO03_A-Risk-Management-Framework-for-Supply-Chain-Networks.pdf
- J.-P. Rodrigue. *The geography of transport systems*. Routledge, 2020.
- DHL Supply Watch. “DHL Resilience360”. <https://www.resilience360.dhl.com/risk-management-products/supply-watch/>

- U. Jüttner, H. Peck, and M. Christopher. "Supply chain risk management: outlining an agenda for future research," *International Journal of Logistics: Research and Applications* vol. 6, no. 4, pp. 197-210, 2003, doi: <https://doi.org/10.1080/13675560310001627016>.
- G. Svensson. "A conceptual framework for the analysis of vulnerability in supply chains," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* vol. 30, no. 9, pp. 731-750, 2000, doi: <https://doi.org/10.1108/09600030010351444>.
- G. Zsidisin, A. Panelli, R. Upton. "Purchasing organization involvement in risk assessments, contingency plans, and risk management: an exploratory study," *Supply Chain Management: An International Journal* vol. 5, no.4, pp. 187-198, 2000, doi: 10.1108/13598540010347307.
- J.B. Skipper and J.B. Hanna, "Minimizing supply chain disruption risk through enhanced flexibility," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 39, No. 5, pp. 404-427, 2009, doi: <https://doi.org/10.1108/09600030910973742>.
- M. Christopher, H. Peck. "Building the resilient supply chain," *The International Journal of Logistics Management* vol. 15, no. 2, pp. 1-14, 2004, doi: <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>.
- I. Manuj, J. Mentzer. "Global supply chain risk management strategies," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* vol. 38, no. 3, pp. 192-223, doi: <https://doi.org/10.1108/09600030810866986>.
- C. Colicchia, F. Dallari, and M. Melacini. "Increasing supply chain resilience in a global sourcing context." *Production planning & control*, vol. 21, no. 7, pp. 680-694, 2010, doi: <https://doi.org/10.1080/09537280903551969>.
- M. Kamalahmadi, and M.M. Parast. "A review of the literature on the principles of enterprise and supply chain resilience: Major findings and directions for future research." *International Journal of Production Economics*, vol. 171, no. 1, pp. 116-133, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.10.023>
- J.P. Ribeiro, and A. Barbosa-Povoa. "Supply Chain Resilience: Definitions and quantitative modelling approaches—A literature review," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 115, pp. 109-122, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.11.006>.
- T. Scannell, S. Curkovic, B. Wagner. "Integration of ISO 31000:2009 and Supply Chain Risk Management," *American Journal of Industrial and Business Management*, vol. 3, no. 4, pp. 367-377, 2013, doi: 10.4236/ajibm.2013.34043.
- U. de Oliveira, F. Marins, H. Rocha, V. Salomon. "The ISO 31000 standard in supply chain risk management," *Journal of Cleaner Production*, vol 151, pp. 616-633, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.054>.
- E. Kusriani, and K. Hanim, "Analysis of Compliance and Supply Chain Security Risks Based on ISO 28001 in a Logistic Service Provider in Indonesia," *Journal homepage: http://iieta.org/journals/ijssse*, vol. 11, No. 2, pp. 135-142, 2021.
- N. Polemi, and P. Kotzanikolaou, "Medusa: a supply chain risk assessment methodology," *Cyber Security and Privacy Forum*, pp. 79-90, Springer, Cham.
- Gabinete Logístico de la República de Panamá. Estrategia Logística Nacional de Panamá 2030. Junio 2017.
- Plan Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres de Panamá 2011 – 2015. Instrumento de implementación de la Política Nacional de Gestión Integral de Riesgo de Desastres.

- M. Lasso. "Paro laboral en el puerto de Balboa: un impacto 'millonario'." La Estrella de Panamá. <https://www.laestrella.com.pa/economia/190720/paro-puerto-balboa-laboral-impacto> (acceso en Mayo 5, 2022).
- R. Rodríguez. "COEL y APAC rechazan cierres de calles en Colón, piden intervención de autoridades." En Segundos. <https://ensegundos.com.pa/2021/02/19/coel-y-apac-rechazan-cierres-de-calles-en-colon-piden-intervencion-de-autoridades/> (acceso en Mayo 5, 2022).
- Y. Calles. "Colisión en Gamboa paraliza ferrocarril." Metro Libre. <https://www.metrolibre.com/econom%C3%ADa/174803-colisi%C3%B3n-en-gamboa-paraliza-ferrocarril.html> (acceso en Mayo 5, 2022)
- J. Saldaña. "Cierres provocan \$5 millones de pérdidas en Paso Canoas." <https://www.ecotvpanama.com/telemetro-reporta-chiriqui/programas/cierres-provocan-5-millones-perdidas-paso-canoas-n5605634>(acceso en Mayo 5, 2022)

Localización de un nuevo Centro de Distribución para la industria de alimentos en Colombia. Aplicación del método del centro de gravedad para ubicación de instalaciones. centro de gravedad para ubicación de instalaciones

Laura Camila Rodriguez Hernandez y
Lourdes Loza-Hernandez
Universidad Autónoma del Estado de México

Resumen—Una empresa creada desde 1983 y dedicada a actividades de restaurantes y comidas rápidas con más de 200 sucursales con presencia en gran parte de Colombia, presenta un reto logístico en la distribución de sus productos, la cual busca principalmente mantener su método de rotación de productos primero en expirar es el primero en salir (PEPS) y el control de la cadena de frío durante toda su actividad de abastecimiento a los diferentes puntos de venta. Entre los desafíos que presenta esta empresa es el incremento de producto rechazado y los altos costos logísticos que implica enviar el producto a cada una de sus sucursales, principalmente aquellos despachos que se envían hasta la isla de San Andrés desde el Centro de Distribución ubicado en Funza, Cundinamarca. Las rutas consideran múltiples paradas que se deben realizar para llegar al destino final y el tiempo de transporte que se requiere para trasladar el producto con las condiciones adecuadas, con el fin de garantizar la calidad de los alimentos. En este artículo se desarrolla una propuesta de ubicación de un nuevo Centro de Distribución, para la empresa caso de estudio, perteneciente al sector de alimentos, aplicando el método de centro de gravedad, teniendo en cuenta las condiciones actuales de la empresa y reducir la cantidad de producto rechazado en los puntos de venta para mejorar así su desempeño logístico, cuidando los aspectos más relevantes del movimiento de alimentos para consumo humano.

Palabras Clave: Localización, Método Centro de gravedad, Sector alimentario, Toma de decisiones

Introducción

La industria alimenticia destinada para el consumo humano es uno de los sectores más delicados debido al manejo de los productos por su importancia de mantener la inocui-

dad de los mismo durante todas las etapas de la cadena de suministro. Un alimento con inocuidad garantizada nos permite tener certeza que no serán potenciales transmisores de enfermedades o daños a los consumidores. Las condiciones de distribución y manejo de los alimentos se pueden encontrar en las diferentes fichas técnicas de los mismos, el gran reto logístico para nosotros se centra en mantener estas condiciones adecuadas como lo son: temperatura, el control de humedad, evitar contaminación cruzada, buen manejo del producto evitando daños en el mismo con la mayor trazabilidad y precisión posible. El transporte de alimentos debe considerar distancias, tiempos, temperaturas ambientes, humedad relativa, composición química entre otras condiciones para determinar el traslado a los diferentes nodos intermodales que se requieren para llegar a su destino (así como lo es el transporte terrestre, marítimo, aéreo o ferroviario)(Suárez, 2001).

El contar con ubicaciones que permitan dar una respuesta inmediata a los requerimientos y demandas de productos de los clientes, permite que los tiempos de respuesta sean menores y el nivel de servicio brindado al cliente final sea mayor. Una buena planeación del Centro de Distribución para la empresa de alimentos impacta en la reducción de costos de transporte, mayor control de calidad en sus productos, un mejor flujo de sus productos a las zonas más alejadas de la planta y una mayor capacidad de respuesta.

Este trabajo muestra la aplicación del método de centro de gravedad para identificar la mejor ubicación de un nuevo centro de distribución de una empresa dedicada a la venta de comida rápida ubicada en Colombia, la cual debido a las largas distancias de recorridos en las que se encuentran sus puntos de venta, sus productos no llegan con las condiciones de calidad necesarias para su venta en el norte del país. La forma de dar solución a este problema se describe en las siguientes secciones: En la sección dos se muestra la importancia de la aplicación de métodos cuantitativos para la solución del problema, considerando el método de centro de gravedad como uno de ellos. En la sección tres se describe la metodología aplicada al caso de estudio. En la sección cuatro se evidencian los resultados de la metodología aplicada y finalmente, en la sección cinco las conclusiones del trabajo.

Localización de instalaciones

a. consideraciones

Es importante examinar tendencias y la identificación de factores debidamente categorizados como dominantes críticos o secundarios. De las posibles alternativas se deben considerar los factores cuantitativos y cualitativos, de todas las condiciones directas e indirectas a las que se va a exponer el producto y el personal que se contratara en la zona de selección.

Roberto Carro (2004) nos presenta en su artículo diferentes metodologías que se pue-

den emplear para este cálculo, entre ellas se encuentran: el método de ponderación de factores. Variación de Brown y Gibson, en los que se presentan una lista de factores considerados en un análisis para la asignación de pesos relativos, para seleccionar aquella localización con el mayor puntaje ponderado obtenido; sin embargo, este modelo se ve ampliamente influenciado por el criterio y experiencia del evaluador. En términos generales la determinación de la localización busca “maximizar el beneficio de la ubicación para la empresa” (Henzer & Render, 2004).

Entre las características que mencionan Correa y Hernández (2004) se encuentran la capacidad de respuesta a la demanda en función de la cercanía con los principales clientes o consumidores, la buena planeación de las instalaciones que generan beneficios económicos de infraestructura, tecnología y su manejo con el apoyo de la planeación estratégica y algunos software de información el tomar este tipo de decisiones es hoy en día menos complejo de lo que parece. “La localización de la instalación es el proceso de elegir un lugar geográfico para realizar las operaciones de una empresa”(Correa & Hernández, 2004)

Existen diferentes modelos cualitativos y cuantitativos de localización que buscan dar respuesta a las necesidades de expansión, relocalización, o extensión de una o varias instalaciones y entre ellos se encuentra el método de ponderación de factores, que busca asignar pesos relativos y determinantes en la toma de decisiones, dejando a criterio del tomador de decisión esta preferencia, la cual es subjetiva y puede verse influenciada fuertemente por el criterio del evaluador. También existe el modelo de cobertura de conjuntos siendo su objetivo principal cubrir ciertas necesidades existentes al menor costo posible, la selección del método a emplear varía según el requerimiento o necesidad detectada, la recopilación de datos para el análisis, entre otros. (Carro Paz & González Gómez, 2004).

b. Método del centro de gravedad

Uno de los mejores métodos cuantitativos para la determinación de ubicación de instalaciones es el método del centro de gravedad, el cual tiene como objetivo minimizar el costo de transporte total; ya que entre mayor sea la demanda de un punto, más cerca de él se buscará la ubicación. Este modelo toma en cuenta también aquellos puntos en los que los costos unitarios de transporte son muy elevados, cada punto de demanda genera un acercamiento del almacén con una fuerza directamente proporcional. La mejor localización de un almacén, en este caso, sería cerca del centro de gravedad, pero se evalúan diversos factores que también inciden en la localización de su almacén, específicamente del sector de alimentos. La expresión analítica que nos ayuda a determinar la localización del nuevo Centro de Distribución que se requiere es la siguiente:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * R_i * X_i}{\sum_{i=1}^n V_i * R_i}$$

(1)

Ecuación No 1. Localización en coordenda x(longitud)

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * R_i * Y_i}{\sum_{i=1}^n V_i * R_i}$$

(2)

Ecuación No 2. Localización en coordenda y(latitud)

En donde,

x, y_i es la localización de coordenadas de los puntos a distribuir.

R_i : es el costo por unidad y por kilómetro entre la instalación y el cliente.

V_i : cantidad a ser enviada.(Ares, 2003)

Finalmente, se expresará la distancia entre la instalación y la localización como:

$$d_t = K \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}$$

(3)

Ecuación No 3. Minimización de distancias realizadas en el modelo.

En donde,

K representa el factor de escala de conversión de una unidad de un punto de coordenada a un punto de distancia más común.

$$\text{Min } CT = \sum_i^n V_i * R_i * D_i$$

(4)

Ecuación No 4. Minimización del costo total en el modelo.

Esto se resume en que las coordenadas del almacén serán cercanas con una proporcionalidad directa a la demanda de los puntos, esto es, la ubicación ideal de un centro de acopio es el centro de gravedad (Ares Marquina, 2003). Los costos de transporte se pueden relacionar de forma proporcional a la distancia de recolección y despacho de la mercancía, es por esto que se escoge el método de centro de gravedad, ya que toma en consideración dos de las variables más representativas en una red de distribución como lo son, la cantidad demandada por nuestros clientes y la distancia que surge para cumplir

con esta, al reducir estas distancias implícitamente estamos reduciendo los costos de transporte.

Las ecuaciones 1 y 2 nos indicaran cuáles serán las coordenadas óptimas para la localización de la nueva instalación de forma que se encuentre céntrica a la demanda a atender, ya que este método considera que esta cercanía minimiza los costos totales del transporte. Cada uno de los puntos de venta a distribuir cuentan con el mismo peso proporcional. La ecuación 3 es la relación de la distancia, este método es iterativo por lo que debe ser recalculado hasta que las coordenadas de la ecuación 1 y 2 no cambien significativamente en las iteraciones sucesivas.

Otros aspectos que se toman en cuenta en este trabajo al momento de tomar una decisión sobre la localización definida son factores ambientales, costos de construcción y terreno, disponibilidad de mano de obra, factores de transporte y servicio en la zona y riesgos políticos.

Metodología aplicada al caso de estudio

El presente trabajo contiene las siguientes fases metodológicas:

- Diagnóstico. Se identificaron los requerimientos e intereses del gerente logístico.
- Recolección. En esta fase se hizo la solicitud de información necesaria a la empresa de acuerdo con la problemática detectada.
- Investigación. En este caso, se realizó una búsqueda de información de utilidad y con finalidad de dar solución al problema empresarial.
- Análisis y Desarrollo. Dentro de esta etapa se procede con el análisis de la información recolectada y la ejecución del método del centro de gravedad.
- Resultados. Se identifican los resultados del método aplicado y se establecen conclusiones.

Es una empresa que se dedica principalmente a actividades de restaurantes y comida rápida, por lo que hoy en día administra más de 200 restaurantes en todo Colombia. Su principal centro de distribución se encuentra ubicado en Funza, Cundinamarca; en donde realizan un consolidado de mercancía en sinergia con otros Centros de Distribución ubicados en Chía, Cundinamarca. Entre sus mayores retos logísticos se encuentra la distribución de sus productos de acuerdo con un método de primero en expirar es el primero en salir, manteniendo control de la temperatura fría durante todos sus recorridos. El control de temperatura garantiza la calidad de los alimentos; se maneja despacho de producto refrigerado, congelado y seco. Las cámaras de productos congelados deben encontrarse a una temperatura entre -18°C y -4°C . La temperatura del producto refrigerado puede variar desde los -4°C hasta los 5°C .

El centro de distribución de Funza se encuentra ubicado en cercanías al producto principal como lo son los cárnicos y embutidos, el otro centro de distribución de la empresa se encuentra en Chia (19 Km de distancia) en cercanía de la planta de lácteos y sus derivados.

Actualmente, su red de distribución en el país llega hasta la isla de San Andres. Sin embargo, las condiciones del producto a su llegada no son las óptimas y se evidencia un incremento en el rechazo de estos. Es importante mencionar como el producto que se maneja es para el consumo humano cuando se detecta alguna condición que pueda llegar a afectar la calidad se tiene que desechar. Entre sus principales causas se encuentran las múltiples paradas que tiene que realizar un vehículo consolidado durante el recorrido y el cambio de mercancía desde un camión a un barco. Las zonas a las que se deben realizar despachos son:

- Regional Meta
- Regional Suroccidente
- Regional Valle
- Regional Antioquia
- Regional Boyacá
- Regional Santander
- Regional Costa
- Regional Cundisabana
- Regional Bogotá.

La empresa se encuentra en la búsqueda de la construcción de un nuevo Centro de Distribución que mitigue las pérdidas del producto, mejore los tiempos de entrega y las condiciones a cada una de las tiendas manteniendo la calidad de los alimentos y la cadena de frío de los mismos. Los locales a los cuales se debe distribuir los diferentes productos son en total 365 a cadenas que se componen de sus restaurantes y 720 institucionales que son clientes particulares que buscan comprar el producto en todo el territorio nacional y se encuentran distribuidos como se muestra en la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Número de locales de cadena a distribuir por región

Región	No. De cadenas
Antioquia	46
Bogotá	161
Boyacá	7
Costa	44
Meta	8
Sabana	20

Santander	13
Suroccidente	9
Valle	57
Total	365

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Número de locales institucionales a distribuir por región

Región	No. De particulares
Antioquia	17
Bogotá	412
Boyacá	27
Costa	58
Cundisabana	84
Meta	7
Santander	27
Suroccidente	36
Valle	52
Grand total	720

Fuente: Elaboración propia



Figura 1. Consolidación de la demanda por región

Fuente: Elaboración propia

El despacho histórico promedio a cada una de las regiones se muestra en resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Despacho promedio al mes

Región	Ton/Mes
Antioquia	45
Bogotá	362
Boyacá	26
Costa	72
Cundisabana	67
Meta	22
Santander	30
Suroccidente	33
Valle	78
Total	735

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la tabla 4 se pueden evidenciar los costos promedios de los fletes desde el Centro de Distribución hasta cada una de las regiones teniendo en cuenta las frecuencias de despacho a cada una de las zonas:

Tabla 4. Costo promedio de despacho al mes por región.(Mxn)

Región	\$ Prom/Mes
Antioquia	\$ 11,913.47
Bogotá	\$ 98,740.50
Boyacá	\$ 8,134.86
Costa	\$ 31,710.75
Cundisabana	\$ 18,275.18
Meta	\$ 2,823.96
Santander	\$ 13,482.36
Suroccidente	\$ 11,042.23
Valle	\$ 28,159.18
Total	\$ 224,282.49

Fuente: Elaboración propia

Resultados

A. Aplicación del método

La primera aproximación de la aplicación del modelo con los datos iniciales se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Coordenadas de los puntos de venta institucionales y de cadena

i	X_i	Y_i	$V_i * R_i$	$V_i * R_i * X_i$	$V_i * R_i * Y_i$
1	-74.01	5.02	0.55	-40.98	2.78
2	-74.00	5.02	0.55	-40.98	2.78
3	-74.00	5.03	0.55	-40.97	2.79
4	-74.00	5.02	0.55	-40.98	2.78
5	-74.00	5.02	0.55	-40.98	2.78
6	-74.00	5.02	0.55	-40.98	2.78
7	-73.99	5.03	0.55	-40.97	2.78
8	-74.00	5.03	0.55	-40.97	2.78
9	-74.00	5.02	0.55	-40.97	2.78
10	-73.96	4.94	0.55	-40.95	2.73
...
1080	-75.42	6.12	0.63	-71.70	5.82
1081	-75.60	6.16	0.63	-71.88	5.86
1082	-75.57	6.20	0.63	-71.85	5.90
1083	-75.57	6.18	0.63	-71.84	5.88
1084	-75.59	6.18	0.63	-71.87	5.87
1085	-72.62	11.13	0.55	-69.32	10.63
		Σ	1117.25	-83389.9	6943.15

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se puede inferir que los resultados de la aproximación inicial muestran un total de \$188,060.87 MXN en los costos del transporte, que es el valor que nos permite realizar la comparación de la situación inicial con las mejoras al aplicar el método de Centro de Gravedad de forma iterativa, dando como resultado un 16% menos que el costo total inicial mostrado en la tabla 4.

B. Resultados obtenidos

En la ejecución del método del centro de gravedad con la información recolectada de la industria de alimentos, aplicando las ecuaciones 1 y 2 del apartado II-A se generó como resultado que la localización adecuada se encuentra en las coordenadas:

$y=6.214497447$, $x=-74.63859246$



Figura 2. Ubicación de las coordenadas generadas en el desarrollo del método del centro de gravedad.

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un mapeo de las coordenadas de los 1085 establecimientos en la gráfica junto con el punto obtenido en el método, en donde visualmente se puede evidenciar que el resultado para la nueva instalación realmente se encuentra en centro de nuestra demanda (Figura 3).

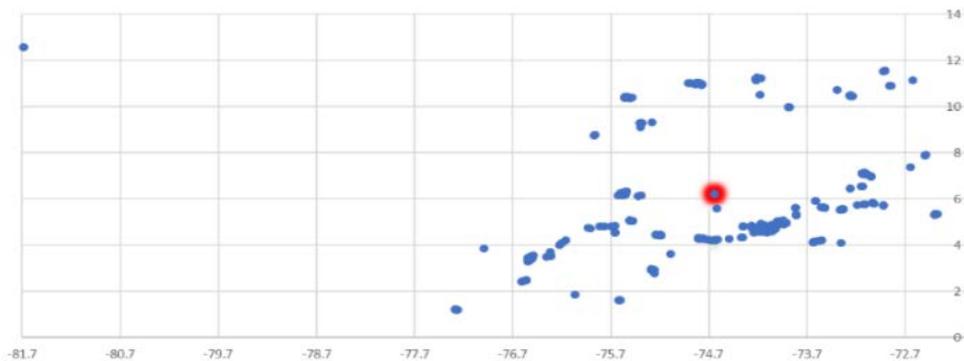


Figura 3. Distribución de los puntos de venta a atender y coordenadas resultantes del método.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6 se resumen algunas características identificadas en las cercanías de las coordenadas resultantes.

Tabla 6. Comparación de posibles localizaciones del centro de distribución

	PUERTO BERRIO	GIRARDOTA
ECONÓMICO	Bodegas aisladas en renta, principales sectores: agricultura, minería e industria maderera. Zona urbana: 87.3%, acceso por carretera, fluvial y aérea.	Centros logísticos con bodegas construidas para renta. Mayor accesibilidad a diferentes medios de transporte. Principales sectores: agricultura, ganadería y manufactura.
POBLACIÓN	39,314	51,662
TEMPERATURA PROMEDIO (°C)	27.8	22
TIEMPO DE RECORRIDO AL PUNTO * Y A MEDELLIN.	3 h 12 m 3 h 52 m	5 h 25 m 30 m

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Se obtiene que; por disponibilidad de espacios, redes de distribución, conocimientos del mercado, temas legislativos en las zonas, aspectos culturales, económicos, de seguridad, de disponibilidad de servicios y de demanda se selecciona la zona de Girardota. Las industrias de alimentos deben hacer sus cadenas de abastecimiento cada día más eficientes, dada la importancia del consumo de estos antes de su fecha de caducidad. Es por esto esencial considerar estrategias de localización de instalaciones cuando la demanda y las características del producto a distribuir así lo requiere. Sin embargo, es importante considerar aspectos cualitativos y cuantitativos en este tipo de decisiones.

Se evidencia que la aplicación de un método cuantitativo no es definitiva en la toma de decisiones. Sin embargo, apoya considerablemente a los tomadores de decisiones para la localización de la nueva instalación. Aspectos ambientales y de infraestructura limitan la construcción en las coordenadas obtenidas por su cercanía a un parque ecológico, debido a ello se propone una ubicación cerca de la obtenida que cumple con estas restricciones. Los costos de construcción y terreno varían según el municipio de ubicación,

los permisos y licencias requeridas para la industrialización de la zona. La disponibilidad de mano de obra se considera también como un factor esencial para la operabilidad del centro de distribución; debido a lo anterior se seleccionan diferentes ubicaciones que mejoran las condiciones de los factores mencionados, respetando cercanía a las coordenadas optimas obtenidas. Estas nuevas ubicaciones cuentan con acceso a servicios públicos, además de que la mano de obra en el lugar, así como la infraestructura vial tiene una mayor ventaja en la ubicación de Girardota.

En un primer análisis grafico de la ubicación de los 1085 puntos a los cuales se le distribuye a nivel nacional desde el Centro de Distribución actual ubicado en la ciudad de Bogotá podría pensarse en la zona Costa, ya que es la zona más alejada de Bogotá y aquella con los mayores tiempos de desplazamiento (Incluyendo el marítimo) detectado inicialmente como un factor crítico. Dado el resultado obtenido por el estudio se establece que la demanda que se despacha a esta zona no es suficientemente representativa para tomar tal decisión. Sin embargo, la cantidad de producto rechazado actualmente es de aproximadamente \$63,100 MXN (pesos mexicanos) cada dos semanas. Dado lo anterior se estima una reducción aproximada del 65% de los costos actuales por el manejo del producto, ya que en este nuevo centro de distribución se puede detectar el producto que tiene problemas de calidad desde Bogotá, además de considerar el tiempo en tránsito que los productos requieren para llegar a la isla en condiciones de calidad adecuadas.

El Centro de Distribución propuesto es en el municipio de Girardota, ya que en términos económicos, políticos, demográficos y de seguridad hacen de esta la mejor zona de localización. Con esta nueva instalación se reducirán los tiempos de desplazamiento a los puntos de venta; incrementando el nivel de servicio.

Teniendo en cuenta este nuevo escenario, en donde el Centro de Distribución para la consolidación y despacho de Cárnicos y lácteos se encontrará en Girardota, se sugiere considerar el inicial Centro de Distribución de Bogotá para el abastecimiento a clientes en zonas Meta, Sucre, Cundisabana, Bogotá y Boyacá. El Centro de Distribución nuevo se recomienda para abastecimiento de las regiones Valle, Antioquia, Santander y Costa.

El desarrollo de este trabajo muestra la aplicación de métodos cuantitativos como apoyo a todos aquellos tomadores de decisiones en la selección de la ubicación de nuevas instalaciones.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Puerto Nare.
Ares, F. (2003). Capítulo 5 : Modelo de Localización. Localización Final. 16.

- Ares Marquina, F. (2003). Análisis y business plan de una empresa de transporte de mercancías destinada al reparto a grandes superficies y plataformas asociadas. Carro, R., Gonzáles, D., Administración de las operaciones, localización de instalaciones, Universidad Nacional de Mar de Plata.
- CHAIN SAPAG N; CHAIN SAPAG R. 1996. Preparación y Evaluación de Proyectos. 3º edición. Editorial McGraw-Hill.
- Chávez Chicas, Blanca Morena; Najarro Martinez, Jenniffer Berenke; Rivas González, D. O. (2009). Análisis, Diseño e Implementación de un Centro de Distribución". Universidad Dr. José Matías Delgado.
- Correa, J., & Hernández, R. (2004). Localización de Instalaciones. Enfoque Cuantitativo. *Conciencia Tecnológica*, 26
- Henzer & Render, (2004) Principios de administración de operaciones. Pearson Educación.
- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3), pp. 423–447.
- Sendra, j, Maass,s. (1995). Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones.
- Schemenner, R.W. Making Business Location Decisions. Englewood Clifs. N.J. Prentice Hall. 1982.
- Suárez, R. (2001). Conservación de alimentos por frio. *Invenio*, 4(6), 85–124. S
- Validi, S., Bhattacharya, A., & Byrne, P. J. (2014). A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system-A multi-objective approach. *International Journal of Production Economics*, 152, pp. 71–87.

CADENAS DE SUMINISTRO INVERSA

Plataforma tecnológica para la gestión de bahías de carga/descarga en zonas urbanas

Bernardo Hernández Sánchez, Marisol Barrón Bastida ,
Miguel Gastón Cedillo Campos y Cesar J. Montiel Moctezuma
Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística
Instituto Mexicano del Transporte, IMT

Resumen— *El presente estudio propone una plataforma tecnológica basada en software libre, y uso de dispositivos electrónicos con tecnología de baja potencia y largo alcance IoT (Internet de las Cosas). La propuesta incluye la implementación de una aplicación web para la gestión de espacios públicos en zonas urbanas (bahías de carga/descarga para vehículos). Particularmente se aborda un caso de estudio, el cual toma como base lo desarrollado previamente por (Cedillo-Campos y Fransoo, 2019; Fransoo y Cedillo-Campos, 2022), cuyos resultados revelaron que la disponibilidad de espacios de carga/descarga en áreas de alta densidad de puntos de entrega de mercancías, impulsa una mayor eficiencia en las rutas, así como un menor tiempo de estacionamiento y un menor impacto en ruido y contaminación para las ciudades. Se propone un enfoque técnico y centralizado, para organizar elementos tecnológicos en una red de área amplia de baja potencia, con flujo de datos en tiempo real.*

Palabras Clave: Internet de las Cosas; Sensores; Tecnología; Logística urbana; Transporte

Introducción

El Internet de las Cosas o “Internet of Things” (IoT) es uno de los pilares fundamentales de la Revolución 4.0 y la Transformación Digital (Adita Gaur, 2015). En este documento se presentan los primeros resultados del desarrollo de una plataforma tecnológica (aplicación web) basada en software libre y uso de dispositivos con tecnología de baja potencia y largo alcance IoT (Internet de las Cosas). Dicha plataforma, pretende ser una base inicial que favorezca el desarrollo de aplicaciones en IoT a favor de la gestión de la infraestructura urbana en México. Desde esta perspectiva, resulta particularmente importante comprender el panorama general del desarrollo que ha tenido la tecnología IoT. Sobre esto, Microsoft e Hypothesis Group, en su reporte “IoT Signals Edition” (Group, 2021), realizó una encuesta a más de 3000 responsables de la toma de decisiones en

empresas de EE. UU., Reino Unido, Alemania, Francia, China y Japón que participaban en proyectos dentro del ámbito del Internet de las Cosas. Esta investigación global incluyó a responsables de la toma de decisiones empresariales, responsables de la toma de decisiones en TI y desarrolladores de una variedad de industrias, como fabricación, venta minorista/mayorista, petróleo, gas, atención médica, entre otros. En la Figura 1 se muestra que del 90% de las organizaciones que se identifican como adoptantes de IoT, el 82% tiene al menos un proyecto en etapa de uso, similar al año pasado con el 83%.

Los porcentajes de proyectos en cada fase también se mantienen altos. Se observa en la Figura 1 que, en 2021, el 29% de los proyectos de IoT están en la etapa de aprendizaje, el mismo porcentaje que en 2020. El porcentaje de proyectos en la etapa de prueba/PoC también permanece igual: 25 % en 2020 y 2021. Los proyectos en la fase de compra han aumentado en un 1%, pasando del 21% en 2020 al 22% en 2021. Los proyectos en fase de uso se mantienen estables en un 25% en 2020 y 2021:

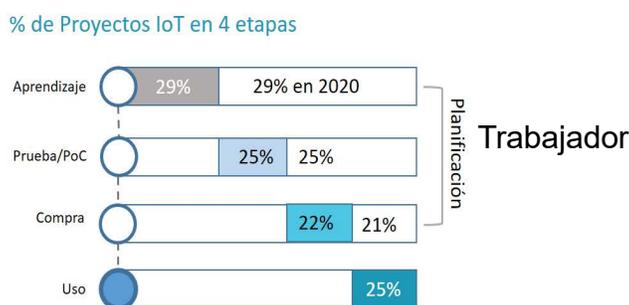


Figura 1. Proporción de proyectos IoT en cuatro etapas.
 Fuente, Reporte IoT Signals Edición 3 con datos de octubre 2021.
 Microsoft Hypothesis Group

De acuerdo con el estudio de Hypothesis Group, el IoT se encuentra ampliamente adoptado a nivel mundial. En cuanto al porcentaje de proyectos en fase de uso, EE. UU. lidera el grupo, con un 27% en comparación con países como España (22%) y Australia (18%). EE. UU. también está por delante del juego global en términos del aumento del uso de IoT: el 78% de las organizaciones de EE. UU. planea usar más IoT en los próximos dos años. En contraste, solo el 53% de las empresas alemanas encuestadas planearon aumentar su uso para 2023, y con el 51% las organizaciones en Japón. Esto puede deberse a que los mercados alemán y japonés podrían ser más cautelosos en su enfoque de la tecnología.

Es probable que los proyectos en la región de Asia-Pacífico lleven más tiempo porque se necesita más educación y conocimiento sobre IoT para poder usarlo. Las organizaciones

en APAC también enfrentan desafíos más frecuentes al no tener los recursos para implementar y administrar soluciones de IoT. En la Figura 2, se muestran los porcentajes de adopción del IoT de algunos países a nivel mundial.

	Global	Estados Unidos	Reino Unido	Francia	Alemania	España	Italia	Benelux	China	Japón	Australia
% de adopción IoT	90%	94%	91%	91%	88%	89%	95%	91%	85%	88%	96%
% Proyectos en fase de uso	25%	27%	25%	23%	25%	22%	26%	25%	25%	23%	18%
Tiempo de espera para llegar a la fase de uso	12	11	13	12	14	11	10	12	16	12	16
Planean usar IoT en proyectos de más de dos años	66%	78%	69%	67%	53%	76%	69%	59%	65%	51%	56%

Figura 2. Adopción del IoT por país

Fuente: Elaboración propia con base en el Reporte IoT Signals Edición 3 con datos de octubre 2021. Microsoft Hypothesis Group

Otro importante estudio a mencionar es el desarrollado en México por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), titulado: “Análisis exploratorio de la comercialización de servicios de conectividad para IoT” ((IFT), 2019). Este informe fue elaborado con base en información estadística obtenida mediante técnicas de ciencia de datos, que van desde el análisis exploratorio, hasta la automatización de consultas a sitios web para la sistematización y elaboración de bases de datos, permitiendo identificar patrones de comercialización entre los proveedores de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) a nivel mundial.

En la Figura 3 se muestra la distribución total de proyectos IoT en el mundo, por número de dispositivos conectados. Se trata de 102 proyectos, que se encuentran en 31 países, entre los cuales destaca Estados Unidos que contabiliza 33 proyectos; Inglaterra 15; Canadá, Francia y España con 5. Los países latinoamericanos que cuentan con algún proyecto que requiera necesidades de conectividad para un número alto de dispositivos conectados son: Argentina (Solución para ciudad inteligente con sistema de gestión de 15,000 luces de tráfico con tecnología LED) y Colombia (distribución de energía eléctrica).



Figura 3. Distribución total de proyectos IoT en el mundo, por número de dispositivos conectados.

Fuente: IFT con datos de Global Data (2019), IoT Deployment Database. Disponible en: <https://www.globaldata.com/>.

Para el caso de México, se encuentran documentados 14 proyectos de IoT. El proyecto más grande se refiere al despliegue de un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) para el control y monitoreo de agua en Saltillo Coahuila ((IFT), 2019), proyecto que implica conectar entre 5,000 y 9,999 dispositivos.

El segundo proyecto con el mayor número de dispositivos conectados corresponde a la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Este tiene como objetivo proporcionar comunicación M2M para aplicaciones de Smart Grid con un intervalo de dispositivos conectados de entre 1,000 y 2,499; este rango representa el 4.97% de los sensores que se están desplegando a nivel mundial .

Por otra parte, los foros tecnológicos y organismos de estandarización han enfocado la evolución hacia soluciones con dispositivos de muy baja potencia, sobre todo, centrados en el aprovisionamiento de redes de malla. Esto pone de relieve cuatro requisitos principales para el despliegue masivo de servicios de IoT (ONU, 2020):

- *Bajo costo de dispositivos:* debido a que es más fácil crear dispositivos con menor complejidad, el costo de los dispositivos es significativamente bajo, alrededor de \$5 USD por módulo.
- *Bajo consumo de energía:* no necesita ejecutar un sistema operativo o realizar mucho procesamiento de señales, por lo tanto, es más eficiente en términos de energía en comparación con otras tecnologías.
- *Escalabilidad,* teniendo en cuenta el alto número de dispositivos que entrarán en juego en los despliegues de los escenarios “ultra-densos” y el crecimiento exponencial de los dispositivos.
- *Cobertura y conectividad ubicuas:* admiten una gran cantidad de dispositivos que

pueden conectarse a miles de millones de nodos. Diseñado para una cobertura extendida en interiores. La menor complejidad de los dispositivos proporciona conectividad y comunicación de largo alcance.

En el contexto anterior, la originalidad de este artículo estriba en la propuesta del desarrollo de una herramienta de gestión basada en software libre y dispositivos IoT, que mejore la fluidez en el movimiento “puerta a puerta” de las mercancías distribuidas en zona urbana.

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: En la Sección II se describen los antecedentes que dieron origen al proyecto tecnológico IoT, con aplicación en la gestión de bahías de carga/descarga en áreas urbanas de alta densidad de puntos de entrega. En la Sección III se describe el modelo arquitectónico general, como base del desarrollo de la plataforma tecnológica de gestión. En la Sección IV se describe la aplicación a nivel del servidor y la tecnología de microservicios y la lógica del negocio. En la Sección V se describe las funciones del usuario (monitorista y administrador) de la aplicación y sus funcionalidades. Finalmente, en la sección VI se exponen las conclusiones.

Antecedentes

Durante el periodo 2021-2022 el equipo investigador del Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística, trabajó en un proyecto denominado “Plataforma tecnológica para la gestión de bahías de carga y descarga de mercancías en espacios públicos” (Hernández-Sánchez, 2021), del cual, se obtuvo como resultado, una aplicación web para la gestión de espacios públicos en zonas urbanas (bahías de estacionamiento). Por otra parte, derivado de los resultados obtenidos con la implementación del Primer Laboratorio de Logística Urbana en Tiempo Real de América Latina (LogistiX-Lab), diseñado e implementado por Cedillo-Campos y Fransoo (2019), surgió el interés del proyecto de organizaciones como:

- a) Agencia de Cooperación Internacional para el Desarrollo del Gobierno Alemán (GIZ);
- b) UK aid;
- c) Embajada del Reino de los Países Bajos;
- d) Empresas con operaciones de distribución en México; y
- e) Municipios del país

Dichas organizaciones solicitaron al IMT el diseño de un sistema que favoreciera la óptima gestión de bahías de carga y descarga de mercancías en espacios públicos.

De acuerdo con Cedillo-Campos y Fransoo (2019) y Fransoo y Cedillo-Campos (2022), los resultados del LogistiX-Lab revelaron que la disponibilidad de espacios de carga/descarga en áreas de alta densidad de puntos de entrega, impulsa una mayor eficiencia en las rutas, así como un menor tiempo de estacionamiento y un menor impacto en ruido

y contaminación para las ciudades. Pero no sólo eso, también permite disminuir costos logísticos de las cadenas de suministro inter-urbanas, con lo cual, los impactos económicos van mucho más allá de las zonas urbanas. Por lo tanto, se puede decir que mejorar la gestión de las áreas de carga y descarga en zona urbana, tiene un impacto positivo multi-dimensional mejorando la confiabilidad de las cadenas de suministro desde una perspectiva integrada “puerta a puerta”.

En ese sentido, después de una amplia revisión, se identificaron áreas potenciales de desarrollo para la creación de una nueva aplicación tecnológica no existente en el mercado latinoamericano.

Modelo funcional

En una primera fase se desarrolló el modelo de arquitectura general y un conjunto de pruebas funcionales que permitieron sentar las bases para el desarrollo de la plataforma de gestión.

Arquitectura general

En la propuesta presentada en este documento se usó un modelo de referencia de cuatro capas arrojando la capa de percepción, donde los sensores obtienen los datos, hasta la capa de análisis que utiliza diversas técnicas y tecnologías para la analítica de datos (Chen, Xu, Liu, Hu, & Wang, 2014), y una capa final del modelo de visualización, que permite presentar de manera gráfica la información histórica y en tiempo real. A continuación, se da una breve descripción (Kamal, 2017).

Capa de percepción: Es la capa sensorial de IoT donde “las cosas” identifican sus alrededores y recaban información del mundo físico. Los sensores, actuadores y otros dispositivos inteligentes, capturan datos (sensores) y con estos, toman medidas (actuadores).
Capa de red: Su función principal es transmitir y procesar la información obtenida por la capa de percepción. Así mismo, es responsable de interconectar otras redes de dispositivos inteligentes, elementos de red y servidores. Comprende los dispositivos de red y los protocolos de comunicación.

Capa de datos: Capa responsable de entregar servicios y aplicaciones específicas al usuario final. Proporciona una gestión global de la aplicación basada en la información de los objetos procesados en la capa de Middleware.

Capa de visualización: Esta capa comprende el análisis y visualización. El enfoque de ésta es analizar los datos abastecidos por el IoT y proporcionarlos a los usuarios y aplicaciones para que adquieran sentido.

En la figura 4 se muestra el modelo de la arquitectura general descrito anteriormente.

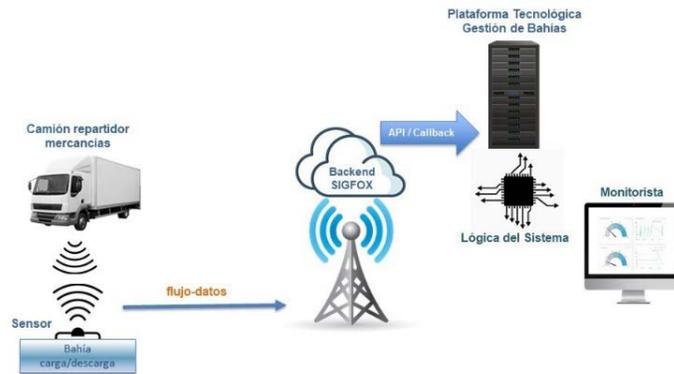


Figura 4. Arquitectura general.

Fuente: elaboración propia, basada en arquitectura de referencia de cuatro capas IoT.

Sensorizado

Uno de los dispositivos utilizados en la instrumentación de la bahía (que tiene como función principal la de monitorización del estado de ocupación de la bahía) es el IoT Park (de IoT Solutions, Ltd). Este dispositivo realiza la detección de los estados (libre u ocupado) haciendo uso de un sensor ferromagnético integrado en el dispositivo. Permite detectar la presencia de una masa metálica y transmite el dato en tiempo real al sistema.

En la figura 5 se muestra el sensor utilizado en el proyecto.



Figura 5. Dispositivo IoT Pak con sensor ferromagnético y acelerómetro
Fuente: Fotografía propia, basada en la tecnología de IoT Solutions 2021.

Otro dispositivo que complementa la capa de percepción del sistema, es una baliza con la característica de tecnología Bluetooth de baja energía. Este dispositivo se usó como elemento de identificación en el sistema, donde cada uno tiene un ID único y se parametriza de acuerdo a la empresa que lo porta. En la figura 6 se muestra el aspecto físico de la baliza.



blueup

Figura 6. Baliza con tecnología Bluetooth
Fuente: blueupbeacons.com (2022).

Red de área amplia

Para lograr la transmisión de la telemetría de los sensores (IoT Sigpark), se instaló una antena omnidireccional PROCOM CXL900-3LW, estación base Sigfox SBT-T3-902 con rango de frecuencia RCZ 902 MHz y un micro canal de 100Khz. En la figura 7 se ilustra la antena instalada en las instalaciones del IMT Qro.



Figura 7. Antena PROCOM CXL900-3LW
Fuente: propia

Aplicación del lado del servidor

El desarrollo de la aplicación para la gestión de las bahías de carga y descarga, se dividió en dos partes. En primera instancia se planteo la lógica de negocio, es decir, las funcionalidades elementales del sistema para la gestión de la información (Hernández-Sánchez, 2021). Y segundo, se enfocó en el desarrollo de la aplicación web donde el usuario final podría interactuar con los sensores, sus configuraciones y un panel de control. En éste último se puede visualizar información relevante del sistema, desde indicadores de desempeño de los sensores, incluyendo alertas y errores en la infraestructura, hasta datos representativos de las bahías correspondientes (R., 2017), históricos, estado actual, fe-

cha y hora de eventos, así como otros indicadores que describen las operaciones habituales. En la figura 8 se muestra el diagrama de conectividad IoT (SigFox, 2022).



Figura 8. Diagrama de conectividad IoT
Fuente: elaboración propia

Lógica del negocio

La arquitectura de desarrollo de la lógica de negocio se basó en el paradigma de microservicios (Atlassian, 2022). Esta arquitectura se utilizó debido a la sencillez de su implementación, escalabilidad, independencia en las funcionalidades y mejora en el rendimiento para la respuesta del servidor a las peticiones externas.

En este sentido, se puede decir que es una solución eficiente para realizar cambios de manera ágil al sistema y poder personalizarlo de acuerdo a las necesidades de cada proyecto que desee trabajar con éste, además ofrece una estrategia de compatibilidad para la comunicación entre diferentes tecnologías, lo cual abre las oportunidades de implementación y colaboración con otros proyectos similares. En la figura 9 se puede observar el diagrama de la comunicación interna de los microservicios para este proyecto.

Por otro lado, dentro del servidor se separó el sistema en una red privada y pública. En la primera se encuentra cada uno de los microservicios desarrollados. Para los resultados de esta investigación solo se incluyen tres microservicios y una base de datos asociada a cada uno de estos:

- La gestión de los usuarios que se conectarán a la aplicación, contemplando la autenticación y la seguridad para los diferentes tipos de usuarios;
- La recolección y tratamiento de los datos obtenidos de los sensores de IoT, así como las balizas que interactúan con el sistema. Existen un gran número de eventos generados por cada tipo de sensor dependiendo de la actividad que se ejecuta.
- Un tercer microservicio se encarga del análisis de los datos y la generación de indicadores, reportes e históricos de cada dispositivo que interactúa con una bahía. También se incluyen las configuraciones específicas por bahía, usuario (empresa) y estado en el que se encuentran.

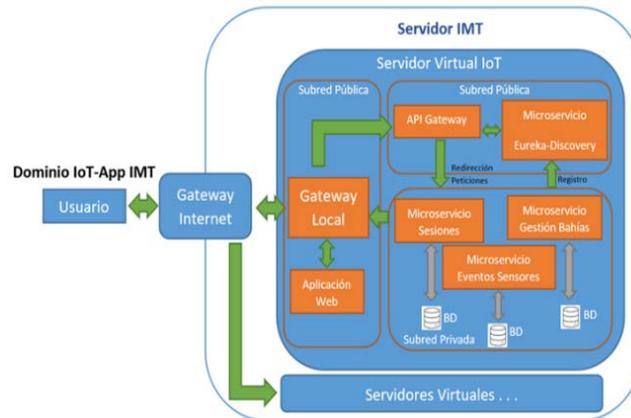


Figura 9. Arquitectura del servidor
Fuente: elaboración propia.

En la red pública se encuentra la aplicación web que se presenta al usuario, y con la cual podrán interactuar. Dicha aplicación se explica con más detalle en la siguiente sección. También se tienen dos microservicios que se encargan de gestionar la lógica de negocio: el primero es el encargado de redirigir las peticiones al microservicio correspondiente, y el otro se encarga de mantener una lista activa de los microservicios existentes en el sistema, en el caso de que se actualicen los servicios de la red privada y se desarrollen nuevos o se eliminen los existentes, este micro servicio se encargará de mantener actualizada la información para el uso correspondiente de los usuarios finales.

Existen dos maneras de acceder como usuario final a la información: i) la primera es a través del consumo de las API's de cada uno de los microservicios; y ii) la segunda opción es con el uso de la aplicación web.

Acceso a microservicios

Para la manipulación de la información en el sistema se usa un conjunto de API's desarrolladas con el estilo RESTful. Una API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) es un conjunto de definiciones y protocolos que se utilizan para el diseño e integración de las aplicaciones. Por su parte, los servicios web RESTful son servicios web basados en la arquitectura REST. Dicha arquitectura es una metodología de solicitud de recursos que se entrega a través de peticiones HTTP con formatos definidos: JSON, XML o texto sin formato. El formato utilizado para este proyecto es JSON.

Los servicios web RESTful tienen características particulares que los diferencian de otras arquitecturas de aplicaciones web, estas son: a) contienen operaciones básicas para listar, crear, leer, actualizar y borrar; b) cada operación requiere de los métodos URI y HTTP; c) en el URI se incluye un sustantivo con el nombre del recurso, y d) el método HTTP identifica el verbo a realizar de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1. Operaciones RESTful

Operación	Método http	URI	Parámetros	Resultado
Listar	GET	/{recurso}	No aplica	Lista el tipo de recurso
Crear	POST	/{recurso}	Body	Se crea un nuevo recurso
Leer	GET	/{recurso}/{id}	No aplica	Recurso dependiendo del id
Actualizar	PUT	/{recurso}/{id}	A través de una cadena de consulta	Se actualiza el recurso
Borrar	DELETE	/{recurso}/{id}	No aplica	Se elimina el recurso

Fuente: elaboración propia.

Para este proyecto se utilizaron solo los métodos GET y POST, con ajustes para que el método POST pudiera realizar las operaciones de Actualizar y Borrar. En las Figuras 10 y 11 se pueden observar ejemplos de cómo interactúan estas operaciones.

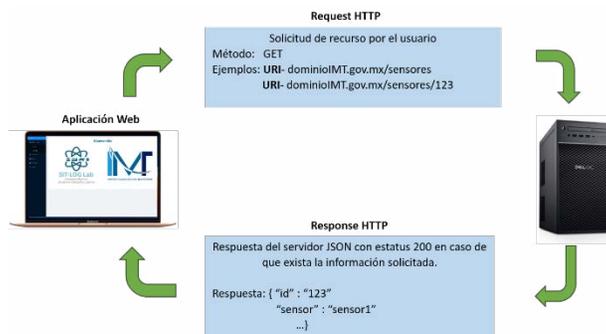


Figura 10. Servicio Web para una solicitud GET
Fuente: elaboración propia.

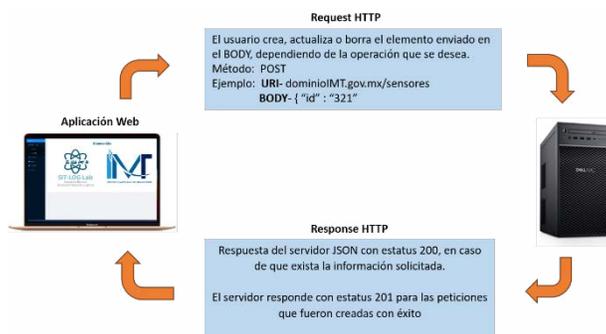


Figura 11. Servicio web para una solicitud POST
Fuente: elaboración propia.

Desarrollo de la aplicación frontal

El desarrollo de la aplicación web se basó en el uso de tecnología bajo los principios de software libre, estándares abiertos y de código abierto. En este sentido, las herramientas de desarrollo utilizadas fueron:

La biblioteca basada en Javascript: ReactJS, la cual, al estar enfocada a la visualización, facilitó la creación de componentes interactivos y reutilizables durante el desarrollo de las interfaces.

La biblioteca “React UI antd” para crear de manera interactiva las interfaces de usuario se eligieron diversos componentes como tablas, gráficas, tarjetas, entre otros. Uso del proveedor de mapas “Mapbox” para mostrar la ubicación y comportamiento de las bahías en la aplicación web. En la figura 12 se muestra los logotipos referentes a dichas tecnologías.

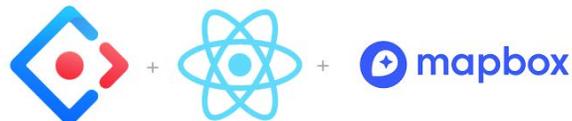


Figura 12. Logotipos de las tecnologías de desarrollo
Fuente: extraídas de su sitio web.

Solicitudes HTTP de React a la API

El código de la aplicación web consiste en una serie de solicitudes tipo GET hacia la API usando el método Fetch con React hooks. Esto permitió separar el código de programación en varios componentes para construir la aplicación, y con ello, agilizar las solicitudes a la API.

En la figura 13 se muestra el código de un componente para la obtención de los eventos de cada sensor. El resto de los componentes desarrollados son similares al mostrado en la imagen, solo varía el conjunto de información obtenida desde la API.

```
useEffect(() => {  
  async function component() {  
    await fetch("http://localhost/IoT/evento?operacion=distintostatus")  
      .then(response => {  
        if (!response.ok) {  
          throw new Error("HTTP error: ${response.status}");  
        }  
        return response.json();  
      })  
      .then(json => {  
        setDataOperacion(json);  
      })  
      .catch(error => {  
        console.error("El servidor no responde: ${error}");  
      });  
  }  
});
```

Figura 13. Codificación de un componente en React
Fuente: elaboración propia

Una vez que se obtuvieron los eventos de los sensores, se dividieron en dos grupos: operación y alarmas. El primero hace referencia a los eventos: libre y ocupado de un usuario válido. Caso contrario sucede en las notificaciones de alarmas, donde la bahía está siendo ocupada por alguien que no se reconoce válido.

Los datos relevantes a mostrar de los dispositivos fueron la fecha y hora en que se detonó el evento, así como el nombre de la bahía y su evento en cuestión.

Otra petición que resultó importante obtener de la API fue la consulta de los datos históricos de los dispositivos acumulados desde el día en que se dieron de alta los sensores en la base de datos. Por ejemplo, el nombre de la bahía, y la fecha y hora de inicio y fin del incidente ocurrido.

A partir de esta información se programó un componente que permitió agrupar las bahías existentes. Además, se calculó un conteo por tipo de incidente y su proporción. En la figura 14 se muestra parte del código de este proceso.

```
async function fetchDataJSON() {
  await fetch('http://localhost/IoT/historico', { method: 'GET' })
    .then(response => {
      if (!response.ok) {
        throw new Error('HTTP error: ${response.status}');
      }
      return response.json();
    })
    .then(json => {
      dataGrafica.push(json);
      function groupBy(list, keyGetter) {
        const map = new Map();
        list.forEach(item => {
          const key = keyGetter(item);
          if (!map.has(key)) {
            map.set(key, [item]);
          } else {
            map.get(key).push(item);
          }
        });
        return map;
      }
      const agruparPorBahias = groupBy(json, data => data.bahia);
      const Bahia = {
        nombre: '',
        incidentes: [],
        init: function (nombre, listaIncidentes) {
          this.nombre = nombre;
          this.incidentes = listaIncidentes;
        },
        setNombre: function (nombre) {
          this.nombre = nombre;
        },
        getPromedioPorIncidente: function (incidente) {
          var sum = 0;
          this.incidentes.get(incidente).forEach(value => {
            sum = sum + value.tiempo;
          });
          return sum / this.getConteoTotal(incidente);
        },
        getConteoPorIncidente: function (incidente) {
          return this.incidentes.get(incidente).length;
        },
        getConteoTotal: function () {

```

Figura 14. Codificación del componente de consulta de datos históricos
Fuente: elaboración propia.

Análisis de resultados

107

El resultado obtenido fue el desarrollo de una aplicación web con las funcionalidades descritas a continuación.

En la figura 15 se muestra la vista de inicio de la aplicación web. Se observa un menú en la parte lateral izquierda con la zona de estudio ubicada en el Instituto Mexicano del Transporte en la ciudad de Querétaro. Esta zona incluye las opciones de operación de todas las bahías y su analítica.



Figura 15. Vista inicial de la aplicación web
Fuente: elaboración propia

En la figura 16 se muestra la operación de las dos bahías de prueba. En la parte superior izquierda se encuentra una tabla de “Alarmas”, donde se cargarán los eventos que requieren una pronta atención, es decir, se podrá visualizar aquellos usuarios “no identificados” que estacionen su vehículo en alguna de las bahías.

En la tabla identificada como “Operación” se muestran los eventos que son considerados como acciones normales, estas son el evento “libre” y usuario “validado”. Posteriormente, en la parte media se muestran ambas bahías. Dependiendo del evento que se encuentre activo, se mostrará con un color diferente, por ejemplo, libre en verde, ocupado en naranja, validado amarillo y no identificado como rojo.

También se aprecia un mapa con la ubicación de las bahías y su color que cambia dependiendo del evento. La tabla de “Historial” carga los registros por evento de las bahías, la fecha inicio y fin en que se detonó el evento y su duración.

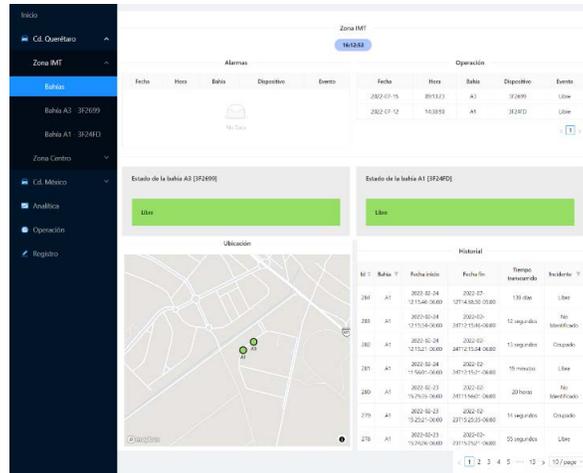


Figura 16. Vista de todas las bahías
Fuente: elaboración propia

En la figura 17 se muestra de manera individual cómo opera una de las bahías. En este caso el estado de la bahía se encuentra libre y se observa la fecha y hora en que sucedió el evento. De igual forma, se apoya su visualización con la identificación de colores por evento.

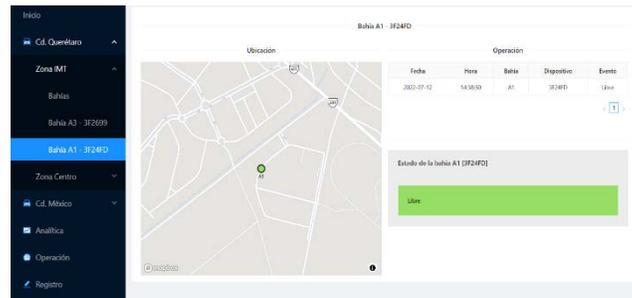


Figura 17. Vista por bahía
Fuente: elaboración propia

Para finalizar, en la figura 18 se muestra la sección de “Análisis” de la operación de las bahías. Se considera que esta vista puede ser útil para los tomadores de decisiones, ya que con la información que se presenta, pueden conocer el conteo de eventos y su proporción. Por ejemplo, en la bahía A1 han sucedido 54 eventos como “Libre” 10 como “Validado” y 15 “Incidencias”.

Con el apoyo de los gráficos que se muestran en la parte de abajo, se deduce que la bahía A1 es la que al momento ha tenido más incidencias.

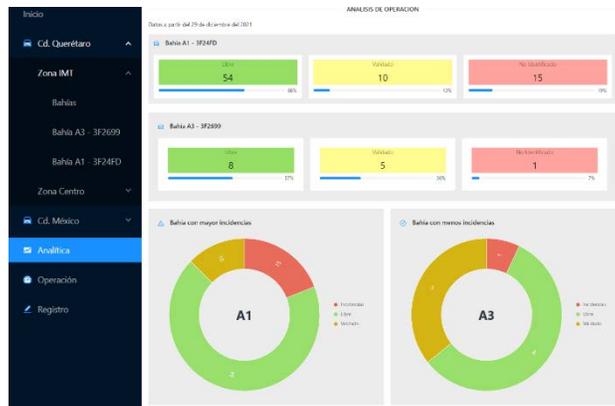


Figura 18. Vista de la sección de “Análisis”
Fuente: elaboración propia

Es importante mencionar que este tipo de tecnología favoreció el desarrollo ágil y rápido del producto final. Por ello, se pretende agregar más zonas de estudio y con ello, seguir alimentando su operación. Los datos recabados y otras variables quizás no consideradas continuarán enriqueciendo el análisis, interpretación y presentación de la información.

Conclusiones

Se observó que el uso de la tecnología IoT aportó diversas ventajas para la elaboración de la solución aquí expuesta. Por un lado, las métricas obtenidas al ser utilizadas en tiempo real, favorecen la mejora de la operación logística, pero también la gestión de la infraestructura. Por otro lado, la adecuada programación de los dispositivos permite que estos tengan un ahorro energético, por lo tanto, los dispositivos pueden operar por varios años y, en consecuencia, su costo se prorratea, dando como resultado una solución viable.

Asimismo, al aprovechar el gran potencial que tiene el uso de software libre, se redujeron los costos de desarrollo. Desde la base datos, el API y la aplicación, web fueron desarrollados bajo el esquema de bibliotecas de código abierto, que son mantenidas por grandes compañías y la comunidad de software libre.

Finalmente, se comprobó que la automatización en la operación de la infraestructura es posible de una forma efectiva y confiable. Contar con este tipo de herramientas para ordenar el uso de bahías de carga y descarga (Adita Gaur, 2015), permitirá en un futuro, controlar los tiempos de operación. Además, se puede obtener una visión global de lo que sucede, desde que llega un vehículo (al espacio de estacionamiento), el tiempo que dura en él y cuándo se va.

Debido a que no existe intervención humana, se reduce la posibilidad de falla, pero, ade-

más, provee en tiempo real, información tanto a la dirección logística de las empresas, como a los gobiernos, con lo cual, estos últimos tienen información para ejercer el cumplimiento de los reglamentos de tránsito, gestionar mejor la infraestructura y finalmente, poner en práctica políticas de movilidad más sostenibles en donde el transporte de carga también es tomado en cuenta.

Retos a futuro

Uno de los retos a futuro es implementar una prueba piloto dentro de una zona urbana definida por el LogistiX-Lab, usando la tecnología IoT, aquí descrita. Para ese caso se pretende instrumentar y monitorear un conjunto de 10 bahías de carga/descarga.

Referencias

- (IFT), I. f. (2019). Análisis exploratorio de la comercialización de servicios de conectividad para IoT (Internet of Things). Obtenido de <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/estadisticas/analisisexploratorioiot.pdf>
- Adita Gaur, B. S. (2015). Smart City architecture and its applications based IoT. Science Direct.
- Atlassian. (21 de 04 de 2022). Desarrollo de software. Obtenido de <https://www.atlassian.com/es/microservices/microservices-architecture/microservices-vs-monolith>
- Cedillo-Campos, M. F. (2019). Distribución urbana inteligente de mercancías. IC, Colegio de Ingenieros Civiles de México, 8-10.
- Chen, S., Xu, H., Liu, D., Hu, B., & Wang, H. (2014). A Vision of IoT: Applications, Challenges, and Opportunities With China Perspective. IEEE Internet of Things Journal , 349 - 359.
- Fransoo, J. a.-C. (Junio de 2022). Estimating the benefits of dedicated unloading bays by field experimentation. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 348-354. Obtenido de Estimating the benefits of dedicated unloading bays by field experimentation.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856422000702>
- Group, H. (2021). IoT Signals Edition 3. . Microsoft.
- Hernández-Sánchez, B. B.-B.-C. (2021). IoTx Arquitectura Tecnológica integrada (Fase 1). Publicación Técnica N° 664. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Hugh B., B. H. (2018). The industrial internet of things (IIOT): An analysis framework. Computer Industry, 1-12.
- Kamal, R. (2017). Internet of Things Architecture and Design Principles. India: Mc Graw Hill.
- ONU, U. H. (2020). Reporte anual de las Naciones Unidas, programa de asentamientos humanos: Por un mejor futuro urbano. ONU.
- R., I. S. (2017). Las “Smart Cities”: un nuevo paradigma, aspectos éticos. España: Universidad Rey Juan Carlos.
- SigFox. (26 de abril de 2022). SigFox proveedor de servicios para Internet de las cosas (IoT). . Obtenido de <https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology>

Metodología Lean Six Sigma en Logística 4.0 para mejorar la calidad en los tiempos de descarga dentro del almacén de materias primas

Jorge Luis Cruz Trujano

Programa de Manufactura Avanzada del Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro, A.C.(CIATEQ)

Erick Álvarez Alfaro, Juan José Méndez Palacios

Departamento de Ingeniería Industrial
Tecnológico Nacional de México/IT Querétaro

Resumen— *El trabajo que se presenta pretende crear un enlace entre Industria 4.0 y Logística 4.0 a partir de los conceptos y herramientas aplicadas a la cadena de suministro. El caso presentado que es parte de la metodología lean six sigma busca eficientar la cadena de suministro interna a partir del área de descarga de materiales y la llegada de estos al almacén en donde se realiza el registro y se pone a disposición del área de manufactura. Para ello, se define lo que es Logística 4.0, algunas de sus herramientas y manufactura 4.0, así como las tecnologías que la componen, con el fin de efectuar un acercamiento teórico inicial de ambas a través de la metodología lean six sigma. La metodología utilizada sienta sus bases en el método inductivo, ya que utiliza el caso presentado para llegar a las afirmaciones de que los conceptos finalmente poseen un punto de encuentro, y a partir de ahí se emiten recomendaciones para seguir trabajando en este sector. Así mismo, se encuentra que hay una estrecha relación entre los conceptos, porque finalmente se trata de generar información que permita tomar decisiones en la mejora de la empresa para ofrecer mejor calidad, una retención del cliente, el cuidado de los bienes del cliente y, sobre todo, mejorar la eficiencia y eficacia de los sistemas de manufactura para obtener mejores productos y que estos superen la expectativa del cliente. Lean six sigma genera toda esta información y los datos se pueden simular para tener diferentes escenarios a bajo costo y que permiten el análisis y la correcta toma de decisiones en el mundo real. Finalmente, en la conclusión se puede apreciar cómo se puede aplicar la metodología lean six sigma en la logística 4.0*

En la actualidad se han presentado muchos avances tecnológicos, y dentro del sector industrial no es la excepción, si bien en la mayoría de los casos, dicho sector son los mismos generadores de tecnología e inclusive ciencia, cuando ya se combina con la parte del internet, es cuando se potencializa para poder desarrollar soluciones prácticas, si con ello se agrega a la ecuación las herramientas de calidad, de estadística avanzada entre otras, pues se pueden generar proyectos de mejora dentro de las empresas.

Dichas tecnologías se han venido presentando dentro de la logística 4.0 y con ella presentar nuevas herramientas para poder gestionar de manera eficiente la cadena de suministro. Estas mismas tecnologías también dan soporte a la manufactura 4.0, es por ello que en el presente artículo se busca demostrar la relación de estas tecnologías con la Logística 4.0 así como con la Manufactura 4.0.

Las empresas de clase mundial han buscado y aplicado estas tecnologías para posicionarse en el mercado, ganando más clientes y hacerse de un nombre de prestigio, dentro de todas estas tecnologías existe una filosofía llamada lean six sigma que sirve de vínculo entre la Logística 4.0 y la Manufactura 4.0; y se llevó a cabo mediante un caso de aplicación de la metodología DMAIC que se explica mas adelante, herramienta de la filosofía lean six sigma.

Metodología

La metodología tiene un enfoque cuantitativo, su alcance es descriptivo de manera exhaustiva y completa de un proceso en la cadena de abastecimiento y el diseño es experimental.

Mediante la aplicación de la herramienta seis sigma a un estudio de caso, donde se hace el análisis mediante la técnica de Pareto en dos sentidos: primero para conocer las causas de que se merman la velocidad del proceso de descarga del camión y, segundo la afectación que esto provoca en el movimiento de los materiales a los procesos consecuentes.

También se hace análisis estadístico para determinar si hay correlación entre las variables de estudio, tales como:

- Tiempo de descarga
- Tiempo de espera
- Daño del material

Logística 4.0 Y lean manufacturing

Según Grosse (2020) la Logística 4.0 se puede definir como el sistema logístico que permite la satisfacción sostenible de las demandas individualizadas de los clientes sin un aumento en los costos y apoya este desarrollo en la industria y el comercio utilizando tecnologías digitales [4] Por otro lado, Barreto (2017) la define cómo la combinación del uso de la logística con las innovaciones y aplicaciones que están relacionadas con las mismas condiciones que los Servicios Inteligentes y los Productos Inteligentes [2]. Por lo mismo, es que la logística 4.0 se ha ido modificando a lo largo del tiempo, y no solo en la parte cognitiva del concepto, sino también en las herramientas que pueden implementarse dentro de ella. Por otra parte, con la llegada de las telecomunicaciones se han ido desarrollando nuevos avances tecnológicos en la logística 4.0, a través de nuevas tecnologías como big data, IoT, entre otras, las cuales se han ido implementando de forma interindustrial.

Entonces, lo que se propone la logística 4.0 es realizar e implementar dichos cambios en la cadena de suministro, pero con el enfoque del IoT, para obtener datos en tiempo real; los cuales deberán fluir de forma automática para indicar sobre el estado del bien y asegurar la calidad de los productos.

La logística de almacenamiento evoluciona dentro de la industria 4.0 buscando la adaptabilidad de espacios dentro de los almacenes, las ubicaciones, rotación del material, los tipos de empaque, y el embalaje, entre otras características; desarrollando sistemas de transporte AGV que corresponde a vehículos no tripulados, almacenes automatizados y robots de carga; para conectar de manera eficiente las diferentes zonas dentro de la industria; iniciando en la de recibo materia prima apoyandose de escáneres digitales para poder determinar el estado del material, que a la postre sera llevado al almacén y una vez efectuado el registro correspondiente en la base de datos, quede a disposición del área de manufactura.

Aunado a ello, también se debe tener en cuenta a los trabajadores que serán parte de nuevos procesos cada vez más automatizados, mediante capacitaciones y/o cursos en el manejo de tecnología vía internet.

La figura 1, muestra un ejemplo de las relaciones entre la tecnología, el trabajador y el proceso a realizarse.

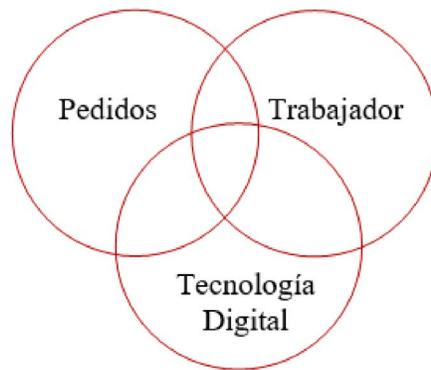


Figura 1. Factores de relación
Fuente: elaboración propia

La figura muestra que el trabajador por medio de un sistema digital realizará el proceso para un nuevo pedido en la base de datos del almacén, indicando la cantidad, el SKU o número de serie de la pieza y el momento en que lo necesita, recibiendo de manera automática la confirmación de la orden en su dispositivo digital.

Así mismo Chiara Cimini Et Al (2020), menciona que el operador 4.0 explora los nuevos sistemas disponibles, medios tecnológicos para apoyar y ayudar a la física y trabajo cognitivo de los operarios en la fabricación inteligente en tres formas posibles:

- Trabajo Asistido
- Trabajo Colaborativo
- Trabajo Aumentado

Por otra parte, al hablar de manufactura 4.0, se tiene que, de acuerdo con Zurisadai , Y., & Villanueva , V. (2021). Se refiere a la fabricación inteligente y también presenta los 9 pilares que son basadas en estrategias de alta tecnología caracterizada por la digitalización y automatización de la información de la manufactura [10], mismos que se presentan en la tabla 1.

La manufactura 4.0 consiste en la digitalización de procesos productivos a través de sensores y sistemas de información formando parte de la industria 4.0 que integra tecnología digital inteligente, aprendizaje automatizado y big data, para enlazarse de mejor forma con otras compañías enfocadas en la manufactura.[3]

La digitalización y transformación inteligente de las industrias la manufactura 4.0 pretende unir todas estas herramientas, así como de la implementación de sistemas ciberfísicos (CPS) que podrán sensor e informar durante todo el proceso de fabricación el estado de transformación del material, apoyándose con metodologías cómo digital twin, donde se

puede emular todo el procesamiento, y realizar pruebas haciendo cambios en las variables de entrada de los procesos.

La robótica, facilita las tareas repetitivas y que tienen un nivel de precisión muy alto; también apoya en la fabricación constante generando datos del comportamiento de los productos.

La realidad aumentada y realidad virtual apoyan en tiempo real para la toma de decisiones, debido que se pueden visualizar todos los procesos y determinar si son susceptibles a cambios o mejoras.

La manufactura aditiva con la impresión 3D que es usada para el prototipado

Todas estas tecnologías facilitan de forma automática la toma de decisiones y aportan datos para poder realizar proyectos de mejora en tiempo real para la obtención de una mejor calidad y prototipados más eficientes para optimizar los procesos y satisfacer las necesidades del cliente. Como se puede apreciar la logística 4.0 se encuentra muy vinculada con la manufactura 4.0 solo que presentan diferentes enfoques. Como lo muestra la siguiente Tabla.

Tabla 1. Relaciones entre manufactura 4.0 Y logística 4.0

Tecnologías		
	Manufactura 4.0	Logística 4.0
Simulación	Calidad	Planeación
Big data	Dispositivos físicos estáticos	Dispositivos físicos móviles
IoT	Alta necesidad de control	Alta necesidad de transparencia
Robots autónomos	Robótica física	Robótica digital
Manufactura aditiva	Prototipado	Reducción de inventarios
Sistemas de integración horizontales	Sistemas ciber físicos	Sistemas ciber móviles
Sistemas de integración verticales	Gestión del sistema integrado	Gestión de la cadena de suministro (SCM)
Cyberseguridad	Activos de Infraestructura	Activos de Información
Realidad Virtual	Instrucciones de fabricación y Mantenimiento	Instrucciones de Almacenamiento y Manejo
Computación en la nube	Análisis de datos	Algoritmo predictivo

Fuente: elaboración propia

En la tabla se observan las diferentes tecnologías que relacionan ambos conceptos bajo diferentes enfoques; mismos que se explican a continuación:

- *Simulación*: en la manufactura ayuda para realizar pruebas que permiten tener mediciones sobre los procesos sin mover nada antes, permitiendo que la logística interna obtenga mayor eficiencia al implementar mejoras.
- *Big Data*: en la manufactura es usada para generar datos desde sus dispositivos físicos estáticos digitales, capaces de comunicarse y manipularse con dispositivos móviles digitales. Que ayudan a la logística en desarrollar una cadena de suministro más eficiente.
- *IoT*: en la manufactura es útil para controlar dispositivos digitales remotos que al mismo tiempo generan información que sirve para tomar decisiones acerca de los procesos logísticos.
- *Robots*: en la manufactura es útil para la fabricación donde se realizan procesos complejos o inseguros y, por otro lado, apoya a la logística para satisfacer pedidos con poco tiempo de entrega (lead time).
- *Manufactura aditiva*: en la manufactura se utiliza para el prototipado orientado al diseño y/o prueba de productos siendo útil para la logística al generar una reducción de inventarios
- *Sistemas de integración vertical y horizontal*: son usados en la manufactura para gestión del sistema integrado y en la comunicación entre los sistemas ciberfísicos, generando información necesaria para la logística en la gestión de la cadena de suministro y la interacción entre los dispositivos digitales.
- *Cyberseguridad*: en la manufactura se usa de protección para todos los dispositivos físicos conectados en la red, generando información digital. Siendo necesaria para la logística en el cuidado del sistema digital del valor económico del inventario.
- *Realidad virtual*: en la manufactura usada para actividades de fabricación y mantenimiento, vinculándose con las actividades de almacenamiento y manejo de los productos en la logística.
- *Computación en la nube*: para análisis de datos en la manufactura y con estos generar algoritmos predictivos para adelantarse a posibles inconvenientes con paros de procesos, material inadecuado, etc., que permitan a la logística poder planear los abastecimientos del almacén.

En general en la logística 4.0 y la Manufactura 4.0 se observan grandes avances tecnológicos, y es por ello que se requiere que se analicen los procesos con los que cuenta.

LEAN SIX SIGMA

Según Haekal (2021), lean six sigma es un esfuerzo continuo para eliminar el desperdicio, aumentar el valor agregado del producto y brindar valor a los clientes. Por lo tanto, Lean se puede definir como un enfoque sistemático para identificar y eliminar el desper-

dicio o las actividades sin valor agregado a través de la mejora continua radical mediante el flujo de productos e información utilizando sistemas de atracción y clientes internos y externos para buscar la excelencia [5].

Lean six sigma es una filosofía conformada por metodologías utilizadas para agregar valor a los sistemas de trabajo, volviéndolos eficientes; que como se puede apreciar van relacionados con conceptos y herramientas de manufactura y logística 4.0

Todo proceso para poder ser mejorado necesita de dos acciones la primera es realizar un diagnóstico de la situación actual y la segunda avalar dicho diagnóstico con mediciones hechas del proceso para conocer las variables de entrada (input) los parámetros del proceso (throughput) y nuestras variables de respuesta o salida (outputs). Para así generar sistemas de medición de desempeño

Por ello de acuerdo Affenzeller (2020) Los sistemas de medición del desempeño brindan un apoyo sustancial para tomar decisiones operativas diarias, pero también permiten evaluar decisiones tácticas y estratégicas en un marco de tiempo más largo [1].

Aquí cobra importancia la eficiencia del ciclo de proceso, debido a que es necesario reducir los gaps que alejan al proceso de la media esperada. Una manera de realizarlo es diferenciar el tiempo de valor agregado con el tiempo total del proceso [6]. Las demoras pertenecen a una de las 7 mudas de la filosofía lean six sigma. Indicando que deben ser eliminados y/o reducidos los tiempos improductivos para tener solamente los tiempos que agreguen valor al proceso.

Para ello es necesario desarrollar proyectos six sigma para desarrollar productos de calidad. Six sigma es una filosofía basada en datos estadísticos para eliminar defectos impulsando la salida del proceso al nivel de calidad de seis sigma, es decir, hacia 6 desviaciones estándar entre la media y el límite de especificación [7].



Figura. 2 Contribución de seis sigma a la implementación de la Manufactura 4.0 y Logística 4.0

Fuente: elaboración propia

La metodología seis sigma puede coadyuvar en la implementación de los procesos de manufactura 4.0 y la logística 4.0 desde la obtención de datos, de algún proceso por medio de sistemas capaces de realizar la captura de datos o mediciones de una variable física y por medio de la electrónica volverla una señal digital para que con ello se pueda medir. Lo que conduce a analizar y controlar dichas señales para realizar procesos de mejora y al mismo tiempo integrarlos a los llamados sistemas embebidos que permiten estar sensando las señales 24/7 tanto en sitio como desde una localidad remota.

A través de la metodología DMAIC (D=Define; M=Measure; A=Analyze; I=Improve; C=Control) por sus siglas en inglés; se logró desarrollar un proyecto de seis sigma abarcando todas las fases mencionadas mismo como se describe a continuación:

Definir

En esta etapa se debe definir el problema teniendo en cuenta sus alcances, para ello se debe conocer los parámetros de calidad críticos CTQ, y se puede llevar a cabo mediante las herramientas de QFD, Scorecards, Data Gathering, el segundo paso es desarrollar una carta o Develop a Charter en la cual se deben describir los antecedentes del problema, los objetivos del problema la lista de los involucrados en el proyecto, la situación económica y los kpis.

En un tercer paso, se deben definir los estándares de desempeño Define Performance Standards. Saber en que nivel se encuentra el proceso y a qué nivel se quiere llevar, para ello se pueden utilizar las herramientas de Pareto, un Mapeo de Procesos, entre otras [6].

Medir

Para esta etapa, se debe identificar datos, planificar y recopilar datos, y se puede llevar a cabo mediante:

- SIPOC (Proveedores (Suppliers), Entradas (Inputs), Procesos (Process), Salidas (Outputs) y Clientes (Customers)).
- VSM (Mapeo del flujo de valor)
- $Y=f(x)$ (Representa una función del proceso a mejorar, donde tenemos a las x representan las variables que podemos controlar y mejorar, y la Y representa el resultado del proceso).

Continuando con el análisis del sistema de medición que se puede llevar a cabo con estadísticas básicas como una tabla de frecuencias, o con un Análisis de Reproducibilidad y Repetibilidad (gauge R&R).

Para cerrar esta etapa se obtienen medidas de rendimiento con herramientas de capacidad de proceso, linealidad y sesgo y también un Análisis de modo de efecto y falla

(AMEF) [5]. Con la intención de poder recabar y validar los datos implicados en el proceso, así como las causas potenciales.

Analizar

Para iniciar con esta fase se debe identificar la causa raíz del problema y validarla estadísticamente y se puede apoyar con las herramientas de:

- Diagrama de Ishikawa
- Pruebas de hipótesis, y
- Análisis multivarianza

y así tener la certeza de las causas que generan el problema dentro del proceso, las cuales deberán estar validadas de manera estadística. Para el caso de estudio se aplicaron pruebas de hipótesis y el análisis multivarianza.

Mejorar

En esta etapa se trata de generar propuestas de mejora, es decir, arreglar la causa raíz, estableciendo la función de transferencia, teniendo identificadas todas las variables de entrada que afecten al proyecto, para poderlas validar mediante un diseño de experimentos, y así conocer como afectan a las variables de salida. Para generar un modelo estadístico como por ejemplo de $2n$ [8] que permita realizar cambios en los parámetros del ajuste.

Controlar

En esta fase se deben monitorear las propuestas de mejora obtenidas en la fase anterior, aquí se conocerá si la meta es alcanzada, si hubo mejora, que controles hay que implementar, si no hay recurrencia en el problema y si se eliminó la causa raíz, y volver a realizar un estudio de capacidad del nuevo proceso para comparar los resultados de la mejora con el proceso anterior y determinar el nivel sigma en ambos, para ver el porcentaje de mejoras [7] y [9].

Caso de aplicación de lean seis sigma en logística 4.0

Definir

En el área de carga y descarga de materiales en una empresa metalmecánica que produce desde piezas para autopartes hasta piezas para minería pasando por pailería. Se encontró que los tiempos de descarga de materias primas en los andenes eran muy elevados afectando a la eficiencia de la cadena de suministro; que es el punto donde comienza la logística interna de la empresa. Por lo que al reducir estos, se mejora la respuesta que puede dar el almacén a los procesos de producción. Al poner de inmediato los insumos como disponibles en el sistema de Planeación de requerimientos empresariales (ERP).

Para Definir el alcance del proyecto, se realizó un Pareto de primer nivel determinando cuál es el defecto que más se presenta, y después se realizó un Pareto de segundo nivel para definir el comportamiento del proceso, posteriormente se realizó una gráfica de serie de tiempos del scrap generado a través de los meses [9].

En la Figura 3 se presenta el Diagrama de Pareto de primer nivel, en donde únicamente se ilustran los defectos y el número de sus ocurrencias.

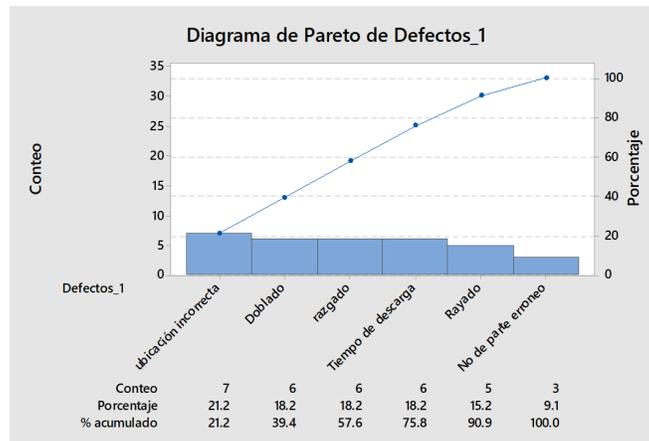


Figura 3. Gráfica Pareto de Primer nivel.

Fuente: elaboración propio.

Se puede observar que las ocurrencias con mayor frecuencia son:

- Tiempo de descarga de Materiales
- Número de parte erróneos
- Doblado
- Rayado

Que juntos forman el 80-20, por ello son estos los defectos que deberán estudiarse y analizar su causa raíz. En la figura 4 se muestra el Diagrama de Pareto de Segundo nivel, el cuál se usa para clasificar dentro de los defectos, qué andén es el que presenta mayor ocurrencia.

En cuanto al primer andén se tiene:

Andén 1:

- Tiempo de descarga de Materiales
- Doblado
- Rayado

Andén 2:

- Tiempo de descarga de Materiales
- Rayado
- Doblado

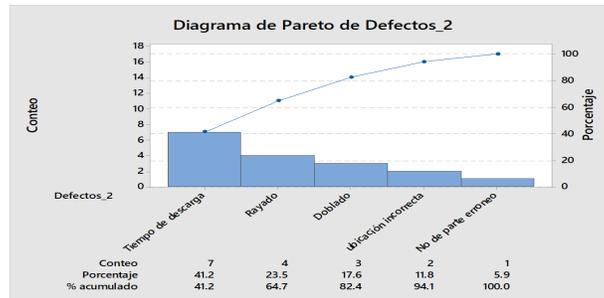
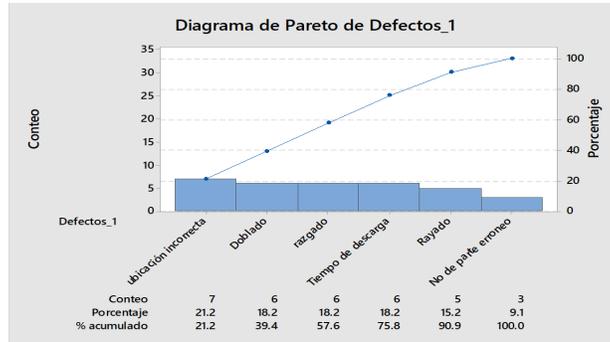


Figura 4. Gráfica Pareto de Segundo nivel
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en ambos andenes el mayor de los defectos es el tiempo de descarga de los materiales.

En cuanto a la figura 4 se tiene una gráfica de serie de tiempos en la cual se muestran por meses la cantidad de desperdicio que se ha generado mes a mes. Siendo el mes de marzo el que estuvo fuera de la normalidad y por ende rebasó los límites permitidos.

Este desperdicio se refiere a los materiales que son dañados por no hacer las operaciones de descarga y manipulación apropiados en los andenes.

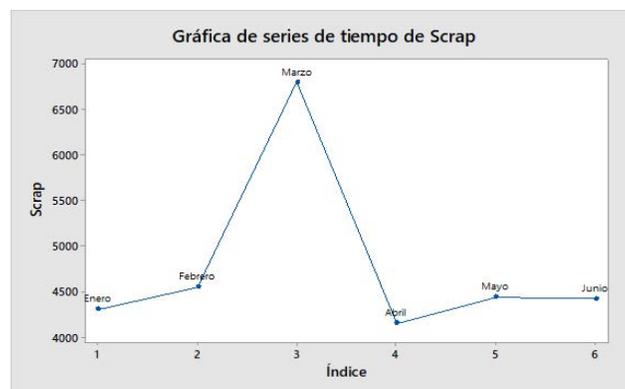


Figura 5. Gráfica serie de tiempos
Fuente: elaboración propia

Medir

En esta etapa se realizó un estudio del gauge R&R de variable, para determinar la precisión de qué tan buenos son los datos que se obtuvieron. Para validar la exactitud del sistema de medición, se realizó un estudio de linealidad y sesgo. Finalmente se realizó una prueba de la capacidad del proceso, calculando el nivel sigma del proceso, para validar todo antes de continuar con las siguientes fases del proyecto de seis sigma, y con ello determinar si se cuenta con un proceso estable, si la distribución normal, se el proceso está centrado y si el proceso es capaz, como se puede apreciar en las figuras siguientes:

En la figura 6 se tiene el informe del gauge R&R, en el cual se generan 6 gráficas, en las cuáles se indica el nivel de variabilidad.

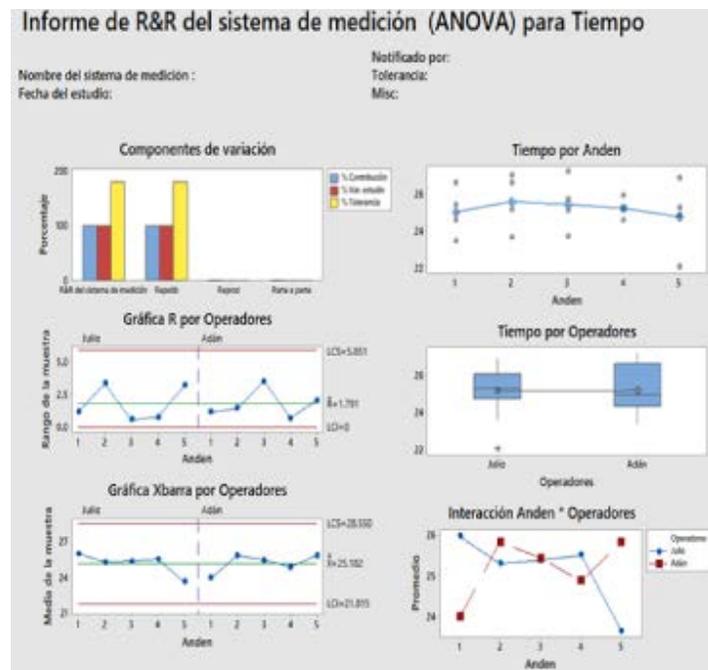


Figura 6. Gráfica Gauge R&R
Diseño propio

En la figura 7 se presenta el estudio de linealidad y sesgo, donde se aprecia que la línea cero no está contenida en el intervalo de confianza y por tanto no es aceptable.

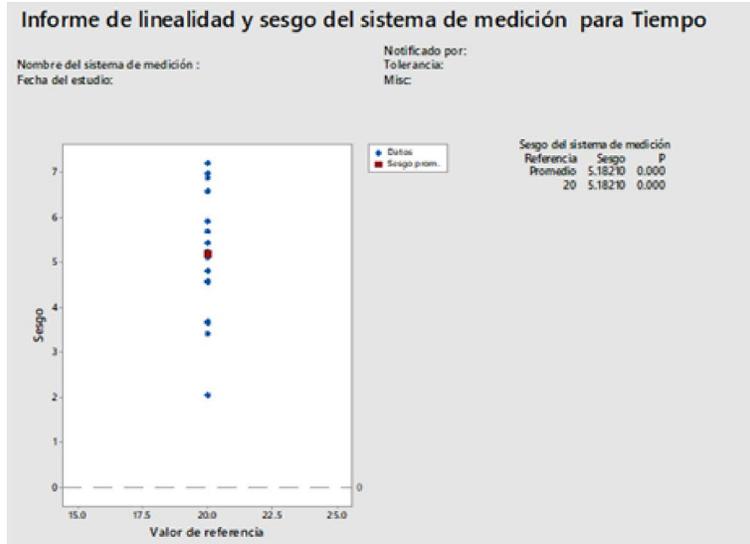


Figura 7. Gráfica Linealidad y sesgo
Fuente: Diseño propio

En la figura 8 se presenta el estudio de linealidad y sesgo, donde se aprecia que la línea cero no está contenida en el intervalo de confianza y por tanto no es aceptable.

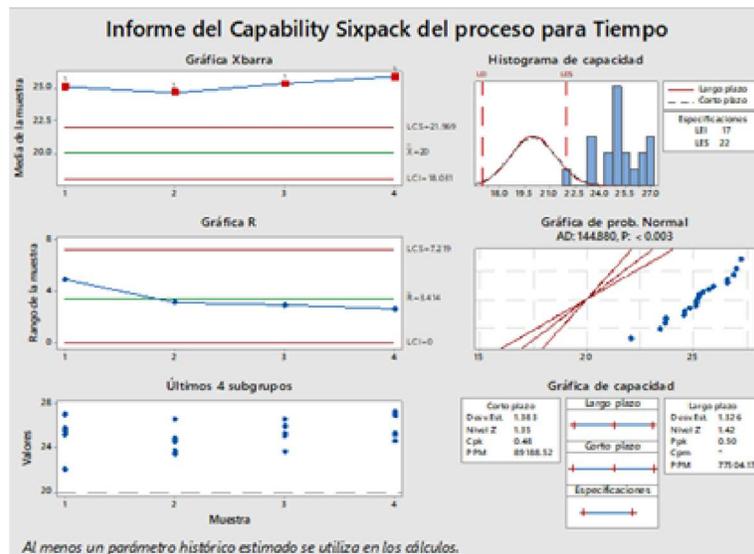


Figura 8. Gráfica Linealidad y sesgo
Diseño propio

La figura 7 muestra el informe de capacidad del proceso para el tiempo de descarga y presenta 6 diagramas de los cuales la gráfica de control y la gráfica de distribución normal permiten determinar que los datos son normales, aunque el proceso no es estable y donde se puede apreciar que de anden a anden existe una gran variabilidad en el tiempo

de descarga de los materiales. También, se puede ver en el histograma que el proceso está por fuera de los límites permitidos y por lo tanto no es aceptable.

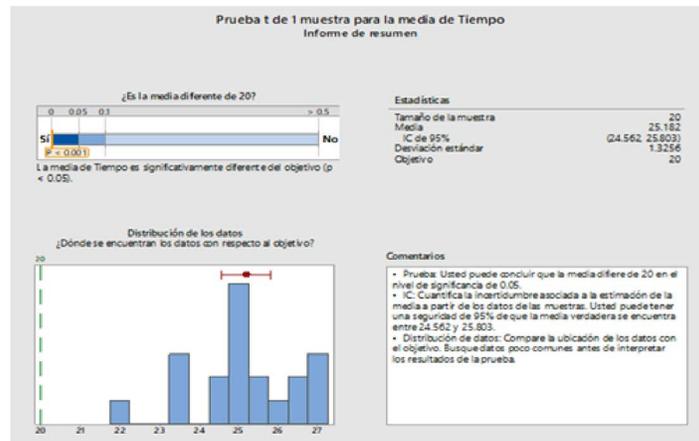


Figura 9. Gráfica de estudio de capacidad
Diseño propio

Analizar:

Esta fase se utiliza para determinar si los valores medidos oscilan sobre la especificación del cliente. Para ello se realizó una prueba de hipótesis, y se determinó cuáles son los factores que afectan a la variable de entrada. Finalmente, se efectuó un análisis multivari. La figura 8 presenta una prueba de hipótesis para determinar si los valores obtenidos correspondían al valor establecido por el cliente, y da un resultado de que la media difiere de 20 en el nivel de significancia de 0.05. y con esto tener la seguridad del 95% de que la media verdadera se encuentra entre 24.562 y 25.803 minutos. Al buscar los datos y compararlos con el objetivo, se concluye que están por fuera del valor esperado.

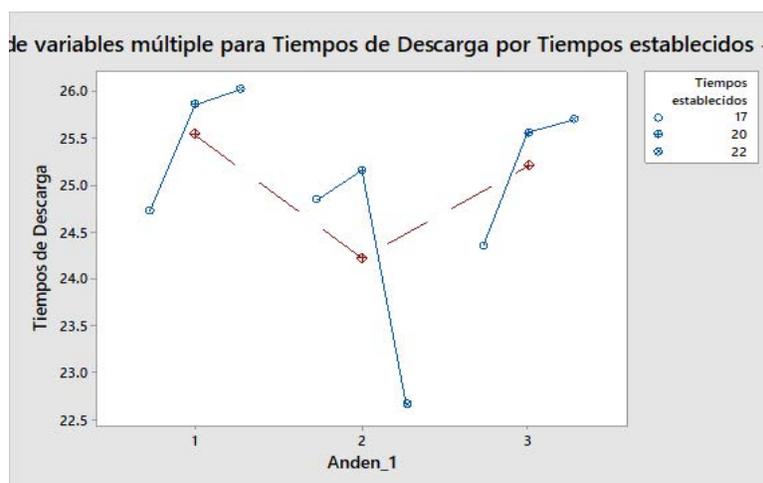


Figura 10. Prueba de hipótesis
Diseño propio

En la figura 10 se presenta el análisis multivari.

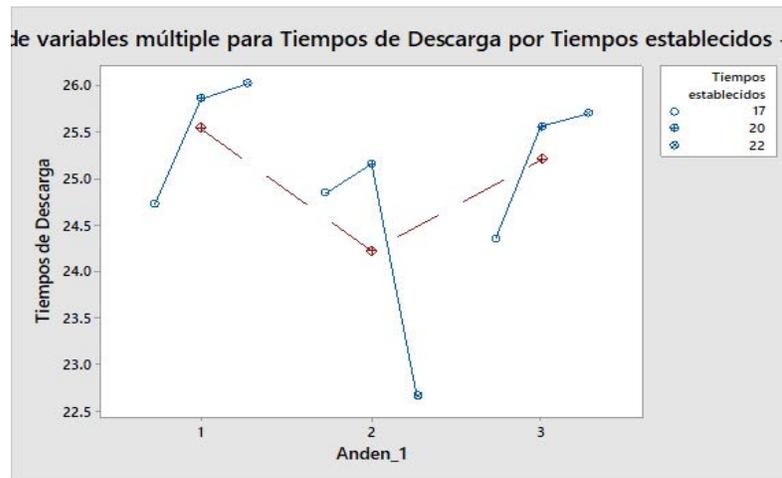


Figura 11. multi vari
Diseño propio

De donde se observa lo siguiente:

Para el andén 1:

Con un tiempo establecido de 17 minutos puede generar un tiempo de descarga entre 24.5 y 25.0 minutos, con un tiempo establecido de 20 minutos puede generar unos tiempos de descarga de 25.5 y 26.0 y que con un tiempo establecido de 22 minutos puede generar un tiempo de descarga de más de 26 minutos. De esto se puede concluir que a menor tiempo establecido genera menor tiempo en la descarga.

Para el andén 2:

Con un tiempo establecido de 17 minutos puede generar un tiempo de descarga entre 24.5 y 25.0 minutos, con un tiempo establecido de 20 minutos puede generar unos tiempos de descarga de 25.0 y 25.5 y que con un tiempo establecido de 22 minutos puede generar un tiempo de descarga entre 22.5 y 23.0 minutos. De esto se puede concluir que a mayor tiempo establecido menor tiempo de descarga.

Para el andén 3:

Con un tiempo establecido de 17 minutos puede generar un tiempo de descarga entre 24.0 y 24.5 minutos, con un tiempo establecido de 20 minutos puede generar unos tiempos de descarga de aproximadamente 25.5 y que con un tiempo establecido de 22 minutos puede generar un tiempo de descarga entre 25.5 y 26.0 minutos. De esto se puede concluir que a menor tiempo establecido genera menor tiempo en la descarga.

D. Mejorar

Para entender cómo es que el proceso se va moviendo se realizó un diseño de experi-

mentos (DOE), donde se analizan todos los factores con sus niveles, para conocer primero si los valores son significativos, segundo, si el modelo es el adecuado, tercero si los residuos tienen un problema o no, y cuarto conocer cuál es la respuesta del diseño de experimentos, es decir, conocer cuál es el set up que se debe conocer, y finalmente, para tener un marco de referencia en cuánto al manejo de los parámetros se realizó una regresión lineal para obtener una ecuación que permita realizar algunos cambios, de acuerdo a las especificaciones

En la figura 10, se puede muestra el diseño de experimentos realizado y con ello se puede observar que en cuanto a los residuos no presentan algún dato fuera de la parte normal, y que en cuanto a los ajustes, los residuos son independientes unos de otros.

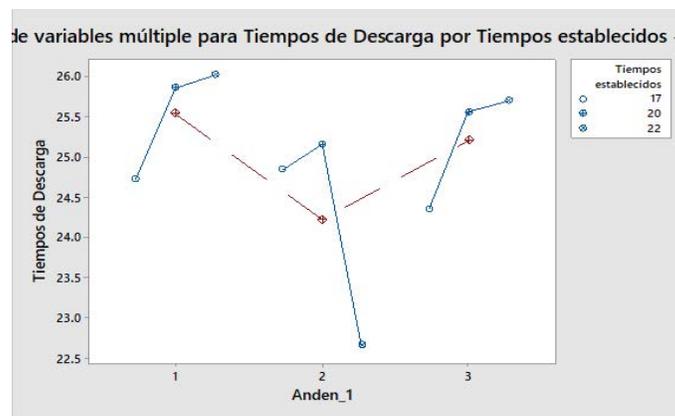


Figura 12. Diseño de Experimentos
Diseño propio

Controlar

Para demostrar que el proyecto de seis sigma fue efectivo se realizó un comparativo de antes y después, el cual sirve para establecer los estándares de operación y validar los cambios realizados.

En la figura 11. Se presenta el comparativo de antes y después donde se puede ver principalmente que:

La desviación estándar se redujo significativamente. La media del proceso está más cerca del objetivo. La desviación a largo plazo es lo que experimenta el cliente Y la desviación a corto plazo es la que se podría alcanzar si se eliminaran los desplazamientos y los desvíos del proceso

Finalmente, se cambió de un nivel sigma de -1.96 a 4.44 sigmas.

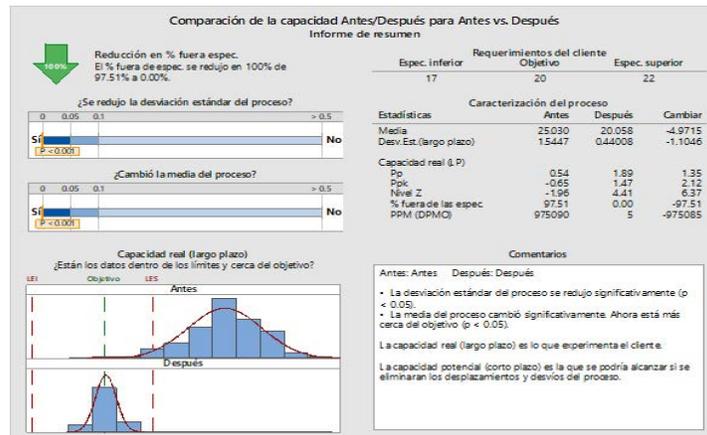


Fig. 11 Gráfica de Antes/Después
Diseño propio

Toda la información generada y el logro del objetivo repercute en la logística interna al poder contar con datos que permiten tomar las mejores decisiones y así hacer eficiente a la cadena de suministro interna.

Por otra parte, se puede tener una mejor planeación de actividades al contar con un abastecimiento fluido, con menos desperdicios y que genera la disponibilidad de las materias primas en un mejor tiempo.

En lo referente a la información, se pueden generar simulaciones y buscar mejoras significativas en todos los aspectos.

La metodología DMAIC herramienta de la filosofía lean six sigma. Tiene un vínculo sólido con la logística 4.0 debido a que todos los datos estadísticos que son necesarios para desarrollar un proyecto six sigma, por lo general son recabados mediante mediciones muchas veces de forma analógica, pero con la incursión de la tecnología del internet de las cosas, se pueden extraer dichos datos mediante dispositivos electrónicos y entonces formular algoritmos que sean capaces de procesar no solo datos de una muestra, si no que puedan ser metadatos los cuáles nos indiquen en tiempo real la situación del proceso. Así mismo que dichos metadatos puedan acumularse en una base de datos en donde se vaya generando un historial y con ello poder generar regresiones para determinar un modelo estadístico que pueda ser capaz de generar informaciones necesarias para la toma de decisiones para el abastecimiento, almacenamiento y manejo de los materiales de manera autónoma.

El objeto de este estudio demuestra que al aplicar las herramientas de calidad y de estadística usando la metodología Lean Six Sigma en la logística 4.0 se puede monitorear la eficiencia de la operación de cualquier proceso.

La forma de poder implementar Lean Six Sigma en la Logística 4.0 es automatizar el proceso y que este se vuelva inteligente mediante el uso de la internet industrial de las cosas. Diseñando dispositivos que generen de manera real los datos y que se puedan pasar a una base de datos, generando un algoritmo para evaluarlos. Y que por medio de un programa se pueda leer y proyectar y cada usuario sea capaz controlarlos.

Tabla 2. Infraestructura de losgística 4.0

Componentes	Acciones
Estación/Sensor	Obtención de datos
Servidor	Acumulación de datos
Software y/o App	Medición de datos
Servidor del Usuario	Control de Datos

Fuente: elaboración propia

Teniendo todo este sistema electrónico se deberá volver inteligente para que con ello se pueda estar generando reporte del estado del producto con las especificaciones que se deban estar monitoreando. A partir de este punto se podrá desarrollar los proyectos de Lean Six Sigma de las variables que estén por fuera de especificación y que sean significativas tanto en cuestiones de calidad cómo de finanzas.

Por ende, se deberá realizar un diagnóstico de cuál debe ser el proceso donde es necesario automatizar para no tener tanta variación en el resultado y que esto nos haga quedar fuera de los requerimientos de los clientes.

Con el presente artículo se puede ver plasmado el uso de herramientas que en conjunto coadyuvan obtención de la causa raíz y con ello al planteamiento de mejoras, mismas que por ser realizadas dentro de una empresa de carácter privado y para salvaguardar sus procedimientos algunos datos y aplicaciones no se muestran dentro de dicho artículo. Después de realizado el proyecto seis sigma, mediante la metodología DMAIC, se logró optimizar los tiempos de descarga, con el cuál se logró reducir el tiempo máximo hasta en 10 minutos, así como según la gráfica de la fase de control, se puede apreciar que en

el estado actual contaban con un nivel sigma de 1.96 y aumento el nivel sigma de 4.41. Al reducir los tiempos de descarga ahora se pueden atender 3 trailers por hora. Por lo que se pudo reducir la variación en los tiempos entre la descarga de la materia prima hasta el almacenamiento. Lo que permitió que la logística interna de la empresa se vea eficientada en dicho proceso.

Finalmente, después de culminar el proyecto también se obtiene ahora un nuevo valor agregado con la que cuenta toda la empresa.

Referencias

- Affenzeller, A. B. (2020). Performance, Quality, and Control in Steel Logistics 4.0. *sciencedirect*, 429-433.
- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *sciencedirect*, 1245 – 1252.
- Cimini, C., Lagorio, A., Romero, D., Cavalieri, S., & Stahre, J. (2020). Smart Logistics and The Logistics Operator 4.0. *sciencedirect*, 10615 - 10620.
- H.Grosse, S. W. (2020). Work Characteristics in Logistics 4.0: Conceptualization of a qualitative assessment in order picking. *sciencedirect*, 10609-10614.
- Haekal, J. (2021). Application of Lean Six Sigma Approach to Reduce Worker Fatigue in Racking Areas Using DMAIC, VSM, FMEA and ProModel Simulation Methods in Sub Logistic Companies: A Case Study of Indonesia. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)*, Volumen 7, No. 6.
- Ilesanmi, D., & Adefemi, A. (2022). Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the. *Heliyon*, e09043.
- Mishra, D. H. (2022). Drivers for the adoption of integrated sustainable green lean six sigma agile manufacturing system (ISGLSAMS) and research directions. *sciencedirect*, 100449.
- Pérez López, D., Franco Martínez, J., & Gutiérrez Rodríguez, F. (2022). Diseño de experimentos factoriales 2^n para su análisis con Infostat e Infogen. *Scielo*, Vol 12, No. 6
- Srinivasan, K., Muthu, S., Devadasan, S., & Sugumarand, C. (2014). Enhancing Effectiveness of Shell and Tube Heat Exchanger through Six Sigma DMAIC Phases. *ScienceDirect*, 2064-2071.
- Zurisadai, Y., & Villanueva, V. (2021). Diseño de un sistema de surtimiento de materiales bajo principios esbeltos y de manufactura 4.0 Usando simulación de eventos discretos (design of a material supply system under lean principles and manufacturing 4.0 Using discrete event simulation). *Creative Commons*, Volumen 42 No. 138.

Open Vehicle Routing Problem solved by Type-1 Singleton Fuzzy Logic System and Evolutionary Computing

Pascual Noradino Montes Dorantes
Universidad Autónoma del Noreste

Gerardo Maximiliano Méndez
Alberto Cavazos-González
Universidad Autónoma de Nuevo León

Abstract—The Vehicle Routing Problem (VRP) has many variants and one of them is the Open Vehicle Routing Problem (OVRP) that permits to finish a route with one client instead of the central depot. This characteristic permits to accomplish other tasks related to distribution (such as pick up, replenishment of goods, maintenance among others), instead of returning to the depot and to spending more resources when the complementary tasks are required. According to the literature the OVRP has not been fully studied and implemented. This article proposes the implementation of the OVRP through the hybridization of techniques such as evolutionary computing and fuzzy logic in order to optimize and calculate the distribution routes, presenting significant improvements and savings producing better performance than the use of metaheuristics and the algorithm of the shortest path or Dijkstra algorithm. The improvement of the proposal versus Ant Colony Optimization is 70%; versus Simulated Annealing is 133% and minimum 11% versus Evolutionary Strategy Adaptive Network Fuzzy Inference System (ES ANFIS) also more than 17% versus Dijkstra model.

Keywords—Fuzzy logic; Open Vehicle Routing Problem; OVRP; T1 SFLS; Hybrid Models; Evolutionary computing; Type-1 Singleton Fuzzy Logic System; ANFIS.

Introduction

The distribution of goods has become a particular complex problem studied over the last 60 years. The first approach was proposed by Danzig and Ramser in [9]. There are several variations on VRP problem. In 2016 a survey on the state of art in VRP [17] has classified the following variations: Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW), Heterogeneous Vehicle Routing Problem (HVRP), Multiple Depots Vehicle Routing Problem (MDVRP), Vehicle Routing Problem

with Pickup and delivery (VRPPD), Site Dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP), Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP), Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP), Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands (VRPSD), Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (VRRSPD), Open Vehicle Routing Problem (OVRP), Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP), Multiple Compartment Vehicle Routing Problem (MCVRP), and Cumulative Vehicle Routing Problem (CCVRP).

Moreover, a survey of literature made in Google Academic on October 2, 2018 has shown that there are several variants that had not been studied in depth, such as the OVRP. In the literature, there are around 65,200 papers that contain the acronym “VRP” and 58,500 that contains the phrase “vehicle routing problem” and only 790 paper shows the acronym “OVRP” and also 1,820 that also contains the phrase “open vehicle routing problem” (Fig. 1), this information means that the OVRP represents only the 1.42 % of the papers produced between 2000 and 2018 (including 3 papers that belongs 2019) and the case of OVRP only represents the 3.12 % of the total production about this topic as shown in Fig 1.

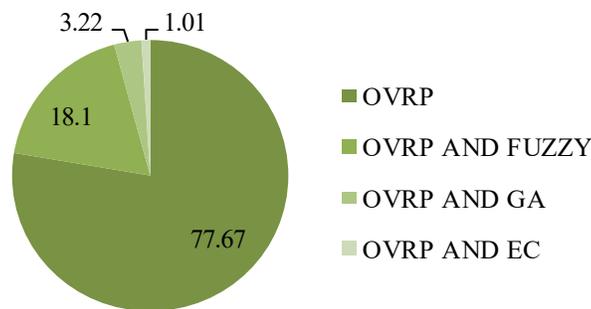


Fig. 1. Literature Survey on topics VRP and OVRP

Mixed techniques have been used such as: fuzzy logic 18.1%, Genetic algorithms (GA) 3.22 %; meanwhile Evolutionary Computing (EC) only shows 1.01%, as shown in Fig. 2.

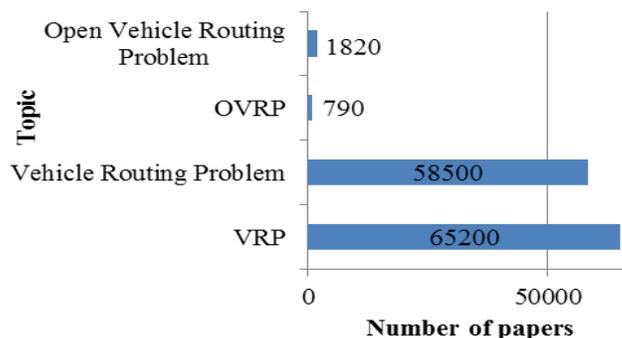


Fig. 2. Distribution of techniques related to artificial intelligence

The problem of OVRP has been addressed from different perspectives. One of them is the Artificial Intelligence (AI) in pure form or mixed with other techniques. A summary of the overall techniques found in papers appears in Table 1. It is notorious that the optimization models are the preferred technique to solve this problem, but the fuzzy logic and or Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS) also known as Type-1 Singleton ANFIS (T1 SANFIS) or T1 ANFIS appears as an alternative that produces equal or better results as is shown in [17].

Table 1. Number of appearances of the AI techniques

AI technique	Papers	Percentage
Fuzzy Logic (FL)	43	5.44
Artificial Neural Networks (ANN)	33	4.17
Genetic Algorithms (GA)	30	3.79
Ant Colony Optimization (ACO)	136	17.21
Particle Swarm Optimization (PSO)	134	16.96
Simulated Annealing (SA)	294	37.21
Tabu Search (TS)	457	57.84

A metaheuristic topical survey of papers has been made on October 2018. It consists of 211 papers taken from Google Academic and the resulting distribution by topic appearance is shown in Table 2.

Table 2. Distribution of topics that appears in papers for 2018

Topic	Papers
Tabu search	137
Ant colony optimization	103
ACO	41
Simulated annealing	87
SA	67
Fuzzy logic	0
Genetic algorithm	138
GA	81
ANN	38
Artificial neural network	6

PSO	44
Particle swarm optimization	84

This survey showed that neither fuzzy logic nor evolutionary strategies have been used in the literature to solve the OVRP problem.

Related work

The experience of the real world shows that the classic VRP is not an option for the enterprises. The tasks related to the distribution are mixed with the acquisition of goods to satisfy the production or the requirements for distribution. As a consequence, the OVRP are a usual form of distributing the goods due to the fact that the vehicle does not need return to the depot when the distribution route has been finished. Literature shows that less than 2.5 % of the published papers talk about the OVRP or the open vehicle routing problem. In [17] this percentage grows up to 6.25%.

To solve this problem the authors propose the use of several techniques in order to try to minimize costs and the number of vehicles used [5]. The techniques used include: PSO [27], K Nearest Neighbors (KNN) [14] used to initiate the information on the location of customers, TS [1, 30, 41, 42 and 45], and ACO [21 and 22], bee colony [29], among others.

Mixed techniques are applied in conjunction with OVRP, such as: CVRP [29], Time Dependent OVRP (TDOVRP) [29], Time Windows (TWOVRP) [32], and OVRP with Uncertain Demands (OVRPUD) [7]. Only a couple of real applications have been documented such as: Eolic park [4], coal mining [34], OVRP with Multi depot (OVRPMD) [35], OVRP with Simultaneous Pickup and Delivery (OVRPSPD) [3], with Time Windows (OVRPTW) and Stochastic Times and Travels (OVRPSTT) [21]. Due to that does not exist in literature a standardized model to solve the OVRP as is shown in the literature [6, 23, 36, 37 and 44] this problem is based on the classic approach of VRP [43].

Theoretical Foundations

Classic VRP or travel salesman problem (TSP)

The OVP could be formulated as a classic VRP and it is a milestone in the theory of graphs. The problem statement can be presented as:

Definition 1: if there is a directional graph "G" given by (1) then there are a set of vertex "V" given by (2) and a set of borders "E" given by (3). Every border represents a distance between two vertexes and represents a cost [43]. The 0 (zero) vertex represents the central depot,

- (1) $G = \{V, E\}$
- (2) $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$
- (3) $E = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$

where: n is the total number of vertices and i, j are the address coordinates of every cell in the distance matrix of clients.

Several constraints exist in the classic VRP as is mentioned by [12]. However, in the OVRP model the constraint that returns to the central depot are eliminated [48]. Only one constraint is maintained, that is: Each city must be visited exactly once by one vehicle.

The complexity of this problem relies on that depending on the number of cities to visit; there are a factorial number of possible solutions given by (4). In [5] this is described as an NP-complete problem. To solve this problem, it is necessary to consider the exact location of the clients or nodes and the central depot.

$$(4) n!$$

The locations of the clients are equal to a coordinate system that provides a matrix of distances between clients of a size of $n \times n$ that is symmetric (5),

$$(5) X = \begin{bmatrix} 0 & 2 & \dots & i \\ 2 & 0 & \dots & 5 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j & 5 & \dots & i,j \end{bmatrix}$$

where: x_{ij} represents the distance between two clients.

The complexity of the VRP increases when more restrictions are applied also increasing the difficulty of its solution.

Some restrictions are:

Windows of Time.

Stochastic Demand

Collection and delivery.

Among others.

Dijkstra algorithm

1. Initialize (G, V)
2. Priority_Queue minQ = {all vertices in V}
3. While (minQ \neq 0) do
4. Vertex $u = \text{Extract Min}(\text{minQ}); // \text{minimum est}(u)$

5. for (each $V \in \min Q$ such that $(u, v) \in E$)
6. Relax (u, v)
7. End for
8. End while

Proposal

The proposal works with a hybrid model to solve the OVRP problem in phases. For the first phase it is required a method that produces the routes that needs to be evaluated in a second phase. This first phase consists of the use of an instance as the basis to generate the routes by the Evolutionary Strategy (ES). This instance serves as a parent in the ES to generate a series of new scenarios that represents the sons. As it is known the ES needs a model to evaluate the parents and sons to produce the values for the optimization phase. In the second phase type-1 singleton fuzzy logic system (T1 SFLS) model has been used to evaluate the routes (parents and sons) and obtain their cost because the T1 SFLS is not capable to produce their inputs. In this case, due to the distances does not change; the training phase is not an option to evaluate routes. T1 SFLS only is used as a classifier that produces a crisp value that represents the cost that needs to be minimized in the third phase to select the best individual by tournament selection in every generation, until the stop criteria are accomplished in the ES. The total cost of each generated route is optimized to be minimized by the evolutionary strategy in a third phase. For this approach the model of [12] has been adapted changing the ANFIS model to the T1 SFLS model for evaluation of the routes producing the hybrid model named as ES T1 SFLS.

It is remarkable that not all phases of the ES and T1 SFLS are used, i.e. training phase.

Instance

In the literature there are not specific instances for the OVRP model, there are only for the following models: CVRP, CVRPTW, CVRPPDTW, MDVRP, MDVRPTW, PVRP, and PVRPTW and VRPPD [15]. The proposal presents a developed instance using the shortest path model or Dijkstra algorithm presented in [16] and the data of Table 3, producing the novel instance shown in Table 4. This solution is used in conjunction with a couple of metaheuristics as benchmarks. The data matrix is 9X9 size.

Table 3. Distance Matrix

Customer	1	2	3	4	5
1	0	21.3	36	179	205
2	21.3	0	50.5	203	219

3	36	50.5	0	158	175
4	179	203	158	0	129
5	205	219	175	129	0

Table 4. Instance to benchmark

Path	Distance	Time spend
1 2 6 8 3 7 9 4 5	513.5	

Evolutionary strategy

ES is an algorithm used to optimize the solution of combinatorial optimization problems based on the theories of Charles Darwin [10] and Gregor Mendel [25]. The ES such as genetic algorithms are also denominated as hierarchical algorithms [19, 20 and 28], black box algorithms or evolutionary programming (EP). The first proposal of evolutionary strategies was exposed in a PhD. Thesis by [33].

1) 1+1 Evolutionary strategy

This algorithm consists in a parent with specific characteristics that varies through generations designed as x^t and is given by (6). This parent is a real number vector that is constrained by an objective function,

$$(6) P^t = a_1^t = x^t$$

where: P^t is the parent, a_2^t represents a son that is obtained by (7-8) with a parent mutation "m" (8) of the parent, and a_1^t represents an alternative solution for the problem,

$$(7) mP^t = a_2^t$$

$$(8) mP^t = RND(a_1^t)$$

where: RND is a recombination that produces the necessary mutation in the individuals to obtain the best individuals in the next generation.

Both individuals a_1^t and a_2^t are evaluated in a tournament selection for select the better individual that fits with the objective function (9) using the Hamming distance [13] as an example. Because the algorithm hasn't had a stop criterion the model is constrained to a specific number of cycles.

$$(9) x^{t+1} = \begin{cases} a_2^t & a_2^t > a_1^t \\ a_1^t & \text{otherwise} \end{cases}$$

Fuzzy logic T1 SFLS model

The fuzzy logic systems are proposed to improve and control some kind of processes [46 and 47]. There are three types of systems: 1) the type-1 fuzzy logic (T1 FL) whose owes its growth to [24] who developed the Fuzzy Logic Controller (FLC) which is the basis for all FLS. The T1 FL controller is assembled in four modules as a function of the variables. It contains a fuzzifier, the fuzzy rule base in the form of (10), the inputs, the inference evaluation module, and the defuzzifier that acts as a translator, 2) the type-2 used in data as being the vital input to model a systems containing a dissimilar level of imprecision, or lack of data and that needs different modeling approaches for a proper analysis of the problems such as presented in [11] and type-3 fuzzy that trend to attend and process the uncertainties that coming from the processes and measurements [8]. However, the type-1 FLS used in [31] shows some industrial applications in several fields of adaptive fuzzy control and optimization,

$$(10) \text{ Rule } n = \text{If } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n, \text{ then } y_n = B_n$$

where: X_n represents the fuzzy input variables, A_n represents the membership functions, Y_n represents the fuzzy output and B_n represents the crisp output.

1) Fuzzy implications

The Fuzzy implication is a combination of N rules that generates an output answer; the inference engine is operated by t-norm (11). That operator represents the "IF" part of the fuzzy rules, in the literature exists more operators of these types [18, 26 and 39],

$$(11) T[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \max \mu_{A \cup B}(x)$$

where: represents the membership of X_i (12) respectively at their fuzzy set A_i , T represents any t-norm (11), S represents any S-norm yields (13),

$$(12) \mu_{x_i} = \frac{e^{-(x_i - x_i')^2}}{2\sigma^2}$$

where: represents the membership value of X_i , X_i' represents the mean of the fuzzy set, X_i' represents the input and represents the standard deviation or the spread of the fuzzy set.

The fuzzy value for the output is generated by Supstar \boxtimes composition in according to the equation (13), [25 and 39]. This relation produces the fuzzy output for the overall system in the "IF" part by the product of all variables presented in the rule,

$$(13) \mu_{R \circ S}(x, z) = \sup_{y \in V} [\mu_R(x, y) \star \mu_S(y, z)] \quad S[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \min \mu_{A \cup B}(x)$$

where: \star denotes product, and represents the universe of the input variables and their relationships.

2) Fuzzy basis function

In [40] there is the Individual Base Inference (IBI) model which is the basis for this approach, in which every rule is generated by a combination of inputs and a single value is returned as a consequent. Every value represents a rule and every rule represents a fuzzy set. The assembly of FBF is composed by a combination of all fuzzy rules that are activated as shown in the equation (14). This is defined in [39] as:

$$(14) FBF = \frac{\sum_{j=1}^M \bar{z}^j (\prod_{i=1}^n \mu_i^j(x_i))}{\sum_{i=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_i^j(x_i))}$$

where: \bar{z}^j is the output for a point in the space R. represent the output for the rule: Ri, i=1, ..., j

3) ANFIS model or Neuro Fuzzy model

Basically the ANFIS model [18] is based on ANN conformed to five layers. The first layer produces the normalization of the inputs. The following three layers make the inference and are hidden. The fifth layer produces the output, as shown in Fig. 3.

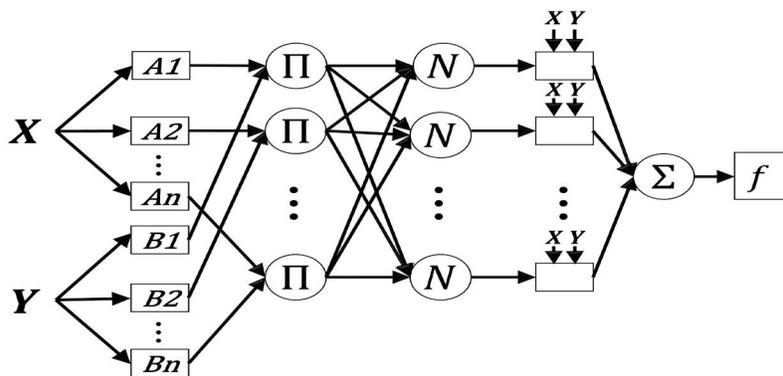


Figure 3. Neuro fuzzy system (T1 SANFIS) architecture, adapted from: [18].

The architecture of the T1 SANFIS model uses the fuzzification to normalize the inputs, later uses the implication by product as the T1 SFLS. Every neuron made a simple mathematical calculus, then the ANFIS system needs multiple neurons in multiple layers to be implemented.

Layer 1. This layer, get their normalized values of the inputs by fuzzification using (12). The firing of the rules depends in the dispersion of the fuzzy sets and are given by (15),

$$(15) \text{Rule } n: \text{ If } X_i \text{ is } A_i \text{ and } Y_i \text{ is } B_i, \text{ then } f(x, y) = f_n$$

$$(16) f_n = p_i x_i + q_i y_i + r_i$$

where: p, q and r, are the coefficients of the fuzzy rule.

$$(17) O_{1,i} = \mu_A(x), \text{ for } i = 1, 2, \dots, n$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-n}}(y),$$

$$(18) \text{ for } i = (n + 1), (n + 2), \dots, m$$

$$(19) \text{ gaussian } (x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2}$$

Layer 2, gets the weights for the ANN, also acts as implication and is given by (20),

$$(20) O_{2,i} = w_i = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y), \quad i = 1, 2$$

Layer 3, gets an output vector for every fired rule (21),

$$(21) O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2$$

Layer 4, gets the general output for the system and is equal to the output function on a Sugeno system (22) also, is equivalent to the FBF (14),

$$(22) O_{4,i} = \bar{w}_i f = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

Layer 5, represents the sum of the vector generated in layer four and is equivalent to the approximation function (23),

$$(23) O_{5,i} = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

Hybrid method

The proposed method is based in the use of the ES (1+1) to provide the best possible routes to a T1 SFLS. Evaluates the routes generated by the ES and later uses the same strategy (ES) is used to select the best route(s). The methodology used is as follows: Prepare and pass an array with all customers and their relations to a coordinate system in a matrix to get an address (Table 5). Assign to every variable their distance and their coordinates (Table 6). Create a list of clients, numbering every customer to generate the rule base for the fuzzy system.

Use the evolutionary strategy to generate a random parent with the list of clients (a priori route).

Run the evolutionary strategy

Evaluate the sums obtained by the strategy with the fuzzy system.
Select the best individual generated by the evolutionary strategy.

Table 5. Address matrix

<i>Customer</i>	0	1	...	i
0	00	01	...	i
1	01	11	...	i 1
...				
j	J	1j	...	i, j

Table 6. Distance matrix

<i>Customer</i>	0	1	...	i
0	0	2	...	i
1	2	0	...	5
...				
j	i	5	...	i, j

Simulation and analysis

To evaluate this proposal the MATLAB software was used for the modeling and simulation of the ant colony optimization (ACO), simulated annealing (SA) and the proposed ES T1 SFLS systems. These methods were compared against the Dijkstra algorithm [38 and 48]. ACO and SA were used in this experiment as a benchmark to evaluate the performance of this proposal.

The method of ACO was performed with an initial population of nine ants that travel across the distance matrix. The alpha and beta values were: 1 and 2 respectively, a gamma value of 0.9 and Q equal to 1 for the simulation tests.

In the SA algorithm the distance was obtained for every simulation iteration test (initial solution and obtained solution). If the permuted solution results better than the initial solution the mutation is made again with the best solution as the initial solution. Else, the Boltzman probability criterion is used to evaluate what is the best solution. The initial condition to run the SA model is an initial temperature of 100,000° and a final temperature of 0.00001°. In the case of the hybrid ES and T1 SFLS the condition or stop criteria is the number of individuals and generations of the evolutionary strategy. In this case several tests were performed as is shown in Table 7.

Table 7. Stop criteria for the ES T1 SFLS

<i>Test</i>	<i>Individuals</i>	<i>Generations</i>
1	5	2
2	10	2
3	20	2
4	20	8
5	50	8
6	100	8
7	300	8

VII. Discussion and Results

The results show that the average values obtained with the pure methods (ACO=976.8, SA=982.5) are too big in comparison with the Dijkstra algorithm (513.5). Also were compared with the hybrid proposal ES T1 SFLS with five individuals and two generations in average (616.6) and finally compared with the ES T1 SANFIS in average for five individuals and two generations (632.1). The proposed ES T1 SFLS is the best. The number in ES T1 SFLS and in ES T1 SANFIS means the population, individuals and the generations of the tested scenarios. In contrast the results obtained with the ES T1 SFLS model shown an average error of 5.61% in the scenarios performed.

The ES F1 SFLS show an average threshold between -17.4% and 20.1 % versus Dijkstra algorithm. In contrast the threshold for ES T1 SANFIS from 6% to 23.31% versus Dijkstra algorithm. As can be seen in the average error for ES T1 SFLS is 1.16% and for ES T1 SANFIS is 12.19 showing better performance the proposed ES T1 SFLS. The ES T1SFLS showed an improvement of 6% in the 20% of scenarios (scenarios 7, 8) versus Dijkstra algorithm as shown in Table 8. The minus sign in the error rates means an improvement in the different scenarios tested as is shown Fig. 4.

Table 8. Scenarios tested results

	<i>Method</i>			
	<i>ACO</i>	<i>SA</i>	<i>ES T1 SFLS</i>	<i>ES T1 ANFIS</i>
<i>S^a</i>		(5, 2)	(10, 2)	(5, 2) (10, 2)
1	907.2	1201.2	651.4	627.4 604 666

2	1361.0	1346.5	691.4	631.5	714.8	622.2
3	630.0	1164.9	599.6	646.3	664.1	627.1
4	1146.2	901.3	734.5	625.5	502.6	792.9
5	844.9	813.9	593.6	709.1	704.1	591.5
6	1169.7	995.9	634.7	608.2	606.8	606.6
7	1257.4	839.5	479.8	485.6	633.3	570.5
8	1085.9	581.6	481.4	525.6	693.9	565.5
9	576.0	787.8	666.9	600.3	543.1	542.8
10	790.2	1193.2	632.6	641.7	654.6	698.5

a S represents the evaluated scenario

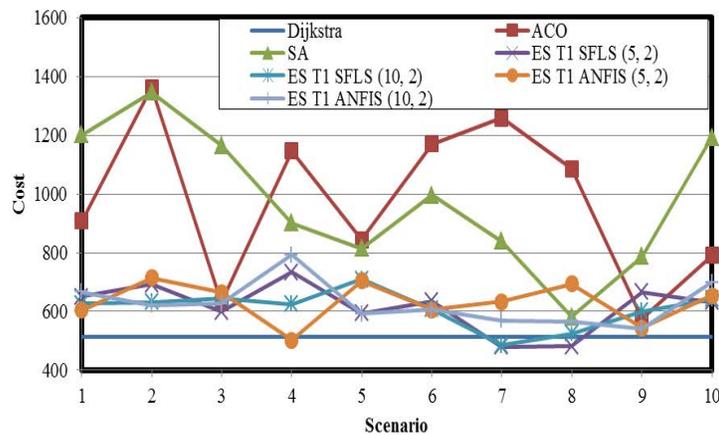


Figure 4. Distribution of techniques related to artificial intelligence.

In Fig. 5 can be seen that the error rates using the proposal ES T1 SFLS generated better results in every scenario versus the metaheuristics SA and ACO in the additional tests. Also, the scenarios 7 and 8 show better results than the Dijkstra model.

Table 9. Performance of methods vs. Dijkstra algorithm (error in %)

<i>Method</i>					
<i>ACO</i>	<i>SA</i>	<i>ES T1 SFLS</i>		<i>ES T1 ANFIS</i>	
		<i>(5, 2)</i>	<i>(10, 2)</i>	<i>(5, 2)</i>	<i>(10, 2)</i>

Scenario	1	0.767	1.339	0.269	0.222	0.176	0.296
	2	1.650	1.622	0.346	0.230	0.392	0.211
	3	0.227	1.269	0.168	0.259	0.293	0.221
	4	1.232	0.755	0.430	0.218	-0.021	0.544
	5	0.645	0.585	0.156	0.381	0.371	0.151
	6	1.278	0.939	0.236	0.184	0.181	0.181
	7	1.449	0.635	-0.066	-0.054	0.233	0.111
	8	1.115	0.133	-0.063	0.024	0.351	0.101
	9	0.122	0.534	0.299	0.169	0.057	0.057
	10	0.539	1.324	0.232	0.250	0.274	0.360

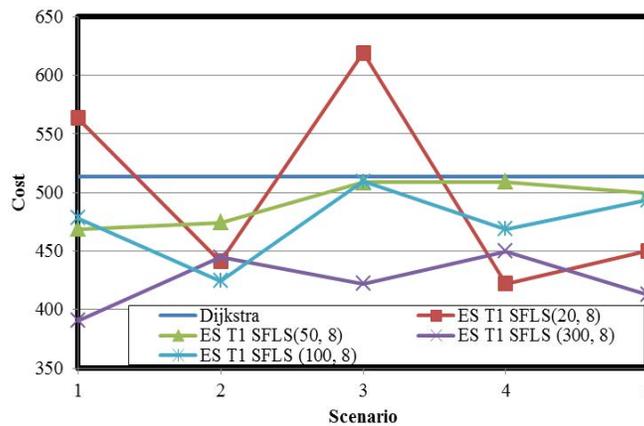


Figure 3. Error rates (%) versus Dijkstra model

Additional tests were performed with the ES T1 SFLS and ES T1 SANFIS to verify their improvement with the initial conditions. The results obtained are shown in table X, where the proposed model shows better results in ES T1 SFLS versus the ES T1 SANFIS, SA, ACO and Dijkstra models, in 18 of 20 tests with reductions near by 20%. The cost in the best case spend only 47 seconds in the creation of the route for the las case (300, 8) and only 0.3 seconds in the (5, 2) case (Fig. 6).

Table 10. Additional scenarios tested of ES T1 SFLS

S ^a		1	2	3	4	5
ES T1 SFLS	(20, 8)	563.4	441.1	619.3	422.3	450
	(50, 8)	468.7	474.4	508.8	509.1	499.3
	(100, 8)	478.4	424.7	509.6	468.6	493.7
	(300, 8)	390.6	444.7	422.3	449.8	412.5
ES T1 ANFIS	(20, 8)	586.8	468.6	505.8	500	417.7
	(50, 8)	569.8	499.7	471	470.6	480
	(100, 8)	470.5	483.7	486.8	491.7	480.4
	(300, 8)	416.6	444.5	445.8	416.4	448.6

a S represents the evaluated scenario

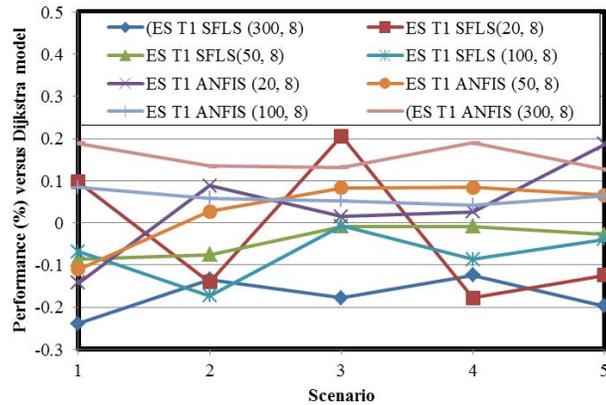


Fig. 4. Additional test scenarios of ES T1 SFLS and T1 ANFIS to evaluate their performance

Table 11, shows that the proposal (ES T1 SFLS) produces an error reduction and also an improvement from -23.9% to 14.3%, including the complementary tests. On the other hand, ES T1 SANFIS shows an error from -14.3% to 18.9% (Fig. 7). The computational time spent in the simulations is shown in table XII and depicted in Fig. 8.

Table 11. Performance of the ES T1 SFLS method vs. Dijkstra algorithm (error in %)

	S ^a	1	2	3	4	5
T1 SFLS	(20, 8)	0.097	-0.141	0.206	-0.178	-0.124
	(50, 8)	-0.087	-0.076	-0.009	-0.009	-0.028
	(100, 8)	-0.068	-0.173	-0.008	-0.087	-0.039
	(300, 8)	-0.239	-0.134	-0.178	-0.124	-0.197
T1 ANFIS	(20, 8)	-0.143	0.087	0.015	0.026	0.187
	(50, 8)	-0.11	0.027	0.083	0.084	0.065
	(100, 8)	0.084	0.058	0.052	0.042	0.064
	(300, 8)	0.189	0.134	0.132	0.189	0.126

a S represents the evaluated scenario

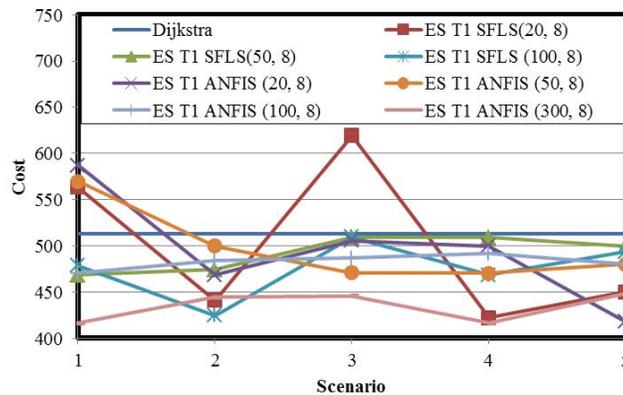


Fig. 5. Performance with more individuals and more generations of optimization on ES T1 SFLS and ES T1 ANFIS

Fig. 8 shows the computational time spend in the different models tested and can be seen that the time consumed is so similar to ACO, ES T1 SFLS (10, 2), SA and ES T1 SFLS (5, 2) results. The most important advantage of the ES T1 SFLS is the reduction error

rate versus Dijkstra model, with a proportion of 4.5 times less in ES F1. If it is used a time between 4 seconds and 47 seconds to generate the route with the ES T1 SFLS, then it can generate costs with the better results than provided by Dijkstra model between 2.5% and 17% (Fig. 7).

Table 12. Average computational time spends (sec.) and error in the simulation.

Method		Time (S)	Average Error
ACO		0.966	90.2 %
SA		0.409	91.3 %
EST1SFLS	(5, 2)	0.318	20.1 %
EST1 SFLS	(10, 2)	0.595	18.8 %
EST1 SFLS	(20, 8)	4.51	-2.8 %
EST1 SFLS	(50, 8)	7.82	-4.2 %
EST1 SFLS	(100, 8)	15.67	-7.5 %
EST1 SFLS	(300, 8)	47.16	-17.4 %
EST1ANFIS	(5, 2)	0.767	23.1 %
EST1 ANFIS	(10, 2)	1.254	22.36 %
EST1 ANFIS	(20, 8)	3.68	3.4 %
EST1 ANFIS	(50, 8)	8.605	2.9 %
EST1 ANFIS	(100, 8)	16.809	6.0 %
EST1 ANFIS	(300, 8)	52.076	15.4 %

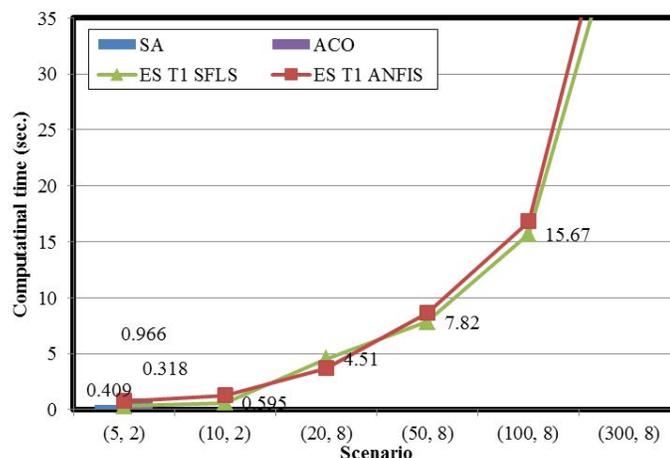


Fig. 7. Computational time spend in scenarios tested. Comparison of models

Conclusions

The experimental results show that the hybridized fuzzy model with the evolutionary strategies present better results than metaheuristic models such as: ACO, and SA under the same experimental conditions. Comparisons between the ACO model with nine ants against the ES T1 SFLS with 10 individuals (5 per generation) present an enhancement in the solutions with a reduction of error from 90.2 % to 20.1 %, representing a 70 % of savings in the route cost.

To repeat the similar conditions with the SA model, the ES T1 SFLS method has been tested with 20 individuals and 8 generations, the same number of individuals was obtained (192 for SA and 170 for ES T1 SFLS) and the enhancement of the model is 94.1% in the route cost. Also, the simulation with the ES T1 SFLS has shown an enhancement of 2.8% on savings in comparison against the Dijkstra model.

The metaheuristic algorithm of ACO is restricted to the classical constraint of not having more ants than the possible starts or nodes in the net or Hamiltonian path. In the Traveling Salesman Problem (TSP) the ACO model does not have more ants than cities in the route. This happens because a limited number of ants, less than the cities in TSP cause the evaporation of the pheromone and the solutions could not be enhanced, and on the other hand, with more ants than cities the pheromone concentration produces a route selection that gives a local solution or non-optimal solution.

The iterative algorithms such as metaheuristics and expert systems such as the proposal (ES T1 SFLS) shows a precision of 79.9% in worst case (5, 2) or the benchmark (ES T1 SANFIS) show precision of 76.9% in worst scenario. The model such artificial neural networks shows a precision near to the 80% are considered as acceptable and precise models [2].

The ES T1 SFLS in the model of (20, 8) in the same conditions of ACO and SA show an enhancement versus Dijkstra algorithm of -2.8% is to say is better than the shortest path algorithm. The ES T1 SANFIS do not show an improvement versus Dijkstra algorithm with a minimum error of 3.4 % or 96.6% of precision.

The computational time presents a significant error reduction in comparison with the metaheuristic models tested. Also, presents better results than the shortest path model or Dijkstra model.

The computational time spend on the solution is not relevant in contrast with error reduction in every test of ES T1 SFLS. The use of 5 seconds or 50 seconds in the worst case is not a waste of time because it is saved more 90 % than the metaheuristics and more than

2.8% than the Dijkstra model. This reduction and saving is worth it in contrast to the cost enhancement near to the 100%.

References

- Z. H. Ahmed & M. Yousefikhoshbakht, "An improved tabu search algorithm for solving heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem with time windows," *Alexandria Engineering Journal*, September 2022.
- J. A. Anderson, *Redes Neurales*. Alfaomega, 2007.
- M. Ashouri & M. Yousefikhoshbakht M. "A Combination of Meta-heuristic and Heuristic Algorithms for the VRP, OVRP and VRP with Simultaneous Pickup and Delivery," *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, vol. 8, no. 2, pp. 81-95, 2017.
- J. Bauer, J. Lysgaard, "The offshore wind farm array cable layout problem: a planar open vehicle routing problem," *Journal of Operational Research Society*, vol. 66, no. 3, pp. 360-368, 2015.
- K. Braekers, K. Ramaekers, Inneke Van Nieuwenhuysse. "The vehicle routing problem: State of the art classification and review," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 99, pp. 300–313, 2016.
- J. Caceres-Cruz, P. Arias, D. Guimarans, D. Riera & A. A. Juan, "Rich vehicle routing problem: Survey," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 47, no. 2, pp. 1-28, 2014.
- Cao., M. Lai., H. Yang, "Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 7, pp.3569-3575, 2014.
- O. Castillo, J. R. Castro & P. Melin, "Forecasting the COVID-19 with Interval Type-3 Fuzzy Logic and the Fractal Dimension," *International Journal of Fuzzy Systems*, pp. 1-16, 2022.
- G.B. Dantzig and J.H. Ramser. "The truck Dispatching Problem", *Managements Science*, Vol 6, No. 1, pp. 80-91, 1959.
- C.R.Darwin, *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. 1st edn. John Murray: London, 1859.
- P. N. M. Dorantes and G. M. Méndez, "Type-2 Fuzzy Logic Systems for Temperature Evaluation in Ladle Furnace," *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 14, no. 8, pp. 3914-3920, 2016.
- P. N. M. Dorantes, P. H. Ireta Sánchez, J. M. Velarde Cantú, E. Liñán García, G. M. Méndez, "Design and optimization of Distribution Routes Using Evolutionary strategy and Type-1 Singleton Neuro-fuzzy systems," *IEEE latin america transactions*, vol. 16, no. 5, pp.:1499-1507, 2018.
- S. Droste, T. Jansen, I. Wegener. "On the analysis of the (1 + 1) evolutionary algorithm," *Theoretical Computer Science*, vol. 276, pp. 51–81, 2002.
- Faiz, S. Subiyanto & U. M. Arief, "An efficient meta-heuristic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem," *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, vol. 4, no. 3, pp. 212-225, 2018.
- C. Y. R. Huang, C. Y. Lai & K. T. T. Cheng, *Fundamentals of algorithms*. In *Electronic design automation*, Morgan Kaufmann, 2009, pp. 173-234.

- N. De Jaegere, M. Defraeye & I. Van Nieuwenhuysse. FEB Research Report KBI_1415. "The vehicle routing problem: state of the art classification and review". 2014.
- R.S. Jang, C. Sun, E. Mizutani. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. 1997.
- H., Kamarthi & K. Krishnan, "Hierarchical Genetic Algorithms with evolving objective functions," 2018, arXiv preprint arXiv:1812.10308.
- J. E. Lara-Ramirez, C. H. Garcia-Capulin, M. D. J. Estudillo-Ayala, J. G. Avina-Cervantes, R. E. Sanchez-Yanez, & H. Rostro-Gonzalez, "Parallel hierarchical genetic algorithm for scattered data fitting through B-splines," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 11, pp. 2336, 2019.
- X., Li & P. Tian, "An ant colony system for the open vehicle routing problem". In *International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*. pp. 356-363. Springer, Berlin, Heidelberg. 2006.
- Y. Li, H. Soleimani, & M. Zohal, "An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives," *Journal of cleaner production*, vol. 227, pp. 1161-1172, 2019.
- L. C. Luna López, *Localización de paradas y diseño óptimo de rutas para transporte de personal* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León), 2015.
- H. Mandami, S. Assilian, "Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp.1-13, 1975.
- G. Mendel, *Versuche über Pflanzenhybriden*. Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn, Bd. IV für das Jahr, Abhandlungen, pp. 3-47, 1865,.
- J. M. Mendel. *Uncertain rule-based fuzzy systems. Introduction and new directions*, Springer. 2017.
- R. Moghdani, K. Salimifard, E. Demir & A. Benyettou, "The green vehicle routing problem: A systematic literature review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, 123691, 2021.
- S. K. Nayak, P. K. Rout, & A. K. Jagadev, "Multi-objective clustering: a kernel based approach using Differential Evolution," *Connection Science*, vol. 31, no. 3, pp. 294-321, 2019.
- K. K. Ng, C. K. M. Lee, S. Z. Zhang, K. Wu, & W. Ho, "A multiple colonies artificial bee colony algorithm for a capacitated vehicle routing problem and re-routing strategies under time-dependent traffic congestion," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 109, pp. 151-168, , 2017.
- Y. Niu, Z. Yang, P. Chen & J. A. Xiao, "Hybrid Tabu Search Algorithm for a Real-World Open Vehicle Routing Problem Involving Fuel Consumption Constraints," *Complexity*, 2018.
- R. E. Precup, S. Preitl, E. Petriu, C. A. Bojan-Dragos, A. I. Szedlak-Stinean, R. C. Roman & E. L. Hedrea, "Model-based fuzzy control results for networked control systems," *Reports in Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 10-25, 2020.
- M. Puspita, A. S. Simanjuntak, R. Melati, & S. Octarina, "Demand robust counterpart open capacitated vehicle routing problem time windows and deadline model of garbage transportation with LINGO 13.0," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 6380-6388, 2020.

- I. Rechenberg, *Evolutionsstrategie, Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart: Frommann Holzboog, 1973.
- L. F. Shen Tao & S. Wang, "Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Carbon Trading," *International journal of environmental research and public health*, vol. 15, no. 9, pp 2025, 2018.
- Supithak & W. Supithak "Determination of inventory replenishment policy with the open vehicle routing concept in a multi-depot and multi-retailer distribution system," *Engineering and Applied Science Research*, vol. 45, no. 1, pp. 23-31, 2018.
- M. A. Takan, & R. Kasimbeyli, "Multiobjective mathematical models and solution approaches for heterogeneous fixed fleet vehicle routing problems," *Journal of Industrial & Management Optimization*, vol. 17, no. 4, pp. 2073, 2021.
- R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Meskini, H. Nasserli, & H. Tavakkoli-Moghaddam, "A multi-depot close and open vehicle routing problem with heterogeneous vehicles," In 2019 international conference on industrial engineering and systems management (IESM) (pp. 1-6). IEEE, 2019.
- G. S. Torrubia & V. Terrazas, "Algoritmo de Dijkstra. Un tutorial interactivo," VII Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática (JENUI 2001), 2012.
- L.X. Wang and J.M. Mendel, "Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation, and Orthogonal Least-Squares Learning," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 3, no. 5, pp. 807-814, 1992.
- L.X. Wang. *A Course in Fuzzy Systems and control*, Prentice Hall. 1st. Edition. 1996.
- Y. Xia & Z. Fu, "Improved tabu search algorithm for the open vehicle routing problem with soft time windows and satisfaction rate," *Cluster Computing*, vol. 22, no. 4, pp. 8725-8733, 2018.
- Y. Xia & Z. Fu, "An adaptive tabu search algorithm for the open vehicle routing problem with split deliveries by order," *Wireless Personal Communications*, vol. 103, no. 1, pp. 595-609, 2018.
- Xiangyong Li, Peng Tian, Stephen, C.H. Leung, "Vehicle routing problem with time Windows and stochastic travel and service times," *Int. J. Production Economics*, vol. 125, no. 1, pp. 137-145, 2010.
- M. Yousefikhoshbakht, F. Didehvar & F. Rahmati, "A mixed integer programming formulation for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem," *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 8, no. 18, pp. 37-46, 2015.
- S. Yu, C. Ding, K. Zhu. "A hybrid GA-TS algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material". *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 8, pp. 10568-10573, 2011.
- L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I," *Information Sciences*, vol. 8, pp. 199-249, 1975.
- H. Zhang, H. Ge, J. Yang, & Y. Tong, "Review of vehicle routing problems: Models, classification and solving algorithms," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 195-221, 2022.

PROCESOS DE FABRICACIÓN

La gestión de los residuos urbanos para la creación de organizaciones para abastecimiento de materiales recuperados

Juan José Méndez Palacios
Tecnológico Nacional de México/IT Querétaro

Resumen— *El incremento de la cantidad de desechos urbanos y su potencial reutilización, ha dado una importancia a la aplicación de la logística inversa para contribuir en la creación de organizaciones dedicadas a procesar estos productos. Este artículo muestra los conceptos de logística inversa y las operaciones que integran la cadena de suministro inversa para la generación de valor con productos desechados. Esta cadena de suministro inversa, parte de la recolección en los puntos de colocación del producto desechado y pasar por procesos de limpieza y almacenamiento para finalmente distribuirse como materia prima. Esta es una estructura diferente a cadena de suministro convencional, y su cadena de valor comprende la valorización de una serie de actividades relacionadas que inciden en lograr la productividad.*

Se describe la importancia de estudiar el flujo de retorno de productos, considerando el valor logístico que generan. Se muestran las oportunidades de establecer organizaciones que desarrollen las operaciones en la cadena de suministro inversa o de retorno, la metodología parte de una aproximación teórica para conocer en que consiste el flujo inverso y se plantea ejemplos de productos que en la actualidad se manejan en el flujo de retorno, donde se muestra un estudio de caso relacionado con la comercialización a centros de acopio de productos usados.

Finalmente se destaca la importancia de estudiar este tipo de integración empresarial basada en los conceptos de valor logístico, y de operaciones logísticas, para atender las oportunidades que la problemática del manejo de residuos urbanos ofrece para la gestación de empresas relacionadas con las alternativas de utilización de los productos desechados, así como contribuir a las políticas medioambientales.

Palabras Clave—Desecho, logística inversa, cadena de suministro inversa, residuos, Valor logístico.

Introducción

La alta densidad población y por ende el consumo de productos generado ha generado un alto interés por buscar formas de hacer el flujo de retorno de productos desechados generado por el consumismo en las zonas urbanas, esta situación ha dado a la logística inversa un nivel de importancia alto, en lo referente a los procesos de reutilización de los materiales del producto o incluso del mismo producto.

Este enfoque operativo derivado de la logística inicia en la década de los años setenta, dónde se inicia con el análisis de la estructura operativa de las cadenas de suministro para el reciclaje, los actores que participan en estas, las nuevas funciones que se han generado, etc. En los años noventa se estudian con mayor profundidad los procesos relacionados con la gestión de los productos fuera de uso y los sistemas logísticos asociados, [7].

Los motivos por los que se ha incrementado los estudios relacionados con las operaciones de la logística inversa aplicada al manejo de desechos en ciudades son: el aumento exponencial de los productos retornados, la búsqueda de ingresos en su manejo mediante la venta de éstos materiales en los mercados secundarios, las estrategias para atender un mayor número de devoluciones a los fabricantes por finalización de la vida útil de los productos ya consumidos, las normas que buscan beneficiar el medio ambiente propiciado por los sectores sociales sobre las empresas que las responsabilizarlas de la eliminación de los productos que contienen residuos peligrosos y, como efecto del alto consumo por la gran densidad poblacional ha generado que la capacidad de los vertederos o basureros ha llegado a ser limitada y su gestión costosa.

El presente artículo tiene como objetivo mostrar una aproximación en cuanto al valor logístico que apoye a comprender la forma de gestar organizaciones productivas basadas en la recuperación de residuos urbanos utilizando los principios de la logística inversa.

Antecedentes

Espiritualización de la logística inversa para el tratamiento de desechos urbanos

Revisando a los autores que han mostrado estos conceptos, se destacan los siguientes: La Logística Inversa consiste en el proceso de planificación, ejecución y control de la eficiencia y eficacia del flujo de las materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada, desde el punto de consumo hasta el punto de origen, con el fin de recuperar valor o la correcta eliminación [9] y [10]. Considerando los puntos de origen el consumidor que desecha el producto por terminar de usarlo. Sin embargo, ya sea componente de un sistema, o contenedor de un producto, como material tiene un valor que se pretende recuperar.

La Logística Inversa integra actividades relacionadas con el manejo y gestión de equipos para la recuperación de productos, componentes, materiales o incluso sistemas técnicos completos[1]. No solo es el manejo del flujo de materiales de retorno, sino establece las actividades que se desarrollan para convertir el desecho en materia prima que pueda ser incorporada a un proceso de fabricación. Es así como la Logística Inversa supone integración de los productos usados y obsoletos de nuevo en la cadena de suministro como recursos valiosos [3].

En la Logística Inversa se desarrollan las operaciones de reutilización de productos y materiales incluyendo la recolección, desensamblaje y procesamiento de materiales: productos usados, y/o sus partes, para asegurar una recuperación ecológica sostenida [4], de acuerdo a la responsabilidad social y ambiental que se busca en beneficio de los habitantes de la ciudad.

Es así como la Logística Inversa refiere al control de flujos de materiales desechados cuya cadena de suministro inverso parte del punto de desecho y la recolección de éstos, realizando operaciones como: transporte, procesos de clasificación y acondicionamiento de los materiales, y finalmente distribuirlos como materia prima a clientes.

Entonces las operaciones de la Logística Inversa para el manejo de desechos son: Retorno de excesos de inventario, Devoluciones de clientes, Manejo de productos obsoletos y Gestión de inventarios sobrantes de demandas estacionales, etc.,

Que incluye las actividades de retirada y/o recolección, clasificación, reacondicionamiento y reenvío al punto de venta o a otros mercados secundarios.

La aplicación de la Logística Inversa ha permitido que los diseños del producto se adelanten a su fin de vida por el usuario, y así darle salida hacia mercados con mayor rotación, donde las actividades a realizar pueden ser las siguientes:

- Reparación, darle una calidad menor que los productos nuevos
- Renovación, proporcionarle una calidad específica
- Reciclaje, recuperar sus características para volver a ser utilizado,
- Canibalización, mediante destrucción del producto recuperar un conjunto de partes reutilizables para otros productos,
- Reutilización directa, sólo limpiarlo y cambiar algunas partes del mismo por nuevas, y no requiere ninguna transformación,
- Destrucción del producto, o enviarlo o venderlo a un tercero que lo procese,
- Vertido o desechado, al no tiene reutilización alguna se desecha
- Restauración, donde se busca conservar la identidad del producto, aunque no sea nuevo, y

- Refabricación, dónde se utilizan componentes del producto retornado que pueden usarse para fabricar un nuevo producto.

Las principales características de las cadenas inversas son:

- En las cadenas de suministro inversas es difícil de predecir la cantidad y calidad de los productos a reprocessar.
- Las cadenas de suministro inversas, requieren de inspeccionar los materiales, para observar su posible reconversión, por lo que éstas son más complejas.
- El número de orígenes de las cadenas de suministro inversas, suelen ser más numerosos que el número de puntos de suministro en logística directa, por la cantidad de productos desechados requeridos para los diversos procesos.

La importancia de la gestión de residuos urbanos

La secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales del gobierno mexicano, en su Programa Sectorial del Medio Ambiente y Recursos Naturales, destaca la preocupación de los residuos a lo largo de su ciclo de vida, dónde en el caso de los residuos urbanos, los residuos reciclables se recuperan 417 toneladas de 6472 toneladas potencialmente recuperables, lo que representa el 6 %.

También este informe muestra que en México hay ausencia de capacidades para generar esquemas financieros autosustentables para el manejo de los residuos y el bajo nivel de profesionalización de los recursos humanos son factores clave que deben ser atendidos para ayudar en la solución de la problemática, de ahí la importancia de gestar empresas locales para el manejo de desechos y su reincorporación a cadena de valor.

Por otra parte, se establece que trabajar con las comunidades también será fundamental para poder generar una sinergia positiva con los tres órdenes de gobierno y asegurar así mejores prácticas de recolección, reciclaje y disposición de los residuos. Aspectos que se resaltan en este estudio.

La ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, publicada en el Diario Oficial de la Federación, define en el artículo 5 numerales XXIX, XXXIII y XXXIV lo siguiente:

Residuo: Es el material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final

Residuos Sólidos Urbanos: Aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los

productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos

Responsabilidad Compartida: Donde se reconoce que los residuos sólidos urbanos y de manejo especial son generados a partir de la realización de actividades que satisfacen necesidades de la sociedad, mediante cadenas de valor tipo producción, proceso, envasado, distribución, consumo de productos, y que, en consecuencia, su manejo integral es una corresponsabilidad social y requiere la participación conjunta, coordinada y diferenciada de productores, distribuidores, consumidores, usuarios de subproductos, y de los tres órdenes de gobierno según corresponda, bajo un esquema de factibilidad de mercado y eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social.

Por otra parte, el Programa Sectorial del Medio Ambiente y Recursos Naturales, establece que el Desarrollo sustentable es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras

Los aspectos anteriores hacen destacar el uso de la logística inversa de acuerdo a las siguientes razones:

1. *Económicas* (directa e indirecta): Establece las acciones de recuperación donde la empresa tiene una intervención directa o indirecta de beneficios económicos (ya sea en la disminución de costos, el uso de menos materiales para producción o en la obtención de partes de repuesto importantes)

2. *Legales:* Los beneficios no son inmediatos, donde la logística inversa es una estrategia para cumplir con la legislación ambiental, y al usar tecnologías para los procesos de recuperación de desechos puede disuadir a otras compañías para entrar a competir al mercado, o en su caso ofrecer elementos clave a una nueva empresa para que apoye al cumplimiento de la normatividad ambiental.

3. *Responsabilidad social:* Una empresa que tiene una buena imagen ambiental puede incrementar su participación en muchos mercados, ya que esta imagen crea vínculo fuerte con el cliente por la conciencia ambiental que permea en la sociedad.

De lo anterior destaca que la Logística Inversa puede ser un mecanismo para el aprovechamiento de residuos, como lo destaca la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos en el artículo 5 inciso II:

Aprovechamiento de los Residuos: Conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar el valor económico de los residuos mediante su reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales secundados o de energía;

Metodología utilizada

Esta investigación tiene un enfoque cualitativo, de carácter descriptivo donde se analizan y caracterizan las prácticas de la logística inversa que aplican las empresas para el retorno de desechos (basura) y su reintroducción a las cadenas de suministros. Se emplean los métodos teóricos histórico-lógico, analítico-sintético e inductivo-deductivo, para interpretar las prácticas organizacionales que aplican a la logística inversa en la comercialización de desechos.

Las investigaciones cualitativas [6] se basan más en una lógica y proceso inductivo que consiste en explorar y describir, y finalmente generar perspectivas teóricas.

El artículo, muestra la forma en que se establece el Valor Logístico en un proceso de logística inversa aplicado a la recuperación de residuos urbanos de manera genérica, donde todos los factores que intervienen en la cadena de suministro inversa han sido analizados e integrados destacando los actores que ahí participan, desde la recogida de materiales o productos en desuso hasta su entrega a un centro de acopio.

La interacción de los factores que se realizan en la logística inversa se muestra en el siguiente modelo que fue la guía para la investigación.

Se realizó una entrevista con agentes involucrados en los centros de acopio: La 33 y Calixto, ubicadas en la ciudad de Querétaro, Qro. México. Ambas reciben productos desechados de latas de aluminio y envases de Pet, donde se realizaron preguntas guía recabando la siguiente información:

Reciben las latas aplastadas y pagan \$52.00 el kilo. Ellos lo venden a empresas fundidoras en cantidades mínimas de 500 kg, por entrega. Cada kilo de lata equivale en promedio a 65 piezas. El costo de abastecimiento, lo consideran implícito en el pago por kilo de lata.

En el caso de la botella de Pet, el centro de acopio lo recibe comprimido y lo separa por colores y lo limpia. Lo comercializa en cantidades de 1.5 toneladas a empresas procesadoras.

En los dos casos se describió el proceso de recolección de los materiales y los procesos que se llevan a cabo antes e recibirlos.

A partir de esta información se establece el modelo de las operaciones de logística que se lleva a cabo para este aprovisionamiento y que se muestra a continuación.

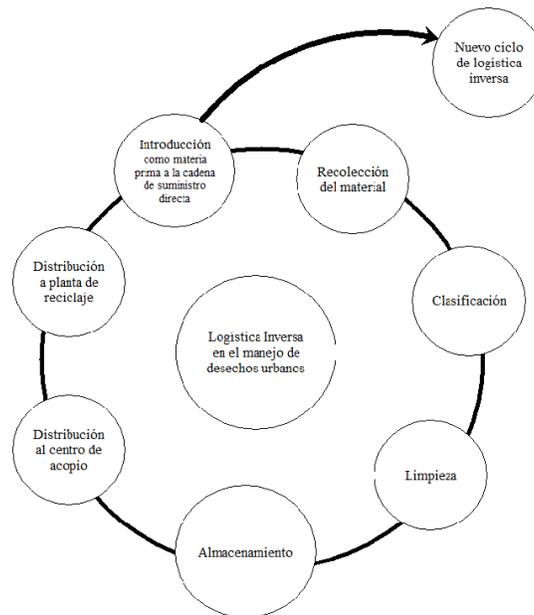


Figura 1. Modelo de las operaciones de logística inversa para la recuperación de materiales de los desechos sólidos urbanos

Fuente: Diseño propio

La figura 1, muestra lo siguiente:

Recolección. Actividad que se realiza una vez que existe el producto desechado por el consumidor, en el ámbito urbano lo realiza el servicio de limpia (camión de la basura) al recoger la basura clasificada por el ciudadano, también la realizan personas, conocidas como pepenadores, que buscan los desechos en los contenedores para basura colectiva ubicados en la ciudad.

Clasificación. Consiste en la revisión y en su caso seleccionar los productos que tienen factibilidad de ser reciclados, esto lo realizan en el basurero personal contratado para ello y en cuanto al pepenador, él lo realiza en su hogar.

Limpieza. En esta acción se limpia el producto para que no tenga residuos sólidos, en el caso de los envases, también que no esté mezclado con otros productos.

Almacenamiento. Se realiza en un espacio donde los materiales son resguardados, para ello el producto debe estar acomodado en contenedores tales como costales de yute o plástico, en algunos casos ya fueron procesados, como los envases que son comprimidos.

Distribución al Centro de Acopio. Es una empresa que compra los materiales a cierto volumen y peso, en la mayoría de los casos desde un kilo en adelante. Esta organización depende de la recolecta del pepenador, o de otras empresas que le venden sus desechos, tales como restaurantes, o empresas terciarias que recolectan y venden los desechos. El centro de acopio compacta los materiales para su mejor distribución.

Distribución a la planta recicladora. Los materiales del centro de acopio se venden a la empresa recicladora, que junto con los que adquiere de los vertederos (basureros) los procesa al darles una limpieza final, los transforma de acuerdo a los requerimientos de las empresas que fabrican productos nuevos. La transformación consiste en fundir los materiales metálicos para convertirlos en lingotes, o triturar el plástico para hacer hojuela o polvo.

Después se introducen como proveedores de cadenas de suministros convencionales.

Clasificación general de materiales de desecho

La siguiente tabla, muestra una clasificación general de los materiales de desecho que puede encontrar un recolector en su trabajo diario y a partir de la cual puede hacer una separación.

Tabla 1. Clasificación actual de materiales de desecho

CLASE	PRODUCTOS
Materiales Suaves	Cartón, revistas, archivo y periódicos
Madera	Tarimas, contenedores, escritorios y sillas
Pet (plástico suave)	Nylon, rafia, manguera
Pet (plástico duro)	Sillas, cubetas, botes
Pet (plástico de color)	Aceite, cloro
Pet (plástico verde)	Sangría, squirt, pinol
Cristales	Vasos y envases
Chatarra	Plomo, aluminio, lata, bronce, cobre, acero inoxidable
Perecederos	Bebidas, alimentos, medicinas

Fuente: Entrevista al recolector. Diseño Propio

Los sistemas de abastecimiento de los materiales recuperados

En la práctica, se distinguen dos sistemas de abastecimiento de los materiales recuperados en cadenas de logística inversa. Ambos, parten del mismo punto al que se ha decidido llamar desecho y que terminan al llegar con el producto convertido en materia prima a la planta de reciclaje.

El primero de ellos, es principalmente operado de forma empírica, debido a que no hay tecnificación, registros, tecnología, ni una debida preparación en el manejo de los residuos y mucho menos en lo referente a cuidados ambientales. Comienza con la figura del pepenador, a quien en lo sucesivo se le llamará recolector. El recolector, es un personaje dedicado a recorrer la ciudad en busca de materiales desechados que le pueden servir de materia prima previo tratamiento. Una vez que encuentra esta, procede a realizar la operación de recogida de los materiales.

Después, hace un proceso de clasificación y limpieza en su casa para entregar a la siguiente etapa un producto libre de impurezas u otros materiales.

La siguiente etapa es la venta de los materiales al centro de acopio que es donde le compran el producto ya clasificado y limpio.

Los centros de acopio, como su nombre lo indica reúnen grandes cantidades de productos de desecho diferentes y que una vez llegan a ciertas cantidades establecidas en toneladas son trasladados a las plantas recicladoras, las cuales ya no ven estos productos como desechos o basuras, sino como materias primas que habrán de convertirse en el abasto de empresas fabricantes y es donde se ha encontrado que ahora cambia su nombre a materia prima. La figura 2, muestra los elementos intervinientes en este primer sistema.



Figura 2. Sistema de abastecimiento de materiales recuperados

Fuente: Diseño propio

El segundo subsistema, trabaja de una manera formalizada, existen más controles, tecnificación y registros estadísticos; pues depende del gobierno y por ende intervienen otros entes o dependencias.

Este subsistema de igual forma parte de los desechos, solo que en este caso quien hace la recogida es el camión recolector que en su ruta pasa a los contenedores, botes de basura ubicados en postes y a los diferentes puntos de concentración donde el consumidor deposita su basura o materiales de desecho.

Posteriormente, hace el traslado al relleno sanitario, donde se efectúan las operaciones de clasificación y concentración para después acudir al lugar de acopio donde el volumen

de producto se hace mayor, hasta que se lleva a la planta de reciclaje. La figura 3, ilustra al respecto los componentes de este segundo subsistema.



Figura 3. Sistema de abastecimiento de materiales recuperados

Fuente: Diseño propio

Este subsistema como se ha dicho, puede proporcionar indicadores, debido a que al ser más estructurado y controlado permite estructurar información estadística.

Por otra parte, se puede apreciar que ambos caminos convergen finalmente cuando llegan a la planta recicladora. Lo interesante a resaltar es cómo lo que en un momento se consideró como desecho y sin valorización alguna, va entrando en una cadena de valor inversa, donde en cada operación se agrega valor a lo que más adelante se le considera como producto o materia prima que se integra ahora a la cadena de suministro a través de las plantas de reciclaje. Esto se ve en la figura 4 que se presenta a continuación:



Figura 4. Sistemas de abastecimiento de materiales recuperados

Fuente: Diseño propio

Los colores que se muestran buscan hacer visual el proceso de transformación donde rojo pertenece al concepto de desecho y verde es ya el concepto materia prima. En Querétaro [8], se tienen registrados los siguientes centros de acopio:

Tabla 2. Centros de acopio en Querétaro

CENTRO DE ACOPIO	GIRO REGISTRADO
Calixto	Desechos metálicos
Vázquez	Desechos metálicos
Recicorr	Desechos metálicos
El puente	Desechos metálicos

Chatarrera	Desechos metálicos
Mercado público Lindavista	Papel
La 33	Otros materiales de desecho
Plateros	Otros materiales de desecho
Gudi	Desechos metálicos

Fuente: INEGI 2022. Diseño Propio

Se sabe que existen más centros de acopio, sin embargo; son lo que tiene registrados actualmente el INEGI en su base de datos.

Cabe mencionar que estos establecimientos no solo se dedican a reunir los materiales en grandes cantidades para abastecer a las plantas recicladoras, sino que también ejecutan operaciones de venta incrementando drásticamente sus ingresos, por ejemplo:

Una tarima de madera que se compró en 10 pesos la pieza, al público en general ellos la pueden vender entre 35 a 40 pesos la misma pieza.

Lo cual no se compara por mucho con el precio de una tarima nueva. Y así, hacen la compra venta de todos los materiales que almacenan en estos lugares, actividad que no realiza el recolector.

Valor logístico en los sistemas de logística inversa para el retorno de residuos sólidos

El Valor Logístico es un término que define como las operaciones logísticas en cada etapa de la cadena de suministros inversa contribuyen a mejorar la competitividad de las organizaciones implicadas en esta, para aportar utilidad al usuario o consumidor final.

El Valor Logístico que se genera en la cadena de distribución inversa para el caso de los residuos urbanos, se puede establecer como la suma de las operaciones de logística inversa para la entrega de productos desechados para su reutilización:

$$\text{Valor Logístico} = \text{VCVI}$$

Así, la generación del Valor Logístico está dada por la suma de todas las operaciones que agregan valor al producto que se entrega en el centro de acopio, que es el consumidor final. A continuación, se muestran los valores identificados en el estudio de acuerdo con las actividades relacionadas con el flujo inverso.

Modelo general de generación de valor en la cadena de logística inversa

$$CVI = \sum_{i=1}^n \text{Operaciones de Logística Inversa que agregan valor}$$

De donde se desglosan las siguientes operaciones de generación de valor identificadas:

CVI = Cadena de Valor Inversa

CVIR = Cadena de Valor inversa vista desde el Recolector

CVICA = Cadena de Valor inversa vista desde el Centro de Acopio

Vrec = Valor de recolección / recuperación

Vclas = Valor de clasificación

Vlim = Valor de limpieza

Vvta = Valor de venta

Vmp = Valor de Materia Prima

De aquí, se puede hacer una agrupación de los miembros de la ecuación en dos momentos; los que corresponden al recolector y lo que corresponde al centro de acopio.

$$CVIR = Vrec + Vclas + Vlim + Vvta$$

Por otra parte, el centro de acopio solo agrega el valor cuando la vende a la planta recicladora como materia prima.

$$CVICA = Vmp$$

Ya integrando estas operaciones en el modelo, queda de la siguiente forma:

$$CVI = Vrec + Vclas + Vlim + Vvta + Vmp$$

Los principales momentos percibidos por el recolector y el centro de acopio son los que se han presentado, sin embargo; de acuerdo a los diferentes tipos de materiales que integran los productos en desuso, se pueden tener más operaciones que agregan valor, entre otras que no son percibidas por los entes con que se trabajó. Como los que se listan a continuación:

1. Valor de traslado de los puntos concentradores de desechos al lugar de clasificación y limpieza.
2. Valor de integración/almacenamiento.
3. Valor de estiba y carga por parte del recolector.
4. Valor de traslado del lugar de clasificación y limpieza al centro de acopio.
5. Valor de concentración y almacenaje en el centro de acopio.
6. Valor de carga y estiba por el centro de acopio.
7. Valor de traslado del centro de acopio a la planta recicladora.

Proceso de generación de valor en actividades de logística inversa para el retorno de residuos sólidos

Si se parte de la operación cero que es cuando el consumidor desecha los productos depositándolos en la basura, en este momento el valor monetario es cero.

En la primera operación, el recolector llega a los puntos concentradores de basura mencionados en el apartado anterior y ejecuta la búsqueda de los productos generando el primer valor económico pues él sabe qué materiales son de utilidad.

La segunda operación es la limpieza, donde el pepenador sabe que, si el material va sucio, es decir; mezclado con otros desechos el precio de venta se verá reducido. Por lo que a través de métodos empíricos y nada sostenibles, procede a la separación incrementando en esta actividad el valor económico de los materiales.

En la tercera operación que es la venta a los centros de acopio, el traslado, se hace a través de medios físicos; donde el recolector lleva su carga en triciclos, bicicletas e incluso a pie. El recolector no logra percibir que su actividad de cargar y trasladar los productos es digna de ser remunerada. Sin embargo, todo se concentra el precio de venta final al centro de acopio.

Para hacer la venta, el recolector investiga en qué centro pagan mejor los productos y los lleva sabiendo de antemano la cantidad económica que recibirá en dicho lugar.

Para la cuarta operación, los centros de acopio reúnen cantidades ya establecidas en cientos de kilos o toneladas para solicitar a las plantas de reciclaje que envíen el camión que lo ha de llevar a ellas de manera gratuita. De otro modo, si el centro de acopio no cuenta con las cantidades mínimas la planta le cobra el flete. Esto permite que se agregue nuevamente valor en esta última operación.

Es aquí donde ya se percibe el cambio de concepto entre logística inversa con materiales recuperados y lo que ahora es materia prima en la cadena de abastecimiento en la planta de reciclaje.

Conclusiones

En el estudio presentado, se observa la clasificación general de los materiales de desecho de acuerdo a la situación actual en México. También se muestran los componentes de la cadena de valor en los sistemas de logística inversa para el caso del manejo de residuos sólidos, dónde se muestran las principales operaciones que se realizan para entregar el producto desechado transformado en la cadena abastecimiento de los materiales recuperados.

Cabe resaltar el problema medioambiental en México por el incipiente manejo de residuos sólidos en los últimos años, dónde se observa la carencia de organizaciones dedicadas a la reutilización de productos desechados, además de no contar con tecnologías para llevar acabo estos procesos, que para la problemática del uso del desecho en los

basureros urbanos es imperativo.

Del mismo modo, se identificaron los elementos que integran el valor logístico y que deben ser considerados para la gestación de empresas dedicadas al manejo de productos desechados, cabe aclarar que para los centros de acopio es importante que los productos lleguen procesados (comprimidos, limpios y en su caso clasificados) la competitividad del centro de acopio está en virtud de acumular cantidades mínimas de productos que les exigen sus clientes.

También, a través de la base de datos del INEGI, que muchos de los centros de acopio se encuentran registrados en un mismo padrón, pero no se destacan en su mayoría los productos que manejan en ellos.

Finalmente, el estudio pretende ser un apoyo documental para aquellos que deseen incursionar en promover la creación de organizaciones dedicadas a ser parte de una o de toda la cadena de suministro inversa, que en la mayoría de las zonas urbanas mexicanas está más relacionada con el manejo de productos metálicos, después de los derivados de madera y de plástico.

Sin embargo, hay otras áreas de oportunidad como el manejo de desechos orgánicos, tales como los alimentos procesados y sin procesar, medicinas caducas y otros productos fuera de uso que pueden ser parte de futuros diseños de procesos de reutilización, y que pueden contribuir a la productividad empresarial local y al medio ambiente.

Referencias

- [19] Brito, M.P. de, Flapper, S.D.P., Dekker, R. Reverse logistics. Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute., 2002
- TABLA I. Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, k., Wassenhove, L.N.V. Reverse logistics: Quantitative models for closed-loop supply chains. Springer., 2004
- [20] European Working Group on Reverse Logistics (REVLOG), 2004. REVLOG, 2004.
- TABLA II. Hernandez,S. R., Metodología de la Investigación, 6ª. Edición,Mac Graw-Hill,2014
- [21] Rubio,L.S., Jimenez,P.B. La logística Inversa en las ciudades del futuro, 2014 [www.documento], Disponible en: Sergio Rubio Lacoba - Dialnet (unirioja.es)
- TABLA III. Rogers, D.S., Lambert, D.M., Croxton, K.L., Garcia-Dastugue, S.J..
- TABLA IV. The Returns Management Process. Int. J. Logist. Manag. , 2002 (13), pág 1–18
- [22] Tibben-Lembke, R.: «Differences between forward and reverse logistics in a retail environment, supply chain management», An International .

Caracterización de las operaciones logísticas de adquisición de residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

Salinas Martínez Monserrat

Sánchez Lara Benito

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen— Los electrodomésticos o aparatos electrónicos facilitan la vida cotidiana, su desarrollo y la diversidad de productos ha venido creciendo de una manera vertiginosa, sus precios y costos han bajado, se actualizan constantemente, sus tiempos de vida cada vez son más cortos. Una de las consecuencias de esta cadena de situaciones es el también crecimiento vertiginoso de sus residuos, los llamados Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos [RAEE]. La generación de RAEE tiene impactos sociales, económicos y medioambientales. Uno de los impactos económicos positivos es el surgimiento de pequeñas unidades de negocio dedicadas a su valorización, particularmente empresas que reparan y restauran. Las empresas que valorizan RAEE pueden estudiarse como eslabones de una o varias cadenas de suministro inversas [CIS] y las funciones que realizan como prácticas de Economía Circular. No hay registros formales de las actividades que realizan las unidades de negocio que valorizan RAEE que en su mayoría son empresas informales, sin embargo, esto tendrá que cambiar considerando que la Ley General De Economía Circular, publicada en 2021, señala la necesidad de medir el flujo de residuos para con ello conocer y entender el ciclo de vida de los productos, cómo y cuándo se cierran dichos ciclos y cómo cruzar insumos, productos y residuos, entre ciclos de producción. Así, este artículo presenta los resultados de la caracterización de las operaciones logísticas de adquisición (OLA) que se realizan en una empresa eslabón de la CSI que valoriza RAEE, en particular una empresa que repara y restaura lavadoras. Las lavadoras como aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) son clasificadas como grandes aparatos junto con secadoras, lavavajillas, entre otros. Las lavadoras como RAEE por su peso ocupan un lugar destacado en la generación.

Palabras Clave—Cadena de suministro inversa; Valorización; Economía Circular; Ley General de Economía Circular, Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, Operaciones Logísticas de Adquisición.

Introducción

Actualmente son las compañías tecnológicas las que dominan el mercado. Innovan sus productos año con año e imponiendo nuevas modas, lo que alienta el consumo. Este ecosistema de innovación, en el caso de las empresas de electrodomésticos o aparatos electrónicos, ha llevado a que los tiempos de vida de los productos sean cada vez más cortos. Consecuencia de ello es la generación creciente de los llamados residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), esto es los aparatos eléctricos y electrónicos que pasan a ser residuos (Baldé, 2017).

Existe gran variedad de RAEE y se han venido clasificando según sus características. Las clasificaciones no son estándar y depende de cada país. En México se consideran 5 categorías: equipos de regulación de temperatura, pantallas, equipos grandes, equipos pequeños y equipos de telecomunicaciones e informática. La Figura 1 muestra las categorías y algunos de sus componentes.



Figura 1. Clasificación de AEE, categorías y componentes
Fuente. SEMARNAT y PNUD (2017).

Año con año se generan toneladas de RAEE, tan sólo en 2016 se generaron 44.7 millones en el mundo, cabe decir que parte de estos residuos pueden valorizarse, recuperarse, reciclarse y usarse como materia prima para nuevos productos (Baldé, 2017). México es uno de los principales generadores de RAEE, genera alrededor de 1,000 toneladas por año, de estas se ha estimado que 40% permanecen almacenadas en casas habitación o bodegas, 50% se envía a rellenos sanitarios o tiraderos no controlados y 10% se tira a la basura convirtiéndose en residuos sólidos urbanos (RSU) (Baldé, 2017) (Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión, 2003), (DOF, D. O., 2021).

En la Ciudad de México los RAEE se clasifican además como residuos de manejo especial y voluminosos (Baldé, 2017). De entre los residuos valorizables recolectados los RAEE son un pequeño porcentaje, 5.1%. La Figura 2 muestra los porcentajes de los residuos valorizables recolectados.

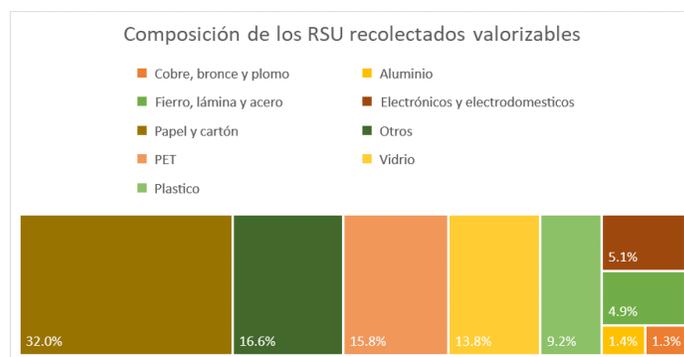


Figura 2. Porcentajes de los RSU recolectados valorizables
Fuente: SEMARNAT, 2015

De la clasificación de RAEE es de especial interés para esta investigación la categoría: equipos grandes que incluye lavadoras, secadoras, lavavajillas, las cocinas eléctricas, las impresoras grandes, las fotocopiadoras y los paneles fotovoltaicos. En particular, la investigación se centra en una empresa que valoriza lavadoras. Las lavadoras se convierten en residuos cuando presentan fallas, finalizan su ciclo de vida útil o son remplazadas por otras con innovaciones tecnológicas. Muchas de las lavadoras desechadas son colectadas por recolectores privados e informales que las valorizan o comercializan.

La empresa caso de estudio, considerada en la investigación como eslabón en una cadena de suministros inversa, valoriza lavadoras desechadas. La empresa está ubicada en el municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México. Cabe mencionar que este municipio es el que ha tenido mayor incremento en la recolección de RSU entre 2010 a 2016, un crecimiento de 46% que excede la media de crecimiento nacional (Gómez Maturano & Sánchez Lara, 2021). La empresa caso de estudio es una empresa informal, está dedicada a la adquisición, valorización y reintegración al mercado de las lavadoras de perilla y de sus piezas. Por confidencialidad se mantiene el anonimato de la empresa.

La investigación aborda el caso de los RAEE que son reconocidos como críticos para el agotamiento de los recursos y en la gestión de los residuos dada la presencia de materiales peligrosos y también preciosos (SEDEMA, 2015). La empresa caso de estudio se considera un eslabón de la cadena de suministros inversa (CSI) de los RAEE. El objetivo del artículo es caracterizar este eslabón enfocándose en las operaciones logísticas de adquisición (OLA) del residuo, en este caso las llevadas a cabo para las lavadoras. Las OLA consideradas son: recolección, transporte, almacenamiento temporal, manejo de materiales y transferencia. El alcance es bosquejar la cadena de suministros inversa en la cual puede ubicarse a la empresa como uno de sus eslabones.

El artículo está estructurado en cinco secciones. En la sección introductoria se presentan antecedentes de los RAEE, se ofrecen datos de su generación y valorización. La segun-

La sección describe el marco conceptual para la caracterización de las OLA en la empresa caso de estudio y para la conceptualización de esta y otras empresas que valorizan RAEE como eslabones de una o varias CIS y que las funciones que realizan estas empresas pueden considerarse prácticas de Economía Circular. Las OLA se describen dada la importancia que tienen en la valorización de los RAEE y de otros residuos. La tercera sección explica la colecta y análisis de los datos para la caracterización y cómo se bosqueja la CSI de los RAEE. La cuarta sección se centra en los resultados y su discusión, particularmente las características de las OLA que realiza la empresa caso de estudio. Finalmente, se ofrece un conjunto de conclusiones.

Caracterización de las operaciones logísticas de adquisición

Las etapas por las que transita un aparato eléctrico o electrónico (AEE) hasta ser considerado un RAEE se han denominado ciclo de vida. La Figura 3 señala dichas etapas que a la vez pueden considerarse los eslabones de una cadena de suministros de ciclo cerrado, para el caso: producción, distribución, venta, consumo, generación, tratamiento y disposición final (Tec-Check, et al., 2020).

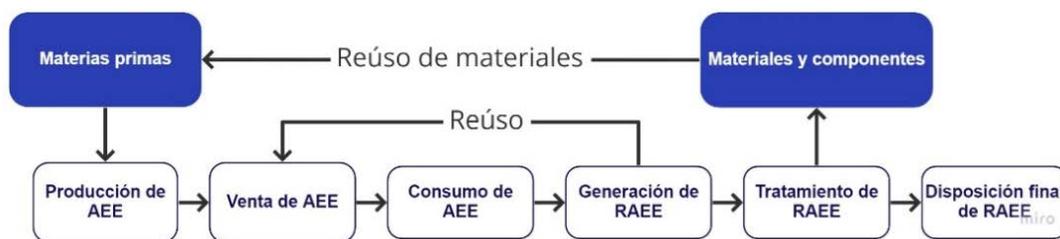


Figura 3. Ciclo de vida de los RAEE
Fuente: Tec-Check, et al., 2020

A continuación, se describen sólo las etapas que corresponden a la cadena inversa. La generación es la instancia en la que los AEE se desechan por obsolescencia, fallas, cambio por otros nuevos o porque dejan de cumplir con su función. Muchos de los RAEE son almacenados por no saber cómo manipularlos, para extraer partes, para reparar otros, incluso por un sentido de pertenencia.

La etapa de tratamiento implica el manejo de los RAEE con el propósito de reutilizarlos, reparándolos, acondicionándolos o transfiriéndolos a segundos usuarios. Esto extiende la vida útil del AEE. Además, implica la recuperación ya sea del AEE o de sus materiales valorizables que tienen mercado, por ejemplo: fuentes de energía eléctrica, motores, plaquetas, compresores, etc. La disposición final implica que de no ser factible la valorización de los RAEE estos se llevan a sitios de disposición o rellenos sanitarios.

Las etapas antes descritas pueden considerarse como eslabones de una cadena de suministros de ciclo cerrado, constituida por los eslabones de la cadena directa y de la cadena inversa. La cadena directa corresponde a las etapas anteriores a la generación mientras que la cadena inversa corresponde a las etapas posteriores a esta.

Las CSI están constituidas por los procesos y agentes para recuperar el valor residual de un producto y/o reutilizarlo al final de su vida útil o para eliminarlos apropiadamente (Guide, et al., 2003) (Nakashima & Gupta, 2013). Adquisición, valorización y reintegración son tres actividades incluidas en las CSI (Schuh, et al., 2011).

La adquisición se refiere a la colecta del residuo en las fuentes que la generan. La forma en que se colecta depende de la infraestructura y equipamiento de carga y de transporte. Dentro de la adquisición se consideran: la recolección, la inspección, la selección, el almacenamiento, el transporte y la consolidación de los residuos. La valorización implica las operaciones para recuperar el valor económico y funcional del residuo. El nivel de valorización está asociado con la utilización de tecnologías y procesos, industriales preferentemente, para que los materiales recuperados se reincorporen a cadenas productivas similares de las que procedieron u otras diferentes. La valorización incluye actividades de: limpieza, inspección, selección, desmontado, reúso, reciclaje, remanufactura, reparación y restauración. Por su parte, la reintegración implica la distribución de los materiales valorizados a cadenas de suministro directas o inversas. Así, la reintegración incluye actividades de: venta, almacenaje y transporte. Esta se asemeja a las actividades de distribución en las cadenas directas. Las OLA son esenciales para la valorización.

Las OLA agregan valor para que las lavadoras se reintegren a un mercado secundario. Con cada operación el residuo gana valor. Calcular el valor agregado implica asignar valores a las actividades y procesos respecto de la fuerza de trabajo para cada actividad. En la Figura 4 se presentan los procesos y las actividades a considerar (Medina Toribio, 2019).

	Actividad		Valor agregado
Procesos y actividades	Generación	Desecho	<i>No aplica</i>
		Almacenamiento temporal	
		Otra	
	Adquisición	Recolección	V_1
		Transporte	
	Acopio	Inspección	V_2
		Clasificación	
		Almacenamiento	
		Transporte	
		Otra	
	Valorización	Reparación	V_3
		Limpieza	
		Consolidación	
		Reciclaje, reúso o restauración	
		Otra	
		Otra	
Reintegración	Almacenamiento	V_4	
	Transporte		
	Otra		

Figura 4. Procesos y actividades que agregan valor a los residuos

Fuente: Medina Toribio, 2019

Los valores que considerar son: el valor agregado en la adquisición, el valor agregado en el acopio, , el valor agregado en la valorización y , el valor agregado en la reintegración.

Enfocarse en la valorización y reintegración de los residuos puede enmarcarse en lo que se definió como Economía Circular (EC). La EC debe entenderse como un sistema económico, basado en modelos comerciales, dirigido a reemplazar el concepto de fin de vida útil por reducir, reutilizar alternativamente, reciclar y recuperar materiales en procesos de distribución, producción y consumo con el objetivo de lograr el desarrollo sostenible. Sus principios son tres: (1) preservar y mejorar el capital natural, (2) optimizar los recursos materiales y (3) fomentar la eficacia del sistema (Kirchherr, et al., 2017).

Materiales y métodos

Este trabajo es una investigación basada en evidencia empírica, una investigación en la que se genera conocimiento mediante el registro de experiencias directas e indirectas. Es parte de un conjunto de estudios sobre la adquisición y valorización de RSU en CSI. Se consideró a la empresa eslabón de la CSI como un caso de estudio que aporta datos al posible desarrollo de constructos y teorías sobre fenómenos contemporáneos, en este caso, la gestión de las CSI que incluye la valorización de los residuos. La investigación es de carácter exploratoria, esto es, no se tiene un diseño experimental riguroso y bien controlado.

El contacto con la empresa se realizó entre los meses de agosto de 2021 y enero del 2022, se llevaron a cabo 3 visitas y 4 entrevistas no estructuradas con el propietario de la empresa. Las visitas se enfocaron en la identificación de las OLA realizadas y las entrevistas a registrar los detalles sobre la adquisición de las lavadoras y su valorización. Las preguntas de la entrevista estuvieron dirigidas al propietario de la empresa caso de estudio.

Para la caracterización de las OLA se retomó la propuesta de Gómez-Maturano & Sánchez-Lara (2018). Esta es una estructura que permite identificar, sin ser restrictivos, la naturaleza del residuo y de la CSI, los procesos realizados, además de los agentes y los canales que intervienen. La Figura 5 muestra las dimensiones y elementos que caracterizan a las CSI. Las dimensiones y elementos se describen y explican brevemente a continuación.

Naturaleza Características del residuo Par Origen-destino Alcance Modelo de movimiento	Procesos Generación Adquisición Valorización Reintegración
Dimensiones para la caracterización de CSI-RSU	
Agentes Función/actividad Tipo de gestión Requisitos de capital Consumo de mano de obra	Canales Conexión funcional Esquema de operación Longitud

Figura 5. Dimensiones para caracterizar CSI de residuos sólidos urbanos
Fuente: Gómez-Maturano, J. & Sánchez-Lara, B., 2018.

Resultados y discusión de resultados

Las lavadoras se convierten en residuos cuando presentan fallas, termina su ciclo de vida útil o son remplazadas, siendo residuos muchas de estas pasan por operaciones de adquisición y valorización para recuperar un valor residual asociado con los materiales valorizables que contienen. Las lavadoras de perilla son muy comunes en el mercado y por ello son también las que presentan mayor cantidad de fallas. Las partes con más fallas son: la tarjeta electrónica, la bomba de drenaje, el motor, la manguera de entrada y de salida, las válvulas, la correa de transmisión, el tambor, la tina y el termostato (Bracquené, et al., 2021). En la Figura 5 se señalan los componentes principales de lavadoras de perillas.

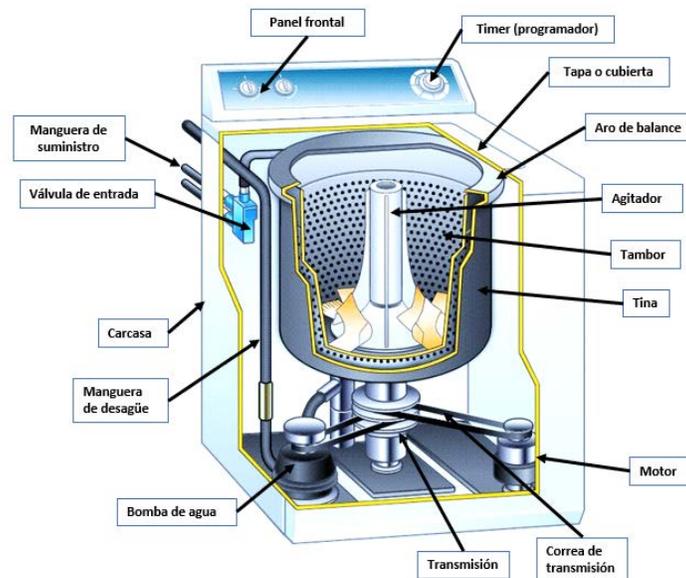


Figura 6. Componentes de las lavadoras de perilla
Fuente: STP Servicios & Repuestos, 2022 y Bracquené, et al., 2021

En general, los materiales valorizables son metales y plásticos. El peso de una lavadora suele estar en el rango de 64 a 76 kilos, depende de sus medidas, la capacidad de carga y la marca (Balay, 2022).

Es de mencionarse que no existe un sistema de monitoreo o metodología que permita saber cuánto de los RAEE se genera, recolecta, se pasa a tratamiento y se lleva a disposición final (Tec-Check, et al., 2020), (Consejo de las comunidades europeas., 1975). Las lavadoras que se reparan en la empresa caso de estudio son RAEE que se generan en hogares una vez que se consideran obsoletas, presentan fallas algunos de sus mecanismos o al nivel general o cuando su propietario decide sustituirlas y desecharlas.

Respecto al eslabón de recolección dentro de la CSI de la empresa caso de estudio, la adquisición de las lavadoras como residuos la realizan chatarreros y pepenadores que recorren algunas zonas que ya tienen identificadas tanto de la Ciudad de México como del área metropolitana. Estos agentes son informales, recolectan las lavadoras y otros materiales valorizables y los trasladan al centro de acopio para su reciclado, reusó, desmantelamiento y/o venta directa de componentes en el mercado secundario y formal (SEMARNAT, 2017). Los chatarreros y pepenadores son en conjunto el primer eslabón de la CSI.

A continuación, se describen las OLA en la valorización de las lavadoras. El transporte se realiza en camionetas tipo pick up con capacidad hasta de 1.5 ton., en general, son vehículos de modelos antiguos que transitan por las calles comprando diferentes residuos, entre ellos los RAEE. En la mayoría de los casos son dos personas las que realizan la compra de los residuos. Véase Figura 7.

Los residuos recolectados se llevan a centros de acopio donde se venden. Los centros de acopio se consideran el siguiente eslabón de la CSI, no sólo para las lavadoras también para muchos otros residuos. El centro de acopio del que se surte la empresa caso de estudio se especializa en lavadoras.



Figura 7. Camioneta recolectora de residuos
Fuente: Excélsior, 2017

En el centro de acopio las lavadoras se almacenan temporalmente previo a ser desensambladas o a venderse a empresas, como la empresa caso de estudio, que las compra para reacondicionarlas valorizándolas para posteriormente venderlas en mercados secundarios. El desensamble que se hace en los centros de acopio implica la separación selectiva de: plásticos, metales ferrosos, no ferrosos y partes con cobre (SEMARNAT, 2017).

El centro de acopio donde la empresa caso de estudio compra las lavadoras está ubicado en el municipio de Nezahualcóyotl. El centro de acopio es un agente privado que se considera dentro de la categoría Fabricación de productos de herrería en el DENU (INEGI, 2020). Esta categorización señala lo ya indagado sobre los centros de acopio de los RSU, que éstos diversifican sus actividades para ser viables. Este centro de acopio, además de lavadoras, también compra estufas, colchones y refrigeradores.

El centro de acopio está ubicado en una vía secundaria, esto implica que el acceso a ésta sea fácil, la superficie que ocupa es de aproximadamente 300 . El inmueble es una nave protegida con techo de loza y muros de concreto, en un primer piso una estructura de metal se utiliza para el almacenamiento. Véase la Figura 8.



Figura 8. Espacio para el almacenamiento de RAEE en el centro de acopio de lavadoras

Como es frecuente en estos centros de acopio, es espacio público se utiliza para el desmantelamiento y almacenaje, la banqueta y hasta dos carriles de la vía. Véase la Figura 9.



Figura 9. Almacenamiento en espacio público en el centro de acopio de lavadoras

El centro de acopio emplea a 10 personas que laboran sin equipo de protección, aunque las herramientas que utilizan para desmontar los componentes valorizables sean riesgosas, mazos y hachas, principalmente. Estas condiciones de trabajo también son frecuentes entre centros de acopio de la zona.

Como se mencionó para la adquisición de estas lavadoras es el propietario de la empresa caso de estudio es quien acude personalmente al centro de acopio para seleccionar las lavadoras de su interés, la selección implica la inspección de: el estado general de la lavadora, no tener indicios de haber sido desarmadas con antelación y que sean modelos recientes con edad aparente de hasta 5 años. Una vez hecha la selección y compra las transporta al domicilio de la empresa, que es casa habitación, taller y almacén.

El transporte se realiza con camionetas tipo pick up con capacidad de carga de 3.5 toneladas. La distancia entre el centro de acopio y la empresa es 2.4 km.

La consideración de la distancia entre el centro de acopio y la empresa caso de estudio y la información respecto de los recorridos que hacen los recolectores obtenida del dueño de la empresa, hace pensar en la existencia de una CSI regional, que abarca la zona metropolitana de la Ciudad de México.

La valorización de las lavadoras implica mano de obra barata para el desensamble y/o canibalización. Esto ha creado un mercado laboral y contribuye a un floreciente comercio (Dwivedy & Mittal, 2012). El desensamble es manual utilizando desarmadores, pinzas y seguetas. Se repite que el personal no utiliza equipo de protección personal. Antes del desensamble se realizan pruebas de funcionamiento que determinan si se pueden reparar o si hay piezas o componentes útiles para reparar otras. Las que se reparan se restauran y limpian antes de llevarlas al mercado.

El área de trabajo es aproximadamente de 20 , está techada y protegida con muros de concreto. En esta área se realiza la limpieza, inspección, selección, desmontando, reúso, reciclaje, remanufactura, reparación y restauración. (Gómez Maturano & Sánchez Lara, 2018). Véase la Figura 10.



Figura 10. Área de trabajo de la empresa caso de estudio

Al igual que el centro de acopio del cual se adquieren las lavadoras, la empresa caso de estudio utiliza la vía pública para realizar sus actividades, en particular la banqueta y un carril de la vía. Véase la Figura 11.



Figura 11. Utilización del espacio público para la valorización de los RAEE

Respecto a la reintegración de materiales, en el caso de que las lavadoras que no se reparan, las piezas útiles se extraen y conservan para otras lavadoras. Los materiales que se desechan, en general, son metales y plásticos. Estos también se clasifican y comercializan en centros de acopio que los adquieren.

Para la reintegración de las lavadoras se utilizan las redes sociales, se ofrecen y se hace el contacto con posibles compradores. A través de este medio se comercializan muchos otros productos. Una vez que un comprador acepta la compra se acuerda la entrega ya sea que el cliente la recoja por sus medios o que se realice la entrega a domicilio.

El flujo o movimiento de un producto, en este caso un residuo, puede ser pull (jalar) y push (empujar). Esto es, puede ser que se responda al pedido de un cliente o que se anticipe a la demanda [16]. Para el caso de la empresa caso de estudio. Con base en la información obtenida, se puede decir que el movimiento es tipo push. Es decir, la demanda de las lavadoras reparadas se especula y anticipa, se sabe que existe un mercado secundario donde se demandan las lavadoras una vez reparadas.

Los agentes involucrados en la valorización de las lavadoras son los siguientes: generadores, recolectores-adquisidores, valorizadores y distribuidores (Gómez Maturano & Sánchez Lara, 2018), (SEMARNAT, 2017). En la Figura 12 se diagrama la secuencia respecto de su intervención en la valorización.



Figura 12. Agentes de la valorización de lavadoras

El generador compra, utiliza y desecha la lavadora. Para el caso los hogares son generadores. Los recolectores tocando puerta de puerta se hacen de las lavadoras por donación o pagando por ellos para después transportarlos hasta el centro de acopio. En el centro de acopio las lavadoras se almacenan hasta comercializarse. Para el caso, la empresa caso de estudio es el valorizador, realiza las OLA y operaciones de transporte, entre ellas, limpieza, inspección, selección, desmontado, reúso, reciclaje, remanufactura, reparación y restauración. El reintegrador, también la empresa caso de estudio, incorpora las lavadoras a mercados secundarios, para el caso hogares que compran las lavadoras por ser mucho más económicas que las nuevas. La Figura 13 describe algunas características de los agentes involucrados.

Actividad / Proceso	Agente	Asociación	Gestión
Generador	Hogares	Privada	
Recaudador/ Colector	- Empresas pequeñas dedicadas a la recolección - Empresas pequeñas o medianas dedicadas a la recaudación, valorización y almacenaje	Privada	Informal/ Formal
Valorizador	Empresas pequeñas dedicadas a los procesos de valorización.	Privada	Informal
Reintegrador	Empresas pequeñas dedicadas a la venta de estos productos	Privada	Informal

Figura 13. Agentes involucrados en la valorización de lavadoras

Es de notar que la valorización implica la intervención de agentes públicos y privados, en este mismo sentido las organizaciones que intervienen son formales e informales considerando si están registradas como empresas.

Por otro lado, el canal de distribución es aquel que recorre las lavadoras desde la generación hasta la reintegración al mercado (Chopra, 2008). Son las trayectorias constituidas por la interacción de los diferentes eslabones que constituyen la CSI de las lavadoras (Gómez Maturano & Sánchez Lara, 2018). Véase la Figura 14.

Canal	Esquema
Generación - Adquisición	Informal
Recaudación - Valorización	Informal
Valorización - Reintegración	Informal

Figura 14. Canal de distribución en la valorización de las lavadoras

Los canales de distribución son: generación – adquisición, recaudación – valorización y valorización – reintegración todas estas.

Una vez realizadas las OLA, las lavadoras reparadas, restauradas y reacondicionadas se venden en un mercado secundario en el cual son atractivas al ser económicas y funcionales. Las OLA son relevantes para la valorización, agregan valor logístico a las lavadoras que se reintegran al mercado. Esto es, el propio flujo de los residuos por los diferentes eslabones de la CSI agrega valor sumado al valor que agregan las OLA.

La empresa caso de estudio forma parte de un modelo comercial con base en la reparación de las lavadoras, además de la recuperación y reutilización de algunos componentes. En términos de Economía Circular, el modelo comercial impulsa la optimización de los materiales y la eficiencia del sistema de producción - consumo. Además, desde la gestión de residuos, la empresa les agrega valor económico lo que permite su permanencia en cadenas productivas antes de su disposición final. Respecto de la Figura 14, la empresa caso de estudio es parte de un modelo comercial basado en la reutilización de los componentes de las lavadoras, y el mantenimiento y prolongación de la vida de las lavadoras.

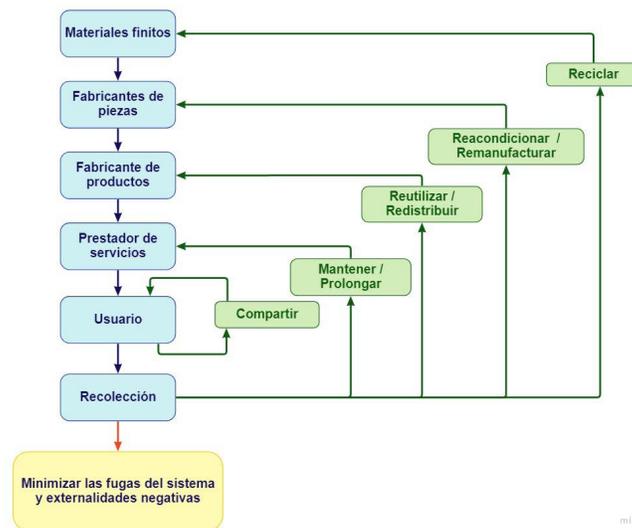


Figura 14: Diagrama de la economía circular
Fuente: The Ellen MacArthur Foundation, 2017

La valorización de los residuos es para muchas familias la principal fuente de ingresos. Sin embargo, las actividades y prácticas que se realizan para ello generan externalidades negativas, entre ellas: informalidad, riesgos contra la salud, exposición a sustancias contaminantes y dañinas para la salud y riesgos laborales.

Conclusiones

El ciclo de vida de los RAEE y en el caso particular el de las lavadoras, se prolonga, pero dentro de ciertos límites. Una vez reparada es cuestión de tiempo para que vuelva a considerarse un residuo, las opciones que tiene su poseedor son: repararla nuevamente o llevarla disposición final. En general, se opta por lo segundo dado que se incrementa la incertidumbre respecto de si funcionamiento y también se incrementa el costo de reparación.

En una CSI con enfoque de Economía Circular, lo ideal es que se extraigan los materiales valorizables una vez que no es posible prolongar la vida del producto, ya sea para la fabricación de nuevos productos o para la fabricación de piezas. Lo anterior implica que desde el diseño se considere el modularidad de los equipos, esto es, la posibilidad de intercambiar componentes entre aparatos similares. Más allá de la modularidad, está la posibilidad de extraer las materias primas de los RAEE considerando su cada vez mayor escasez. Como debe entenderse es la necesidad de cadenas de suministro de ciclo cerrado, pero también de cadenas de suministro circulares. La apuesta de la Economía Circular es, más que cero residuos, el manejo eficiente de los materiales y/o de las materias primas de tal suerte que estos lleven a ciclos de vida cada vez más amplios de los materiales no de los productos. En este sentido, la valorización de los RAEE es parte de algo más amplio.

Las empresas valorizadoras de RAEE, como la empresa caso de estudio, son importantes para las CSI, aunque no lo son tanto si se consideran las Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado. En el plano empresarial, son agentes económicos que, aunque generan riqueza a partir de las actividades económicas que realizan generan un conjunto de externalidades a considerar, entre ellas: la privatización del espacio público, uso de partes de la vialidad y banqueta, problemas de movilidad, congestión, exposición a riesgos de salud.

Referencias

- Balay. (2022). Balay. Obtenido de <https://blog.balay.es/cuanto-pesa-una-lavadora/>
- Baldé, C. P. (2017). The Global E-waste Monitor 2017, Quantities, Flows, and Resources. United Nations, University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. Recuperado el 17 de Noviembre de 2020, de http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf
- Bracquené, E., Peeters, J., Alfieri, F., Sanfélix, J., Duflou, J., Dewulf, W., & Cordella, M. (2021). Analysis of evaluation systems for product repairability: A case study for washing machines. *Journal of Cleaner Production*, 281. doi:doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125122.
- Chopra, S. &. (2008). Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación. (Tercera edición ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Consejo de las comunidades europeas. (1975). Directiva del consejo 75/442/CEE de 15 de julio 1975, relativa a los residuos. Diario Oficial de la Unión Europea. Recuperado el 16 de mayo de 2022, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31975L0442&from=ES>
- DOF, D. O. (2021). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688657&fecha=08/10/2003

- Dwivedy, M., & Mittal, R. (2012). An investigation into e-waste flows in India. *Journal of Cleaner Production*, 37, 229–242. doi:doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.017
- Excélsior. (22 de Mayo de 2017). Se multan camionetas de fierro viejo que compren. Obtenido de <https://www.atraccion360.com/sanciones-y-multas-camionetas-de-fierro-viejo>
- Gómez Maturano, J., & Sánchez Lara, B. (2018). Procedimiento para caracterizar Cadenas de Suministro Inversas que valorizan Residuos Sólidos Urbanos. Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro (CiLOG2018), (pág. 10). México.
- Gómez Maturano, J., & Sánchez Lara, B. (2021). Análisis geoespacial de actividades de reciclaje informal en la base de la pirámide social en Nezahualcóyotl. *Entorno Geográfico*, 123-146.
- Guide , V., Harrison , T., & Van Wassenhove. (2003). The Challenge of Closed-Loop Supply Chains. *Interfaces*, 33(6), 3-6. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/20141298>
- INEGI. (2020). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas 2020. Obtenido de Información para la actualización e incorporación de unidades económicas al DENU: <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/587>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling.*, 221-232. doi:doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
- Medina Toribio, E. (2019). Balance de costos y análisis de riesgos de transporte en un eslabón de una cadena de suministro inversa de aceite comestible usado. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://132.248.9.195/ptd2019/noviembre/0797595/Index.html>
- Nakashima, K., & Gupta, S. (2013). *Modeling Supplier Selection in Reverse Supply Chains*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión. (2003). Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Obtenido de <https://www.boe.es/doue/2003/037/L00024-00039.pdf>
- Schuh, G., Novoszel, T., & Maas, M. (2011). Rebound logistics: An integrative reverse supply chain for multiple usage products. (G. Seliger, M. Khraisheh , & I. Jawahir, Edits.) Springer. doi:10.1007/978-3-642-20183-7_58
- SEDEMA. (2015). Norma Ambiental Para El Distrito Federal Nadf-024-Ambt-2013. Obtenido de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/NADF-024-AMBT-2013.pdf>
- SEMARNAT. (2015). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde., México. Recuperado el 2021 de Noviembre de 2021, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- SEMARNAT. (2017). Caracterización de la industria formal e informal del reciclaje de residuos electrónicos en México. México. Recuperado el 2021 de Noviembre de 2021, de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD003863.pdf>
- STP Servicios & Repuestos. (6 de mayo de 2022). ¿Cómo funciona mi lavadora? Obtenido de <https://stpblogging.com/2019/03/10/como-funciona-mi-lavadora/>

Tec-Check, García, F., & Manske, J. (2020). Consumo sustentable y reciclaje de residuos electrónicos: México y Alemania. Bonn. Obtenido de <https://iki-alliance.mx/consumo-sustenable-y-reciclaje-de-residuos-electronicos-en-mexico-y-alemania/>

Análisis de factibilidad económico para la instalación de una empresa de reciclado de neumáticos en Ciudad Victoria, Tamaulipas

Guillermo Eduardo Garcia Vega
María Magdalena Reyes Gallegos
Araceli Maldonado Reyes
Ricardo Daniel López Garcia
Pedro Henoc Ireta Sánchez
Jessica Adriana Terán Anguiano
Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Resumen- Los neumáticos fuera de uso representan un componente de contaminación a gran escala debido a su crecimiento exponencial con la industria automotriz, siendo estos una parte importante de los automóviles. La vida útil de un neumático es de entre 5 a 10 años de acuerdo con diferentes compañías manufactureras de neumáticos, tomando de 500 a 1000 años para su degradación. Por su inadecuado y casi nulo proceso de descomposición muchas de ellas terminan en rellenos sanitarios, terrenos baldíos o áreas comunes, siendo este el hogar de incubadoras de enfermedades, tales como Dengue, Chikungunya y Fiebre Amarilla entre otras; además de contaminantes en potencia. En el 2018 en México se desechaban 40 millones de toneladas de neumáticos al año de las cuales solo se reciclaba el 10%. Actualmente dentro de Ciudad Victoria Tamaulipas no se reciclan los neumáticos desechados, ya que en el estado no se cuenta con una empresa dedicada al reciclaje de neumáticos fuera de uso, teniendo que llevarlos fuera o en la mayoría de los casos, siendo almacenados. Por lo antes expuesto, la presente investigación pretende mostrar la factibilidad económica para la instalación de una empresa recicladora de neumáticos en Ciudad victoria Tamaulipas, aplicando la Tasa Interna de Retorno (TIR) y El Valor Presente Neto (VPN) al flujo de efectivo pronosticado, teniendo en cuenta un presupuesto de inversión inicial, calculado de acuerdo con las necesidades para la puesta en marcha de la empresa. Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la TIR y el VPN en el análisis económico fueron positivos generando oportunidades de negocio y una solución al problema de los neumáticos fuera de uso.

Palabras clave- Reciclado, Neumáticos, Factibilidad, Caucho, VPN, TIR

Introducción

A lo largo del tiempo el ser humano ha ido evolucionando, desde la creación de herramientas y artefactos burdos que ayudaban a facilitar las tareas del trabajo diario, hasta la creación de aparatos inteligentes, esta evolución ha traído grandes cambios positivos para el ser humano, pero a su vez ha dañado en gran manera al planeta Tierra. Con el comienzo de la Revolución Industrial, un evento que llevaría a grandes avances al hombre, con la utilización de inmensas cantidades de carbón y otros combustibles fósiles en máquinas y fábricas. Por otra parte, este mismo evento traería una cadena de problemas que siguen afectándonos hasta el día de hoy llevándonos hasta un elevado aumento en la temperatura de la tierra, entre otros tantos problemas.

Actualmente el problema de la contaminación ambiental puede llevarnos al final del planeta que conocemos como hogar, en 2018 la IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) presento un informe estableciendo el año 2030 como fecha límite para disminuir las emisiones netas globales de dióxido de carbono, de lo contrario esto provocaría sequias extremas, incendios forestales, inundaciones y escases de alimentos para millones de personas, a este año se le conoce como “el año del no retorno”. Tras la pandemia del COVID 19 que afecto al planeta entero en el año 2019 y 2020, el planeta tierra se presentó una pausa a todas las actividades que se realizan en el mundo, las personas tuvieron que resguardarse en sus hogares, las grandes empresas enfrentaron escasez de personal y materiales, disminuyendo su producción y a pesar de este suceso se podría pensar que estos cambios ayudaron a disminuir de alguna manera el problema de las altas temperaturas en la tierra, pero de acuerdo con la IPCC en su informe 2021, declararon que a menos que las emisiones de gases de efecto invernadero se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, limitar el calentamiento global puede ser un objetivo inalcanzable. Dentro del problema la contaminación existe diferentes tipos de contaminantes, plásticos, baterías de plomo, pilas, desechos de las grandes industrias, neumáticos, entre otros tantos, uno de estos contaminantes que actualmente no está siendo tratado con tanta importancia como otros, son los neumáticos; hechos a base de caucho natural y sintético, el cual es un polímero del plástico. La producción de neumáticos tiene grandes consecuencias medioambientales como el empleo de combustibles fósiles para producir el caucho sintético, actualmente para la fabricación de un neumático se utilizan alrededor de 30 litros de petróleo mientras que para los de camiones se pueden ocupar hasta 100 litros de petróleo y aunque su vida útil es de 3 a 4 años estos pueden llegar a durar en el plantea de 500 hasta 1000 años. En México la industria automotriz crece año con año, solo en 2021 se produjeron 3 millones de vehículos colocándose en el 7 lugar de productores en el mundo y ese mismo año se vendieron alrededor de 1.2 millones de vehículos nuevos en el país (AMIA, s.f.), convirtiéndose estos en un problema de desechos de neumáticos para un futuro.

En 2018 se desechaban 40 millones de toneladas de neumáticos al año de las cuales solo se reciclaban el 10% esto de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente de México (Gobierno de Mexico, s.f.) generando un problema de excesos de neumáticos fuera de uso solamente en el país. Una manera de combatir el problema del exceso de desechos inorgánicos es la reutilización de estos (Abraham T. Gebremariam, 2021) (Raoul Voss, 2021) (Mohammad Eyni Kangavar, 2022) y (Kailash Choudhary, 2019). En Alemania (Janlinus Popien, 2022) evaluaron el impacto medio ambiental, económico y social de tres redes de reciclaje de baterías diferentes que varían en tamaños y número de centros de reciclaje, utilizaron el método ReCiPe V1.13 mediante un framework basado en python "Brightway2", los resultados que obtuvieron indicaron que las instalaciones de reciclaje grandes y centralizadas son ventajosas, así como también mostraron que los materiales reciclados ofrecen una gran oportunidad para reducir el impacto medio ambiental, económico y social. Una manera más en la que estudiaron el reciclaje de neumáticos usados (Qing-Zhou Wang, 2019), fue en la aplicación en carreteras y analizaron la reducción de emisiones de carbono, utilizaron un modelo TES de predicción basado en un método de aislamiento exponencial cubico, y las predicciones las realizaron mediante el ajuste de variables en series de tiempo, los resultados obtenidos indicaron un alto potencial de ahorro de energético y de reducción de emisiones de carbono, así como beneficios económicos, estimaron que la sustitución de asfalto SBS por CRMA ahorra 21.99 millones toneladas de carbón estándar al año reduciendo las emisiones de CO2 en 30.33 millones de toneladas. la reutilización de los desechos puede traer beneficios para el planeta entero, así como oportunidades de negocio, por lo tanto, es necesario promover y fomentar la cultura del reciclaje, así como incentivar la apertura de empresas dedicadas al procesamiento y reutilización de los desechos.

A la hora de planear abrir una empresa o emprender un proyecto nuevo es necesario apoyarse de indicadores económicos para una buena incursión en el mercado.

Uno de los indicadores económicos más eficiente es La Tasa Interna de Retorno (TIR) la cual ha sido utilizada durante mucho tiempo por economistas e ingenieros para estimar la rentabilidad potencial de un proyecto (Muhammet Deveci, 2021) (Alain Bonnafous, 2004) (Mellichamp, 2017) , "una metodología que se utiliza para examinar los flujos de caja que se producen en el tiempo "presente" de manera racional para representar su valor en relación con los flujos de caja "futuros" de años posteriores" (Muhammet Deveci, 2021). En Corea del Sur (Kim, 2017) estudiaron el Meta-análisis de la tasa de rendimiento de los proyectos de carreteras, utilizaron 487 muestras de indicadores para evaluar la viabilidad económica con relación costo-beneficio, el valor presente neto y la TIR, basados en 181 estudios de viabilidad de proyectos de carreteras realizado por el instituto de desarrollo de corea, los principales resultados mostraron que la TIR se ve afectada negativamente por el año de investigación, la longitud de la carretera, el coste de la

construcción, mientras que se relaciona positivamente con la densidad de población y la proporción de manufactura.

Otro indicador económico utilizado en conjunto con la TIR para la medición de factibilidad de un proyecto nuevo es el Valor Presente Neto (VPN) “es considerada la herramienta teórica más fiable, ya que mide correctamente la creación de valor para los accionistas” (Richard Brealey, 2019), la decisión de inversión puede evaluarse a través de diferentes métricas o criterios diferentes, “ la importancia y fiabilidad de una métrica puede depender de la compatibilidad que tenga con el VPN” (Andrea Marchioni, 2018) a la hora de señalar la creación de valor de un proyecto (Bas, 2013) (Dan Wu, 2019) (Carlo Alberto Magni, 2020). Dentro de Egipto (S, 2020) evaluaron el rendimiento y los costos de una central eléctrica de placas solares en Egipto mediante un análisis de sensibilidad del coste nivelado de la electricidad y el valor presente neto, utilizo el modelo del VPN para evaluar la rentabilidad de la inversión de la central eléctrica, los resultados obtenidos indicaron que el VPN calculado durante la vida de la planta eléctrica es lo suficientemente alto para mostrar claramente que la inversión de la central eléctrica propuesta es económicamente viable como sistema de generación de energía eléctrica en Egipto.

Por lo antes expuesto este artículo propone una solución a la problemática generada por la alta cantidad de NFU y los problemas que estos conllevan en la localidad de Ciudad Victoria Tamaulipas y el mundo, por medio de una empresa dedicada al reciclaje de los NFU, utilizando la TIR y el VPN como indicadores económicos para el análisis de factibilidad del proyecto y aunque para medir la factibilidad de una empresa es necesario apoyarse de otros diferentes tipos de análisis, este artículo solo vera el aspecto económico. El artículo se divide en las siguientes: secciones: Sección 2, Fundamentos teóricos; Sección 3, Resultados; Sección 4, Conclusiones.

Fundamentos teóricos

En el siguiente capítulo se determina la metodología utilizada para medir la rentabilidad económica de una empresa recicladora de neumáticos en Ciudad Victoria, Tamaulipas. Para realizar el análisis económico, se recabo información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), de la Secretaría de Economía de México y diversas fuentes como la CFE, páginas de equipo y maquinaria especializada en el ámbito del reciclaje, entre otras.

La información obtenida fue utilizada para realizar, un pronóstico de producción, flujos de efectivo pronosticado y un presupuesto de inversión inicial. Dicha información se analizó en el programa Excel para la aplicación de modelos económicos, así como el cálculo del VPN y la TIR. Para definir el monto económico para la realización de la empresa, se tomó

en cuenta los activos fijos, el mobiliario y equipo, mantenimiento y los costos directos e indirectos de fabricación, dentro de ellos se consideró como costo total directo: la materia prima y la mano de obra directa. De una manera similar, para determinar el costo total indirecto, se consideró: la mano de obra indirecta, energía eléctrica, agua, servicio telefónico e internet, arrendamiento, etc. Los activos fijos se calcularon de acuerdo con el costo óptimo para una línea de procesado de neumáticos fuera de uso (NFU), se consideraron alternativas comerciales de los equipos requeridos con el fin de establecer una propuesta adecuada y económica. A continuación, la tabla muestra los costos de inversión de la maquinaria necesaria en el diseño de la línea de procesado para la obtención de polvo de caucho a base de NFU.

Tabla 1. Costos de inversión en Maquinaria

PRECIO	
Destalonadora	\$510,000.00
Guillotina para NFU	\$450,000.00
Banda de alimentación y extracción	\$260,000.00
Triturador doble eje	\$800,000.00
Desgarrador	\$800,000.00
Banda transportadora de alimentación	\$200,000.00
Separador magnético	\$800,000.00
Molino granulador	\$800,000.00
Banda vibratoria	\$260,000.00
Extractor de polvo	\$350,000.00
Separador magnético	\$245,000.00
Sistema de extracción de polvos y fibras	\$155,000.00
Colector de polvos	\$165,000.00
Tablero de control PLC	\$130,000.00
Cableado e instalación eléctrica con sub-estación	\$250,000.00
Gastos de instalación	\$90,000.00

Ya que en la actualidad la materia prima utilizada para el proceso de reciclado NFU son elementos considerados como desechos sin ningún interés comercial, el costo de la materia prima utilizada en el proceso fue nula. Por otra parte, se consideró el tamaño de la empresa recicladora de NFU como una línea de producción de pequeño tamaño, siendo la mano de obra directa involucrada en el proceso productivo de solo cuatro personas ya

que al ser un proceso semiautomático no es necesario más personal. Para calcular el salario del personal se investigó el salario promedio en puestos similares en otras empresas del mismo giro comercial, mayor al salario mínimo en México. El costo de mano de obra directa necesario para el funcionamiento de la línea de procesamiento se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Costos de mano de obra directa

Cantidad	Área de trabajo	Sueldo Mensual	Costo Anual
1	Conductor titular	\$5,000.00	\$60,000.00
1	Auxiliar de conductor	\$4,500.00	\$54,000.00
1	Supervisor de línea	\$11,000.00	\$132,000.00
3	Operador	\$15,000.00	\$180,000.00

Para el costo de mano de obra indirecta, haciendo referencia al sueldo del personal que está involucrado indirectamente en la producción, se utilizó un total de 5 personas con un costo total de \$35,500 pesos mensuales y \$426,000 pesos anuales entre los encargados de las diferentes áreas administrativas. Dentro del cálculo de los gastos administrativos se consideró el costo de la energía eléctrica, agua y alcantarillado, teléfono e internet, arrendamiento del terreno, mantenimiento, gastos de envío, renta de equipo, envases y embalajes. Se calculó la carga eléctrica de los equipos seleccionados y se utilizó el precio actual del costo de la energía eléctrica de acuerdo con la tarifa GDMTH en Cd. Victoria, Tamaulipas suministrada por la comisión Federal de Electricidad (CFE). El consumo anual para la línea de procesamiento de NFU operando 8 horas diarias por 252 días al año es de 295,646.40 Kw/hr, De acuerdo con la CFE, los cargos tarifales del suministro corresponde a los cargos por transmisión, distribución, operación del CENACE, operación del suministro básico y capacidad de operaciones. En la siguiente tabla se muestra los costos mensuales de la tarifa considerada de acuerdo con la demanda contratada y el horario de operaciones.

Tabla 3. Costos de la tarifa eléctrica GDMTH

Cargo fijo	Costo Kw/Hr	Distribución	Capacidad
\$ 491.25	\$ 1.47	\$ 127.75	\$ 336.70

En el consumo de agua potable se incluyó la limpieza de la planta e higiene del personal este coste se detalla de acuerdo con la tarifa de la Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ciudad Victoria (COMAPA), el consumo diario considerado es de $6m^3$ mensuales y un total anual de $1536m^3$. A Continuación la tabla muestra el costo de la tarifa de agua y alcantarillado por la COMAPA.

Tabla 4. Costos de la tarifa del agua y alcantarillado por la COMAPA

Costo de Agua m^3	\$6.67
Costo Alcantarillado	\$ 4.67

Entre los diferentes montos considerados dentro de la investigación se encuentra el costo mensual de arrendamiento del terreno de $900m^2$ en \$45,000 pesos, un servicio de teléfono e internet en \$1,500, gastos de mantenimiento por \$10,000, gastos de envío para la mercancía en \$45,000, renta de equipo como maquinarias de carga o transporte por \$40,000, envases y embalajes para el almacenaje del producto terminado en \$25,000. A su vez se utilizó un gasto en mobiliario y equipo estimado de \$150,000 para el adecuado funcionamiento de la empresa y la seguridad de los trabajadores. Para obtener los ingresos de la empresa se utilizó la capacidad de la línea de procesamiento de NFU la cual es de 900 Kg de caucho granulado por hora, esta se multiplica por las horas de trabajo y a su vez por los días de trabajo al año de acuerdo con la Ley Federal del Trabajo. Una vez calculadas las toneladas procesadas de caucho granulado al mes se multiplica este valor por el precio promedio de \$3,400 pesos por tonelada en el mercado al año 2022.

La demanda de caucho granulado a nivel mundial sigue en aumento por su aplicación en diferentes áreas, como el asfalto de caminos y carreteras, sistemas de absorción de vibraciones para estructuras ferroviarias, modificación de las propiedades del hormigón entre otras. El modelo aplicado para medir la factibilidad económica de la empresa es la utilización de la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente Neto (VPN). La TIR es la rentabilidad que ofrece una inversión, es decir el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para comprobar la viabilidad de una inversión, cuanto mayor sea la TIR mejor será la inversión y esta a su vez viene relacionada con el Valor Presente Neto (VPN), por otra parte, el método del VPN realiza comparaciones entre los periodos en los que el proyecto o negocio tuvo diferentes flujos de efectivo para determinar si conviene o invertir en él. El valor depende de la tasa de interés a la que se ejecuta el cálculo del valor presente neto. A continuación, se muestra la fórmula aritmética para el calcular el VPN.

Ecuación 1. Fórmula aritmética para el cálculo del VPN

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+K)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+K)} + \frac{F_2}{(1+K)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+K)^n}$$

Presupuesto de inversión inicial:

	Monto	Mes	Total
Activos Fijos	\$6,265,000.00		\$6,265,000.00
Mobiliario y Equipo	\$150,000.00		\$150,000.00
Gastos Administrativos	\$289,363.67	6	\$1,736,182.00
Gastos de Personal	\$85,500.00	6	\$513,000.00
Mantenimiento	\$10,000.00	6	\$60,000.00
Total presupuesto de inversión	\$6,799,863.67		\$8,724,182.00

Donde I_0 es la inversión inicial, f_t son los flujos netos de efectivo, k es la tasa de descuento también conocida como costo o tasa de oportunidad, r es la tasa de retorno requerida sobre una inversión, y n es el número de periodos que dure el proyecto. Para calcular la VPN y TIR se utilizó el programa de cálculo Microsoft Excel utilizando los datos ya expuestos.

Resultados

Se analizó la factibilidad económica para la instalación de una empresa de reciclado de neumáticos en Ciudad Victoria, Tamaulipas, mediante la utilización del VPN y la TIR como indicadores económicos de rentabilidad, a continuación, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar las variables económicas en la empresa de reciclado de neumáticos. Para el cálculo del valor presente neto se utilizó el presupuesto de la inversión inicial derivado de la suma de los activos fijos, los cuales son la maquinaria por adquirir, el mobiliario y equipo, gastos administrativos como la luz, el arrendamiento, la caja chica, los gastos del personal como lo es la nómina de trabajadores y un gasto de mantenimiento para la empresa. El valor de los gastos administrativos, personal y mantenimiento se calcularon a un plazo de 6 meses de operación. Ya calculado el presupuesto de inversión inicial, se obtiene el monto necesario para empezar el proyecto, el cual fue un total de \$8,724,182.00 pesos. En la siguiente tabla se muestra el presupuesto de inversión inicial.

Para obtener el flujo de caja en un ejercicio económico de 12 meses se utilizaron los ingresos calculados para la línea de procesamiento con capacidad de 900 Kg/hr de polvo de cucho, con un costo promedio de \$3,400 pesos por tonelada en el mercado actual, a estos flujos de efectivo mensuales se les aplicó una tasa pronosticada de crecimiento del negocio de un 15% de acuerdo con las estimaciones esperadas por el mercado actual. Una vez obtenido los flujos de caja y el monto de inversión inicial se calculó el valor presente para poder estimar el valor que tiene en la actualidad la cantidad estimada de dinero que será recibida en el tiempo futuro para este ejercicio se utilizó una tasa de interés

del 9%. La siguiente tabla muestra el ejercicio del flujo de caja por 12 meses.

Tabla 6. Ejercicio de Flujo de caja por 12 meses.

Datos del Proyecto

Mes	Flujo de Caja	Valor Presente
0	-\$8,7424,182.00	-\$8,7424,182.00
1	\$612,000.00	\$531,457.89
2	\$703,800.00	\$592,374.38
3	\$809,800.00	\$624,982.14
4	\$930,775.50	\$659,384.83
5	\$1,070,391.83	\$695,681.24
6	\$1,230,950.60	\$733,975.62
7	\$1,415,593.19	\$774,377.95
8	\$1,627,932.17	\$817,004.26
9	\$1,872,121.99	\$861,976.97
10	\$2,152,940.29	\$909,425.25
11	\$2,475,881.33	\$959,485.35
12	\$2,847,263.53	\$1,012,301.06

Calculado el flujo de caja y el valor presente en el ejercicio económico de 12 meses se procedió a calcular el VPN restando el valor de la inversión inicial a la suma del valor presente de los flujos de efectivo a través de 12 meses de acuerdo con la formula del VPN, en la siguiente tabla se muestra el VPN calculado.

Tabla 7. Valor Presente Neto calculado

VALOR PRESENTE NETO	\$478,254.94
---------------------	--------------

Una vez calculado el VPN se calculó la TIR utilizando la inversión inicial junto con los diferentes flujos de caja calculado en el tiempo de 12 meses obteniendo una TIR mayor al interés utilizado en el proyecto. En la tabla siguiente se muestra la TIR calculada final.

Tabla 8. Tasa Interna de Retorno Calculada

TASA INTERNA DE RETORNO	9.82%
-------------------------	-------

Conclusiones

Se analizó la factibilidad económica para la instalación de una empresa de reciclado de neumáticos en Ciudad Victoria, Tamaulipas, tomando como indicadores económicos el VPN y la TIR para medir la factibilidad del proyecto. Se partió a partir de un presupuesto inicial obtenido por la suma de los activos fijos, mobiliario y equipo, gastos administrativos, gastos de personal y mantenimiento todos estos costos fueron contemplados para poder comenzar la operación de la empresa, además se calculó el flujo de efectivo pronosticado por 12 meses, con estos datos se calculó y analizó mediante el VPN y la TIR, de los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

- La empresa recicladora de neumáticos propuesta en Ciudad Victoria, Tamaulipas puede producir \$612,000 pesos mensuales en caucho granulado, con un rendimiento anual de \$478,254.94 pesos, siendo este un valor positivo para la operación del VPN.
- La TIR calculada de 9.82% es mayor a la tasa de interés propuesta en el ejercicio.
- La TIR estimada es competitiva en comparación a la tasa de interés de los bancos en México, convirtiendo el proyecto en una opción de inversión.
- Este estudio presenta una opción a la estrategia mundial que persigue disminuir los niveles de gases de efecto invernadero que potencian el calentamiento global mediante un modelo factible de negocio.

Referencias

- Abraham T. Gebremariam, a. v.-J.-R. (2021). Comprehensive study on the most sustainable concrete design made of recycled concrete, glass and mineral wool from C&D wastes. *Construction and Building Materials*(273), 121-697.
- Alain Bonnafous, P. J. (2004). Ranking transport projects by their socioeconomic value or financial internal rate of return. *Transport Policy*(12), 131-136.
- AMIA. (s.f.). Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, A.C. Recuperado el 24 de 02 de 2022, de <https://amia.com.mx/>
- Andrea Marchioni, C. A. (2018). Investment decisions and sensitivity analysis: NPV-consistency of rates of return. *European Journal of Operational Research*(18).
- Bas, E. (2013). A robust approach to the decision rules of NPV and IRR for simple projects. *Applied Mathematics and Computation*(219), 5901-5908.
- Carlo Alberto Magni, A. M. (2020). Average rates of return, working capital, and NPV-consistency in project appraisal: A sensitivity analysis approach. *International Journal of Production Economics*.
- Dan Wu, X. M. (2019). Are more economic efficient solutions ignored by current policy: Cost-benefit and NPV analysis of coal-fired power plant technology schemes in China. *Ecological Indicators*(103), 105-113.
- Gobierno de Mexico. (s.f.). Gob.mx. (Gobierno de Mexico) Recuperado el 29 de 02 de 2022, de <https://www.gob.mx/semarnat>

- Jan-linus Popien, C. T. (2022). Exploring recycling options in battery supply chains a life cycle sustainability assessment. *Procedia CIRP* , 434-439.
- Kailash Choudhary, K. S. (2019). Environment and economic impacts assessment of PET waste recycling with conventional and renewable sources of energy. *Life Cycle Engineering*(80), 422-427.
- Kim, H. S. (2017). *Meta-analysis of rate of return on road projects*. Taylor & Francis.
- Mellichamp, D. A. (2017). Internal Rate of Return: Good and Bad Features, and a New Way of Interpreting the Historic Measure. *Computers and Chemical Engineering*.
- Mohammad Eyni Kangavar, W. L. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement . *Case Studies in Construction Materials* (16).
- Muhammet Deveci, U. C. (2021). Evaluation of criteria for site selection of solar photovoltaic (PV) projects using fuzzy logarithmic additive estimation of weight coefficients. *Energy Reports*, 8805-8824.
- Qing-Zhou Wang, N.-N. W.-L.-M.-L. (2019). *Waste Tire Recycling Assessment: Road Application Potential and Carbon* . Elsevier.
- Raoul Voss, R. P. (2021). Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany. *Waste Management*(134), 206-2019.
- Richard Brealey, S. M. (2019). *En Principles of Corporate Finance*. McGraw-Hill Education.
- S, A. (2020). Performance and cost evaluation of solar dish power plant: sensitivity analysis of levelized cost of electricity (LCOE) and net present value (NPV). *Renewable Energy*.

DESARROLLO DE SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

Modelo de asignación de proveedores en una empresa de aftermarket

Luis Enrique Rivera Mireles

Lourdes Loza-Hernandez

Universidad Autónoma del Estado de México

Resumen— La selección de proveedores se ha convertido en una alternativa estratégica la cual toma en cuenta diferentes criterios de selección tales como el precio, la capacidad del proveedor y la calidad ofrecida, por mencionar algunos. La aplicación de herramientas cuantitativas que garantice una mejor selección de proveedores apoya a las empresas en la toma de decisiones, por lo anterior este trabajo muestra la aplicación de un modelo matemático para la asignación de pedidos a los proveedores de las diferentes autopartes que permita a la empresa caso de estudio ofrecer a sus clientes un mejor servicio, además de garantizar una ventaja competitiva y rentabilidad a largo plazo para esta. Los diferentes proveedores ofrecen ventajas sobre precio, tiempo de entrega, tamaño de lote, productos con características específicas para el cliente final y calidad del producto. El objetivo es optimizar los plazos de entrega planificados y la selección de proveedores mientras se minimiza el costo esperado. Con la aplicación del modelo matemático, conocido como de abastecimiento múltiple, se consideran las restricciones anteriores, se obtiene la compra de un ítem desde diferentes proveedores, cumpliendo con el objetivo planteado. El modelo es resuelto a través de GAMS y los resultados obtenidos muestran una mejora en la utilidad económica y servicio al cliente de la empresa.

Palabras Clave— Aftermarket; selección de proveedores; múltiples criterios; modelo matemático; abastecimiento múltiple

Abstract— The selection of suppliers has become a strategic alternative that takes into account different selection criteria such as price, supplier capacity and quality offered, to mention a few. The application of quantitative tools that guarantee a better selection of suppliers supports companies in decision making, therefore, this work shows the application of a mathematical model for the assignment of orders to suppliers of the different auto parts that allows the company case study to offer its customer a better service, in addition to guaranteeing a competitive advantage and long-term profitability for it. Different suppliers offer advantages regarding price, delivery time, lot size, products with specific characteristics for the end customer and product quality. The goal is to optimize planned delivery times and supplier selection while minimizing expected cost. With the application of the mathematical model, known as multiple supplies, which considers the previous res-

trictions, the purchase of an item is obtained from different suppliers, fulfilling the stated objective. The model is solved through GAMS and the results obtained show an improvement in the economic utility and customer service of the company.

Keywords— Aftermarket, supplier selection, multiple criteria, mathematical models, multiple sourcing

Introducción

El mercado de aftermarket consiste en las ventas de productos de repuesto para automóviles. El mercado de accesorios automotrices es el mercado secundario de la industria automotriz, que se ocupa de la fabricación, suministro, venta e instalación de partes del vehículo, herramientas y accesorios para vehículos ligeros y pesados [1].

La selección de proveedores es una actividad crítica en la gestión de la cadena de suministro debido al papel crucial de las características de los proveedores en el precio, a calidad, la entrega y el servicio en el logro de los objetivos de la cadena de suministro [2]. Los criterios del proveedor se dividen en atributos cuantitativos y cualitativos. La selección de los criterios adecuados depende de la situación de compra y sus necesidades, cada compañía debería elegir el criterio que se adapte con lo que espera del proveedor [3]. La selección de proveedores mediante un modelo matemático de múltiples criterios que requiere un intercambio entre diferentes factores cualitativos y cuantitativos para encontrar el mejor conjunto de proveedores [4].

En este artículo se propone la formulación de un modelo matemático para un caso de estudio, en el cual se toman en cuenta múltiples alternativas de abastecimiento para múltiples productos, teniendo restricciones como son: el costo de cada producto, la capacidad de abastecimiento y el tiempo de entrega que los proveedores ofrecen.

El trabajo está organizado de la siguiente forma: en la primera sección se realizó una introducción al artículo; en la segunda sección se presenta una revisión de literatura relacionada al planteamiento de modelos con múltiples abastecimientos; en la tercera sección se describe la metodología propuesta para el caso de estudio; en la cuarta sección se plantea el modelo matemático propuesto con los datos para el caso de estudio; finalmente en la quinta sección se muestran los resultados obtenidos de la solución del modelo matemático en el caso de estudio y las conclusiones del trabajo.

La selección apropiada de los proveedores es una parte crítica del éxito de una empre-

sa, si una compañía está implementando una estrategia de múltiple abastecimiento esto indica que tiene una relación comercial con uno o más proveedores para sus productos, lo cual ayuda al comprador a tener ofertas de precios y costos de envío más bajos [5]. Pese a que el abastecimiento múltiple se ha usado por años, no se ha desarrollado a tal grado de obtener decisiones confiables sobre el número de proveedores adecuado y la asignación de cantidades de pedido a cada uno [6]. El rendimiento de los proveedores usualmente es medido en términos de costo de entrega, calidad del producto, tiempo de entrega y el servicio [7 - 8].

Ghodsypour y O'Brien [9] consideran un caso de estudio donde una empresa puede adquirir uno o más de sus productos de múltiples proveedores, desarrollando una metodología de jerarquía y ponderando cada criterio para realizar la evaluación y elección de los proveedores, finalmente desarrollaron un modelo de programación lineal en donde se consideraron las siguientes restricciones: el nivel de calidad que puede producir cada proveedor, los tiempos de entrega para suministrar los productos y la capacidad de almacenaje de cada proveedor. También Ghodsypour y O'Brien [10] desarrollaron un modelo de programación no lineal entera mixta, el cual toma en cuenta el costo total de la logística, incluyendo precio neto, el costo de almacenaje, costo de transporte y costo de ordenar, además de las restricciones consideradas en el modelo son presupuesto, calidad y servicio que cada proveedor.

Kawtummachai y Van Hop [11] tienen como objetivo en su artículo estudiar los efectos de la asignación de órdenes, en donde la compañía puede ordenar los productos de múltiples proveedores. En la investigación están involucrados múltiples proveedores, que abastecen el almacén de una empresa, la compañía puede tomar la decisión sobre a qué proveedor se le asignan el pedido de acuerdo con las políticas de abastecimiento, propias de la empresa.

Jafari Songhori et al. [12] desarrollaron un marco de referencia con dos fases separadas pero dependientes, en la fase de asignación de compra de un producto, se usa un modelo de programación entera mixta multiobjetivo con dos objetivos, uno es maximizar la eficiencia general de cada asignación y el otro minimizar tres diferentes costos como son el costo total de ordenar, el costo de transporte y el costo total del inventario en tránsito. Nazari Shirkouhi [13] desarrollaron un modelo para la selección de proveedores con un sistema de múltiples precios y múltiples productos, el modelo intenta minimizar las compras totales de la empresa y los costos de pedido. Debido al conflicto entre los objetivos del artículo, los costos totales de compra y pedido, se propuso un enfoque de programación de objetivos difusos para resolver un modelo matemático extendido.

Mohammed et al. [14] presentan una metodología integrada por cuatro fases para resolver la selección de proveedores y asignación de pedidos considerando criterios econó-

micos, ambientales y sociales. Fases: (1) desarrollo de un proceso analítico jerárquico la cual fue usada para ponderar los diferentes criterios; (2) desarrollo de una técnica difusa para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal; (3) un modelo de programación multi-objetivo fue desarrollado para obtener la óptima asignación de cantidad adquirida para cada proveedor incluyendo 5 objetivos como son el costo esperado, el impacto ambiental, tiempo de viaje y maximizar el valor y; (4) finalmente, la técnica difusa para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal usada para revelar la solución final en un conjunto de soluciones.

Mortara y Tabone [15] proponen un modelo que obtiene la mejor combinación de proveedores, las cantidades a pedir a cada uno combinando el proceso analítico de jerarquías y la programación por metas en un entorno de abastecimiento múltiple.

En el presente artículo propone un modelo matemático con el objetivo de minimizar el costo total de adquisición de los productos de la empresa caso de estudio, estos costos incluyen el precio de adquirir un producto de distinto proveedor y los costos por ordenar a cada uno de los proveedores, tomando en cuenta las restricciones de capacidad y tiempo de entrega que considera cada proveedor, además, se considera el cumplimiento de la demanda esperada de los clientes durante los siguientes 6 meses.

Método

La metodología para el desarrollo del trabajo principalmente consistió en la aplicación de un modelo matemático en un estudio de caso, para la evaluación de alternativas de asignación de pedidos a diferentes proveedores para distintos ítems en una empresa de aftermarket. Inicialmente, se desarrolló una revisión de literatura de casos similares en donde una compañía puede comprar uno o más de sus productos de diferentes proveedores, además los métodos de solución que estos utilizan. Posteriormente se identificaron los costos de cada producto de diferente proveedor, la demanda pronosticada de cada producto, se identificaron la restricción de cada proveedor como son la capacidad de aprovisionamiento y los tiempos de entrega. La información anterior sirvió para plantear el modelo matemático con las diferentes restricciones. Finalmente se llevó a cabo un análisis de resultados para comparar la situación actual con la propuesta de solución para la empresa caso de estudio.

Actualmente en la literatura existen modelos que son útiles para la solución de problema de selección de proveedores como ya fueron mencionados algunos de ellos, sin embargo el modelo matemático descrito por Ravindran y Warsing Jr [4] es aplicado debido a que en el proceso de asignación de pedidos ya se tiene seleccionados los proveedores para los diferentes productos y el modelo permite comparar los diferentes precios, capacidad

de cada proveedor en tiempo real y permite tener el menor tiempo de entrega posible para cada producto como el caso de estudio abordado lo requiere.

El modelo está constituido por las siguientes funciones:

A. Función Objetivo

La función objetivo (ecuación 1) tiene el objetivo de minimizar el costo total esperado, el cual se da por la multiplicación del precio de cada producto en cada proveedor por la cantidad a adquirir más la suma de los costos fijos de transporte que genera utilizar a un proveedor específico:

$$(1) \text{ Min } W \sum_j \sum_i P_{ij} \cdot X_{ij} + \sum_i F_j \cdot Z_j$$

B. Variables de decisión:

X_{ij} = Cantidad del producto i adquirida con el proveedor j .

$Z_j = \begin{cases} 1, & \text{Si el proveedor es elegido para adquirir algún producto} \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases}$

C. Parámetros

P_{ij} = Costo del producto i con el proveedor j .

F_j = Costo fijo de pedir al proveedor j .

D_i = Demanda pronosticada para producto i .

CAP_{ij} = Capacidad de abastecimiento del producto i del proveedor j .

TE_j = Tiempo de entrega del proveedor j .

$TEPROM_i$ = Tiempo de entrega promedio para el producto i .

D. Restricciones

Las restricciones que se toman en cuenta en el modelo son las siguientes:

1) Demanda: Se asume que la adquisición de la suma de los productos i a los proveedores j cumplen con la demanda pronosticada (ecuación 2).

$$(2) \sum_j X_{ij} \geq D_i \forall i$$

2) Capacidad: Representa el nivel de capacidad de abastecimiento que el proveedor j tiene para el producto i (ecuación 3).

$$(3) \sum_j X_{ij} \leq (CAP)_{ij} Z_j$$

3) Tiempos de entrega: Es el tiempo que le toma al producto i llegar al almacén desde el proveedor j sobre la demanda del producto i , se asume que debe ser menor al tiempo de entrega promedio necesario para cubrir la demanda del producto i (ecuación 4).

$$(4) \frac{\sum_j TE_j \cdot X_{ij}}{D_i} \leq TE_{PROM}_i$$

Caso de estudio

El caso de estudio analizado corresponde a una empresa dedicada a la compra y venta de refacciones automotrices, la cual por fines de confidencialidad se omite el nombre de la empresa, así como su ubicación. Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto los datos analizados fueron obtenidos directamente del personal dedicado a realizar la actividad de selección de proveedores para la empresa. La empresa actualmente comercializa 1319 números de parte, la empresa necesita hacer la adquisición de sus productos para poder cumplir con la demanda pronosticada dentro de los próximos 6 meses, el comprador tiene que determinar la asignación de cantidad de pedido de cada producto a ser abastecido de diferente proveedor, la empresa caso de estudio adquiere sus productos de cuatro alternativas como proveedores potenciales: i. productos importados de China, ii. productos importados de Estados Unidos de América de dos proveedores distintos y iii. productos de empresa Nacional. Los diferentes proveedores ofrecen ventajas sobre precio, tiempo de entrega, tamaño de lote, productos con características específicas para el cliente final y calidad del producto.

A. Definición de la demanda

La demanda es pronosticada por el gerente general de la empresa caso de estudio, está diseñada para determinar una demanda mensual de cada producto, en este caso para determinar la cantidad de cada producto a adquirir, se toma en cuenta la demanda pronosticada para los próximos 6 meses, menos el nivel de stock que se tiene de cada producto, obteniendo la cantidad a adquirir, se muestra un ejemplo en la Tabla 1, para los primeros 5 productos a adquirir.

Artículo	Clave interna	Demanda pronosticada (6 meses)	Existencias	Por Pedir*
N1	K9609	6000	101	5899
N2	K8695	3300	1121	2179
N4	1016003	3300	1361	1939
N5	K9022	3000	611	2389
N6	ES409L	540	0	540

De los resultados obtenidos de este análisis, se obtuvo que, de 1319 números de parte comercializados, se tiene que realizar solamente la adquisición de 329 de estos en diferentes cantidades, para cumplir con el objetivo de cubrir la demanda pronosticada a un 100%.

B. Tiempos de entrega de cada proveedor

Los tiempos de entrega de cada proveedor para contar con el material disponible en la empresa, se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Tiempos de entrega de cada proveedor

Proveedor	Meses	Semanas	Días
S1	3	12	84
S2	0.75	3	21
S3	.75	3	21
S4	.25	1	7

Elaboración propia

Los tiempos de entrega del proveedor S1 son altos por el tiempo de manufactura y el tiempo de transporte, el tiempo de entrega para las empresas de Estados Unidos es de 21 días promedio y finalmente, el proveedor Nacional un promedio de entrega de 7 días. Para realizar el cálculo correspondiente a cada uno de los proveedores se aplica la ecuación 4, considerando que cada uno de los proveedores tiene un tiempo de entrega distinto, el cual varía de acuerdo a la disponibilidad del producto con el proveedor y la satisfacción cubriendo el tiempo promedio para cada producto.

Discusión y conclusiones

El modelo es validado para 329 números de parte, para los cuales se consideró la demanda pronosticada para los próximos 6 meses.

El equipo de cómputo utilizado para resolver el problema es Intel® Core™ i3-6006U @ 2.00 GHz, con 8 GB de RAM. El software utilizado la solución del modelo planteado es GAMS 36.2.0, el cual tardó en resolver el problema en 1.187 segundos.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- El costo total es de \$295,966.66 MXN, el cual corresponde al costo de adquisición de los productos que serán utilizados para cubrir la demanda de los próximos 6 meses.
- Para el proveedor 1, se tiene asignado un total de 48,181 piezas con un costo de \$161,248 MXN, los cuales estarán llegando para cubrir demandas desde el tercer

mes después de colocar la orden de pedido.

- Para el caso del proveedor 2, se tiene asignado la compra de 12,831 piezas con un costo total de \$68,351 MXN y este producto estaría cubriendo la demanda 1 mes después de realizar la orden de compra.
- Para el caso del proveedor 3 se tiene asignado la compra de 7,647 piezas con un costo de \$44,281.4 MXN, piezas con las que se estarían cubriendo la demanda, 1 mes después de realizar la orden de compra.
- Para el caso del proveedor 4 se tiene que realizar la compra de 2,451 piezas con un valor de \$7,096.31 MXN y la demanda de este proveedor se puede cubrir a corto plazo con 8 días de anticipación.

Los cálculos fueron realizados para cubrir la demanda al 100%, en algunos productos al no existir suficiente capacidad del proveedor que tiene entrega a corto plazo se consideró tener un faltante para surtir los productos dentro del tiempo establecido, esto es, en un periodo de 6 meses.

Conclusión

El mercado ha sufrido grandes cambios y esto hace que las empresas en el sector de aftermarket se preocupen por la disminución de costos dentro de cada proceso, uno de los procesos más importantes es el suministro de material de la empresa, la formulación del modelo muestra una propuesta de mejora en la satisfacción de la demanda prevista durante el periodo de tiempo, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad de suministro de cada proveedor y tiempos de entrega.

Una de sus prioridades de los modelos cuantitativos es facilitar la toma de decisiones dentro de las empresas, para el caso de selección de proveedores como eslabón de la cadena de suministro estos modelos apoyan directamente al personal dedicado a esta actividad. El modelo que se aplica para el caso de estudio analizado considera las restricciones de capacidad, tiempo de entrega y costo de cada uno de los proveedores ya definidos por la empresa, además de los parámetros propios de la empresa sin perder de vista la satisfacción de la demanda a través del tiempo. Es importante resaltar que los tiempos de entrega de cada proveedor son variables y el modelo que se aplica permite satisfacer las necesidades de la empresa y facilitar la toma de decisiones del personal a cargo de esta actividad.

El uso de esta herramienta matemática bajo escenarios reales ayuda a elegir las cantidades adecuadas para minimizar los costos de adquisición de los productos para cumplir con los objetivos de la empresa a corto plazo ya que se toma en cuenta que siempre es esencial tener el material en el momento que se necesite.

Para el caso de estudio analizado los resultados muestran que la demanda que se cubre con la planeación actual es de 39%, mientras que con el modelo que se propone se alcanza el 100% de la demanda en un periodo de 6 meses, lo cual genera un incremento en el costo total de la adquisición del producto, sin embargo, uno de los objetivos principales de la empresa es satisfacer la demanda de sus clientes a través del tiempo lo cual se alcanza con la asignación obtenida en el modelo.

Referencias

- [1] “Automotive aftermarket market analysis, size and trends global forecast to 2022-2030,” Thebusinessresearchcompany.com. <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/automotive-aftermarket-global-market-report> (accessed Jul. 07, 2022).
- [2] C. Kağncioğlu, “A fuzzy multiobjective programming approach for supplier selection in a supply chain,” *Bus. Rev.*, vol. 6, pp. 107–115, Jan. 2006.
- [3] H. Taherdoost and A. Brard, “Analyzing the Process of Supplier Selection Criteria and Methods,” *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 1024–1034, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.317.
- [4] A. R. Ravindran and D. Warsing Jr., *Supply Chain Engineering*. 2016.
- [5] A. Z. Zeng, “A synthetic study of sourcing strategies,” *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 100, no. 5, pp. 219–226, 2000, doi: 10.1108/02635570010304798.
- [6] A. C. Pan, “Allocation of Order Quantity Among Suppliers,” *J. Purch. Mater. Manag.*, vol. 25, no. 3, pp. 36–39, 1989, doi: 10.1111/j.1745-493x.1989.tb00489.x.
- [7] R. Narasimhan, “An analytical approach to supplier selection,” *J. Purch. Mater. Manag.*, vol. 19, no. 4, pp. 27–32, 1983.
- [8] O. Ben-Ammar, B. Bettayeb, and A. Dolgui, “Mathematical model for dynamic suppliers’ selection strategy in multi-period supply planning with lead-times uncertainty,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1040–1044, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.332.
- [9] S. H. Ghodsypour and C. O’Brien, “A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 56–57, pp. 199–212, 1998, doi: 10.1016/S0925-5273(97)00009-1.
- [10] S. H. Ghodsypour and C. O’Brien, “The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 73, no. 1, pp. 15–27, 2001, doi: 10.1016/S0925-5273(01)00093-7.
- [11] R. Kawtummachai and N. Van Hop, “Order allocation in a multiple-supplier environment,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 93–94, no. SPEC.ISS., pp. 231–238, 2005, doi: 10.1016/j.ijpe.2004.06.022.
- [12] M. Jafari Songhori, M. Tavana, A. Azadeh, and M. H. Khakbaz, “A supplier selection and order allocation model with multiple transportation alternatives,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 1–4, pp. 365–376, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2697-0.
- [13] S. Nazari-Shirkouhi, H. Shakouri, B. Javadi, and A. Keramati, “Supplier selection and order allocation problem using a two-phase fuzzy multi-objective linear programming,” *Appl. Math. Model.*, vol. 37, no. 22, pp. 9308–9323, 2013, doi: 10.1016/j.apm.2013.04.045.

- [14] A. Mohammed, R. Setchi, M. Filip, I. Harris, and X. Li, "An integrated methodology for a sustainable two-stage supplier selection and order allocation problem," *J. Clean. Prod.*, vol. 192, pp. 99–114, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.131.
- [15] V. A. Mortara and L. B. Tabone, "Selección de proveedores bajo una estrategia de abastecimiento múltiple en una empresa metalmeccánica," *Ing. Ind.*, no. 40, pp. 91–112, 2021, doi: 10.26439/ing.ind2021.n40.4809.

Implementación de técnicas de mantenimiento productivo total para la mejora de la disponibilidad de equipo

Marco Antonio Macias Lucio
Humberto Jasso Guerrero
Pedro Henoc Ireta Sánchez
Adriana Mexicano Santoyo
Héctor Coronado Reyes
Ana María Ortiz Elizalde
Tecnológico Nacional de México

Resumen— *En los procesos de manufactura el tener un métrico de desempeño fuera de objetivo es indicativo que existe un problema en el proceso y por lo tanto se requiere de un plan de acción de mejora. En un arranque de planta y/o proceso, donde el tiempo es el factor más importante, es prioridad tener todos los métricos dentro de meta, para cumplir con los planes originales de la compañía. El enfoque de este trabajo de investigación es el métrico de disponibilidad de equipo y sus componentes fundamentales. Por lo tanto, el primer paso para lograr el objetivo del presente es implementar la medición de los métricos de confiabilidad y mantenibilidad para los equipos considerados críticos en la manufactura de componentes electrónicos, esta información será proporcionada por las órdenes de trabajo que se generan diariamente. El segundo paso, mediante la metodología SMART (de sus siglas en inglés: Specific, Measurable, Attainable, Realistic, in Time) y técnicas de mantenimiento productivo total, analizar los resultados de las mediciones de confiabilidad y mantenibilidad, para determinar metas que se alinean con la demanda mensual del producto. Los resultados obtenidos demuestran que, en los 2 primeros trimestres, no se observa afectación de la disponibilidad real medida para el cumplimiento de la demanda del producto, más sin embargo para el 3er. trimestre fue necesario de la implementación de un plan de acción de mejora en la detección oportuna de fallas del equipo, de tal manera que se planean las reparaciones sin tener afectación en el plan de producción.*

Palabras Clave— Disponibilidad, Confiabilidad, Mantenibilidad, Mantenimiento Productivo Total, Metodología SMART

Introducción

Los componentes de un equipo requieren un plan de mantenimiento y debe llevarse a cabo, para que su factor de funcionabilidad sea satisfactorio cuando se requiera. El plan de mantenimiento es de suma importancia para las empresas ya que mantiene en buenas condiciones su activo, garantizando la funcionabilidad de sus equipos. (Lee, Saygin, & Al Janahi, 2020), describen la importancia del mantenimiento en la industria de manufactura inteligente, establecen como concepto que el mantenimiento de un equipo es la función básica para que se encuentre trabajando de manera correcta y eficiente, evitando fallas y disminuyendo costos por paro de producción; también los autores mencionan que el Mantenimiento Productivo Total (TPM por sus siglas en inglés) es la estrategia de mantenimiento a seguir para lograr una funcionabilidad óptima del equipo; en su trabajo de investigación mencionan como un ataque cibernético representa una amenaza para al métrico principal del TPM que es la eficiencia total de equipo (OEE por sus siglas en inglés). (Veer, 2017) hace referencia que el TPM es una innovación japonesa creada por la empresa Nippondenso del grupo Toyota, quienes fueron los pioneros en adjudicar actividades sencillas de mantenimiento a los operadores y asignando tareas de mejora en el equipo al personal de mantenimiento, esta nueva forma de trabajo se le llamaría mantenimiento productivo; lo anterior teniendo como objetivo el de maximizar la eficiencia del equipo. Para (Singh, Gohil, Shah, & Desai, 2013) , el objetivo del TPM es incrementar la productividad, así como también la moral y satisfacción del trabajador; es una innovación del mantenimiento para la optimización del equipo, eliminar paros de máquina y promover el mantenimiento autónomo mediante actividades diarias que involucra a diferentes áreas de soporte; resaltando que el principal indicador del mantenimiento productivo total es la eficiencia total de equipo, el cual en su trabajo de investigación reportan un incremento del 16% de OEE (del 63 al 79%). (Zio, Fan, Zeng, & Kang, 2019), mencionaron en su trabajo de confiabilidad en la industria de la aviación, que el mantenimiento autónomo es una política en la cual se involucran a los departamentos de producción y mantenimiento para el cumplimiento de las tareas de mantenimiento de la máquina y proveer soluciones de mejora continua. (Du, 2008), hace un énfasis de la importancia de los métricos: confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, en la maquinaria de la industria del petróleo, los cuales son factor para lograr metas de producción, reducir costos de operación, tener una ventaja competitiva y una mejor seguridad laboral.

La eficiencia total del equipo se determina por 3 factores: calidad, efectividad y disponibilidad. Este último, (Martínez, 2007) la define como: la probabilidad de que un equipo entre en funcionamiento y se mantenga en operación durante un periodo de tiempo establecido y hace énfasis que los paros planeados del equipo no entran en el cálculo de este métrico. Por lo tanto, los paros no planeados son los que afectan el métrico de disponibilidad, de acuerdo con (Porrás, 2011), son aquellos que no están contemplados en la programación de la producción de la máquina, disminuyendo el tiempo la cual es

productiva, generando pérdidas de dinero para la empresa, afectaciones en la entrega a tiempo del producto, insatisfacción del cliente, emergencias de mantenimiento, fallas en la materia prima, suministros de planta, y de operación. Una metodología que se utiliza para establecer objetivos en el mantenimiento es la técnica SMART (del inglés: Specific Measurable, Attainable, Realistic, in Time). Para (Macro & Micro, 2016), la metodología SMART plantea objetivos o metas, que motiva y orienta a la ejecución de acciones, facilitando el saber cómo actuar en una problemática presentada. (Knobl, 2018), menciona que una de las claves para ser productivos, es el saber plantear los objetivos de una manera adecuada; con metas concretas que nos permiten analizar nuestro desempeño y medirlo de una manera sistemática; utilizar los objetivos SMART es una manera organizada de realizar el trabajo. (Trenza, 2019), describe en su trabajo, que la clave para alcanzar los objetivos es que sean bien definidos, definir el objetivo es el primer paso antes de establecer cualquier acción, el objetivo debe de tener tres características: claro, conciso y concreto. (Fuentes, 2019), recomienda que el primer paso es el de medir el tamaño del objetivo, ya que, si es demasiado grande, se deben de crear subobjetivos, para que sean logrables en tiempo, los mismos siguiendo la metodología SMART; el segundo paso es que los objetivos se deben de formular de una manera positiva, de modo que, el enfoque es en una solución adecuada.

(Coulson-Tomas, 1993) establecen que, con la utilización de herramientas de calidad, se puede desde medir el estado de un proceso hasta conocer las causa efecto del mismo. En este trabajo de investigación se utilizarán las herramientas de calidad Pareto y diagramas de Ishikawa. (Márques de Sa, 2007) describe la técnica de Pareto como la que evalúa las prioridades de un proceso en medición y la de Ishikawa como la que correlaciona posibles causas a un efecto en específico. (Guariente, Antonioli, Ferreira, Pereira, & Silva, 2017) describen cómo el mantenimiento autónomo fue utilizado como una herramienta para mejorar la disponibilidad de equipo en la línea de producción de tubos de aluminio, la cual les resultó en una mejora del 10%. (Moreira, Silva, Correia, Pereira, & Ferreira, 2018) en su trabajo describe como mejorando el tiempo de ajuste de calibración en máquinas de impresión, se logró una mejora del 2% de OEE (Eficiencia Total de Equipo), como parte de una mejora de disponibilidad de equipo. El (Foro Economía Digital, 2019) , recomienda hacer los siguientes cuestionamientos para obtener mejor definición de los objetivos, las cuales son conocidas como 5W y 1H (por sus siglas en inglés: when, why, where, who, what, how) ¿cuándo?, ¿por qué?, ¿dónde?, ¿quién?, ¿qué? y ¿cómo?, así como también en seleccionar el métrico que se utilizara para medir la eficacia.

Derivado a lo anterior se presenta un caso de estudio donde se evalúa el comportamiento de un proceso nuevo en una planta de manufactura de componentes electrónicos, además el establecer metas de disponibilidad para el equipo crítico por lo que utilizo la metodología SMART. Para determinar las metas de disponibilidad por trimestre, serán

de acuerdo a la demanda del producto que se tienen por pronóstico del departamento de control de producción, y las mediciones reales de disponibilidad de equipo deben de cumplir con el pronóstico de la disponibilidad requerida, caso contrario, se implementará un plan de acción para mejorar el métrico de disponibilidad para evitar afectaciones con los clientes. Las acciones de mejora se enfocan en la confiabilidad y la mantenibilidad de la maquinaria, mediante el análisis de la información y el uso de herramientas de calidad.

Por último, este artículo se divide en las siguientes secciones: 2) Metodología, 3) Datos recolectados 4) Análisis de resultados 5) Plan de acción de mejora y 6) Conclusiones.

Metodología

A. Descripción de la metodología SMART

Los pasos a seguir en la metodología SMART se presentan a continuación en la figura 1, así como también las respuestas adecuadas al caso e estudio:



Figura 1

fuelle: <http://mongeguerrero.com/objetivos-eficaces-a-traves-de-la-metodologia-smart>.

1. Especifico. ¿Qué?

Disponibilidad de equipo necesaria (meta) para cumplir la demanda de producción.

2. Medible. ¿Cuánto?

Del 77% para la demanda del trimestre 1 y seguimiento hasta trimestre 4 de acuerdo al pronóstico de la demanda.

3. Alcanzable ¿Cómo?

Cumpliendo con los objetivos de confiabilidad (MTBF) y mantenibilidad (MTTR) del equipo.

4. Realista ¿Con qué?

Información suministrada por las órdenes de trabajo de los equipos, en específico los tiempos de paro no planeados.

5. Tiempo ¿Cuándo?

Cada 3 meses.

Datos recolectados

Para el cálculo del métrico de disponibilidad de este trabajo de investigación se utilizó la información de los paros no planeados que se registraron en las órdenes de trabajo de mantenimiento en los periodos de tiempo señalados. Esta información y con la ayuda de la metodología SMART, nos ayuda a determinar la disponibilidad necesaria para cumplir con la demanda de producción en los tiempos determinados por la empresa.

En la figura 2, se puede observar que el proceso a medir para no afectar la salida de producto en tiempo planeado, es el de la imprenta, por lo que se considera crítico (por ser solamente 1 equipo) y es el punto de medición de los paros no planeados.

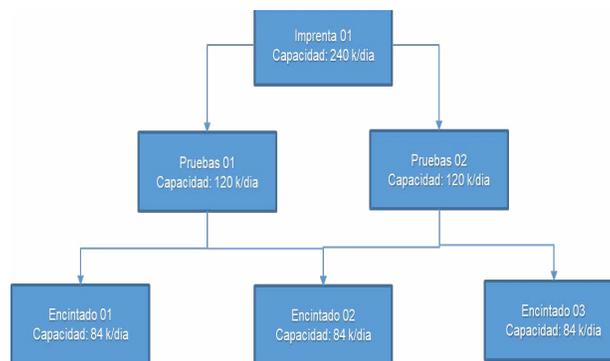


Figura 2. Proceso para medir la salida

Como se mencionó anteriormente, la fuente de información para el cálculo de la disponibilidad, fueron las órdenes de trabajo generadas en los periodos de tiempo correspondientes, los cuales contienen la siguiente información:

- Número de la máquina
- Fecha del paro
- Hora de inicio
- Hora de término
- Técnico que atendió la falla
- Comentarios de la reparación y refacciones utilizadas
- Con la información anterior, se realizaron los siguientes cálculos en una hoja de Excel, de forma diaria:
 - MTBF (Confiabilidad) = (Tiempo disponible – Tiempo de paro no planeado) / Total de paros no planeados, expresado en horas.
 - MTTR (Mantenibilidad) = Total de tiempo de paro no planeados/Total de paros no planeados, expresado en horas.

Una vez teniendo los valores de confiabilidad y mantenibilidad, se procede a calcular la disponibilidad del equipo, mediante la siguiente formula:

$Disponibilidad = MTBF / (MTBF + MTTR)$, expresado en porcentaje.

Los cálculos de MTBF y MTTR, se guardan en una hoja de cálculo (figura 3), de forma diaria, para obtener el resultado del mes y después comparar el desempeño de la disponibilidad del equipo con su meta, en caso de no ser la requerida será necesario de un plan de acción de mejora para alcanzar el objetivo o meta.

Fecha	# Maquina	Cant. OT	TM total	Hrs de Op.	MTBF	MTR	DISP
25-Nov	DPD01	6	3.5	24	3.42	0.58	85.42%
26-Nov	DPD01	8	3.5	24	2.56	0.44	85.42%
27-Nov	DPD01	8	3.1	24	2.61	0.39	87.08%
28-Nov	DPD01	7	2.9	24	3.01	0.41	87.92%
29-Nov	DPD01	5	3.8	24	4.04	0.76	84.17%

Figura 3. Hoja de cálculo de disponibilidad

Análisis de resultados

Las metas requeridas de disponibilidad por trimestre, de acuerdo al plan de producción se muestran en la siguiente figura 4.

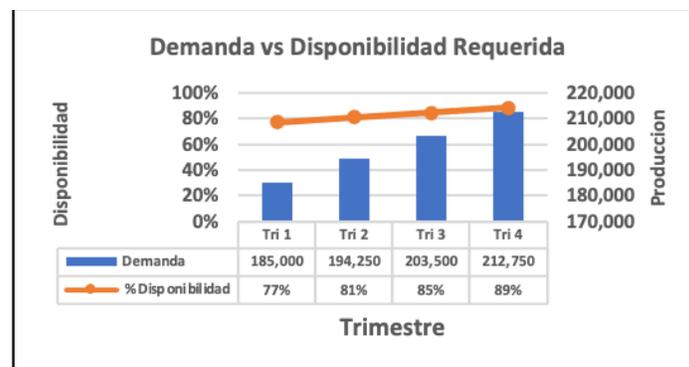


Figura 4. Demanda de producción vs. Disponibilidad requerida

Y en la figura 5 se muestran las metas para los factores de MTTR y MTBF, que nos determinan la disponibilidad del equipo.

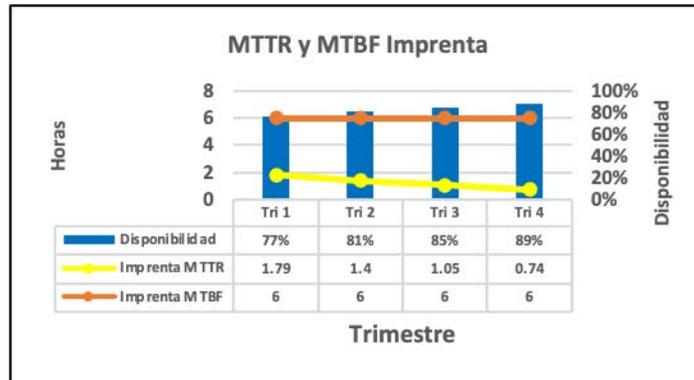


Figura 5. Metas de MTTR y MTBF

Los resultados obtenidos de disponibilidad a final de cada semestre se muestran en la figura 6, en la cual se observa que en el trimestre 3 no se alcanzó a lograr el objetivo de disponibilidad mínima para cubrir la demanda de producción, por lo que se requiere de un plan de mejora para aumentar el % de disponibilidad y cumplir con el objetivo el siguiente trimestre, considerando que para el siguiente trimestre la disponibilidad que se requiere es de 89%.

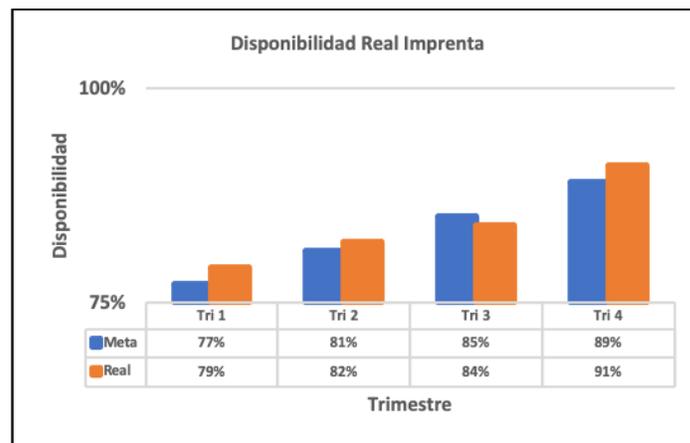


Figura 6. Disponibilidad real por trimestre

Plan de acción de mejora

Tomando en cuenta la información proporcionada por las órdenes de trabajo del trimestre 3, se procede a realizar una gráfica de Pareto para determinar que modos de falla se requieren de disminuir con la finalidad de aumentar el factor de disponibilidad. El diagrama se puede observar en la figura 7.

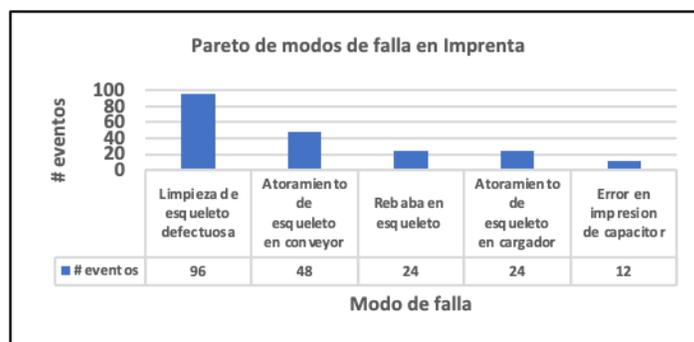


Figura 7. Pareto de fallas de trimestre 3, proceso de imprenta

Una vez analizado los principales modos de falla utilizando el método de Ishikawa (causa – efecto), se procede a enlistar una serie de actividades nuevas para el operador o técnico para buscar prevenir las fallas que impacten en el métrico de disponibilidad. Las cuales se muestran en la figura 8.

	Modo de falla reportado	Accion preventiva	Herramienta utilizada	Frecuencia	Metrico impactado
1	Limpieza de producto fuera de especificacion	Revision de alineacion de boquillas de media	Gage GO/NO GO	Cada grupo	MTBF
2	Presion de media fuera de especificacion	Revision de presion de media	Manometro	Cada 12 hrs	MTBF
3	Maquina fuera de sincronia	Revision de parametro de velocidad	Display de Inversor	Cada 12 hrs	MTBF
4	Bandas danadas, flojas	Revision de condiciones	Ayuda visual	Cada 12 hrs	MTBF
5	Imprenta de producto fuera de especificacion	Revision de centrado de impresion	Ayuda visual	Cada grupo	MTTR
6	Presion de dado de corte	Revision de presion de dado	Manometro	Cada 12 hrs	MTTR
7	Producto terminado con rebaba	Medicion de rebaba	Vernier	Cada grupo	MTTR

Figura 8. Plan de acción de mejora para la imprenta

Las acciones 1 y 2 tienen como objetivo reducir las incidencias de la falta de limpieza del esqueleto o producto, las acciones 3 y 4 están enfocadas a reducir el problema de atoramiento del esqueleto en el transportador de la máquina y por último las 3 acciones restantes, a la detección oportuna de una rebaba fuera de especificación. Con la implementación de las acciones anteriores se tuvo como resultado en el trimestre 4, un incremento de 84% a 91% en la disponibilidad de equipo, cumpliendo así con la demanda de producción en el mismo trimestre. Ver figura 6, % de disponibilidad de trimestre 4.

Conclusiones

El enfoque en el mantenimiento autónomo ayuda a la detección de futuras fallas en la

maquinaria, así como también una ayuda para la disminución de los paros no planeados, lo cual perjudica al métrico de la disponibilidad de equipo. La ayuda de las inspecciones visuales o auditivas (ruidos no usuales en la maquinaria), utilización de calibradores pasa/no pasa, aparatos de medición, beneficia a la detección de una falla potencial en el equipo y con esta información un potencial paro no planeado se convierte en un paro planeado sin tener afectación en la planeación de la producción.

Agradecimientos

El autor desea agradecer al Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria por el apoyo recibido para el desarrollo del tema de maestría y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida.

Referencias

- Coulson-Tomas, C. (1993). *Quality Training Corporate Transformation* (Vol. 1).
- Du, J. (2008). Evaluation of equipment availability, reliability and maintainability plant.
- Foro Economía Digital. (2019). Método SMART, definición y algunos ejemplos prácticos. Obtenido de <https://foroeconomiadigital.com/blog/objetivos-smart-definicion-y-algunos-ejemplos-practicos/>
- Fuentes, E. (2019). Método SMART para formular correctamente objetivos. Obtenido de <https://liderexponencial.es/metodo-smart-para-formular-correctamente-los-objetivos>
- Guariente, P., Antonioli, P., Ferreira, I., Pereira, L., & Silva, F. (2017). Implementing autonomous maintenance in automotive components manufacturer. *Procedia Manuf.*
- Knobl, E. (2018). Objetivos SMART, que son y como utilizarlos.
- Lee, Y., Saygin, C., & Al Janahi, A. (2020). Cybersecurity Concerns for Total Total Productive Maintenance in Smart Manufacturing. *Procedia Manuf*, 38, 532-539.
- Macro, N., & Micro, N. (2016). *Planificación Estratégica*.
- Márques de Sa, J. P. (2007). *Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R*. Springer.
- Martínez, L. (2007). *Organización y planificación de sistemas de mantenimiento*. Centro de altos estudios gerenciales. Venezuela: Instituto Superior de Investigación y Desarrollo.
- Moreira, A., Silva, F., Correia, A., Pereira, T., & Ferreira, L. (2018). Cost reduction and quality improvement in the printing industry. *Procedia Manuf.*
- Porras, P. (2011). *Guía de optimización de disponibilidad*.
- Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., & Desai, S. (2013). Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop. *Procedia Eng.*, 51, 592-599.
- Trenza, A. (2019). Método SMART, que es y para que sirve. Obtenido de <https://anatrencia.com/metodo-smart-que-es-para-que-sirve/>
- Veer, S. (2017). Department of maintenance engineering. Sai University.
- Zio, M., Fan, M., Zeng, Z., & Kang, R. (2019). Application of reliability technologies in civil aviation: Lessons learnt and perspectives. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32, 143-15

Diseño de un modelo de gestión de inventarios de una empresa comercializadora de dispositivos médicos en el sur de Sonora

Alfredo Bueno Solano

Estefanía Barriga-González

Ernesto Alonso Vega-Telles

Ingeniería Industrial Instituto Tecnológico de Sonora

Resumen—*La variabilidad de la demanda es uno de los principales retos de las cadenas de suministro globales. El creciente énfasis en el tiempo de respuesta, ha venido a estrechar a los tomadores de decisión que, con tal de cumplir con el nivel de servicio comprometido con sus clientes, tienden a incrementar el número de pedidos y por consecuencia sus niveles de inventario. En este sentido, la gestión de inventarios es un elemento crítico para el funcionamiento y desarrollo de las organizaciones regionales que participan o desean participar en cadenas de suministro globales. En ese contexto la presente investigación presenta una metodología para clasificar el inventario y determinar las políticas que permitan administrar el almacén de la organización bajo estudio dedicada a la comercialización de dispositivos médicos, con el objetivo identificar la cantidad óptima de pedido, el punto de reorden y el inventario de seguridad, con la intención de reducir la variabilidad y disminuir los costos y crear un flujo eficiente y seguro de los recursos. Cabe señalar que con la presencia de la pandemia por COVID 19, de los últimos 2 años, el sector experimentó una importante variabilidad en su demanda, lo que evidencia la necesidad de contar con un adecuado sistema de gestión para cumplir con las metas de toda organización.*

Palabras Clave—Gestión de inventario; Variabilidad en la demanda; Nivel de servicio

Introducción

Las empresas hoy en día buscan satisfacer la demanda del cliente en un entorno altamente dinámico como en el que nos encontramos actualmente, exigiendo a las cadenas de suministro a gestionar de manera eficiente sus inventarios.

El control de inventarios es una herramienta que nos permite administrar nuestras exis-

tencias en almacén, tiene como objetivo reducir los costos de almacenamiento y contar con un alto nivel de servicio por lo que el sector salud no es ajeno a esta realidad.

El sector del equipo médico abarca una gran variedad de productos implicados en el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades. Un dispositivo médico es un producto, instrumento, aparato o máquina que se usa para la prevención, el diagnóstico o el tratamiento de enfermedades y dolencias, o para detectar, medir, restaurar, corregir o modificar la anatomía o función del organismo con un fin sanitario.

Desde el punto de vista internacional, la industria de dispositivos médicos ha crecido de manera sostenida, impulsada por los avances tecnológicos mundiales, la digitalización e incorporación de nuevas tecnologías, la cada vez mayor demanda por parte de la población, colocan al sector en un panorama de completo crecimiento y desarrollo. En 2018, el mercado mundial de dispositivos médicos se registró en aproximadamente USD 1533,97 Billones[1].

Con la crisis sanitaria de los años recientes, los sistemas hospitalarios colapsaron y algunos terminaron rebasados. La atención se centró en COVID-19, por lo que las adquisiciones de dispositivos y tecnología se volcaron en hacerle frente a la pandemia, mientras se dejaron de lado aquellos para otro tipo de intervenciones. [1]

La recuperación del mercado en territorio latinoamericano podrá observarse en distintas velocidades, pues esto depende del contexto de cada país; pero también en las diferentes instituciones que adquieren los dispositivos médicos. Durante la última década, el sector de dispositivos médicos en México ha presentado un crecimiento dinámico y sostenido, a partir del desarrollo de capacidades de manufactura por parte de las principales empresas del sector, que han encontrado en el país un socio clave para sus estrategias de inversión y negocios. México se ha convertido en el principal proveedor de productos médicos para el mercado más importante del mundo: Estados Unidos. [2]

El mercado de los dispositivos médicos en nuestro país tiene dos grandes vertientes. En primera instancia, son aquellos dispositivos convencionales que generan pocos márgenes de utilidad, pero debido a los volúmenes de venta se vuelven negocios rentables por otro lado, y quizás de nuestro mutuo interés, encontramos una vertiente en donde se requiere un alto grado de innovación para la generación de nuevos dispositivos diseñados de forma específica para tratamiento y diagnóstico de diferentes enfermedades. [3]

En cuanto al sector manufacturero, la industria de dispositivos médicos en México está compuesta principalmente por pequeñas y medianas empresas y, si bien ha mostrado un desempeño exitoso en procesos de manufactura y ensamble, esta es aun relativamente

joven. Tiene potencial para desarrollar cuadros tecnológicos más avanzados y con mayor nivel de integración en la cadena productiva. Durante la última década, México se ha convertido en uno de los líderes para la manufactura y ensamble de aparatos médicos a nivel mundial. [2]

La producción nacional se centra, principalmente, en equipamiento e instrumental médico poco sofisticado, incluyendo equipos de anestesia, de rayos X, de oxígeno, inhaladores, esterilizadores, equipos de ultrasonido o incubadoras. La mayoría de estos equipos son fabricados o ensamblados utilizando material y componentes importados. Algunos de ellos se diseñan en México, pero la mayoría se fabrican usando tecnología importada. [4] En este contexto, una problemática recurrente que las empresas del sector médico enfrentan está relacionado con el control adecuado de las fechas de vencimiento de los medicamentos, y la vigencia de los dispositivos médicos, teniendo en cuenta los elevados costos del inventario es importante el manejo adecuado del mismo.

Un aspecto que se debe tener en cuenta es definir una adecuada política de inventario que permita tener alineadas las compras con el consumo de los ítems que se manejan, esto permite tener un valor de inventario menor, además de minimizar la cantidad de medicamentos que tienen una fecha de vencimiento muy cercana. La organización mundial de la salud (OMS) reconoce la magnitud del problema de desabastecimiento de productos, por esta razón, es importante tener en cuenta esta posible situación a la hora de definir la política de inventario, por ejemplo, según el Instituto Nacional de Vigilancia de medicamentos y alimentos (Invima), entre enero de 2013 y junio de 2018, se presentaron desabastecimientos de 55 medicamentos en Colombia. [5]

La importancia de contar con un método adecuado para el manejo de inventarios no es simplemente por cumplir un requisito, sino porque esto se convierte en una ventaja competitiva que permitirá llevar un control y una buena comunicación entre las áreas de almacén y compras. Por lo tanto, esto permitirá conocer las cantidades adecuadas de productos a ordenar, optimizar el tiempo para las entregas de los clientes y mantener un nivel de inventario óptimo e ir a la par con los avances tecnológicos.

Tener un buen control de los costos del inventario, es de suma importancia para evitar ineficiencias en la gestión del mismo, así como también ayuda a minimizar los costos, contando con la correcta cantidad de existencias en almacén y satisfaciendo la demanda del cliente. Es por ello que la presente investigación tiene como objetivo, Diseñar un modelo de gestión de inventarios para una empresa comercializadora de dispositivos médicos, mediante la clasificación del inventario para determinar la cantidad óptima de pedido, el punto de reorden y el inventario de seguridad, para reducir los costos y crear un eficiente flujo de los recursos.

Con la aplicación de este modelo, dentro de la organización se pretende alcanzar un eficiente orden en el almacén, una adecuada gestión del inventario y un rápido flujo de información entre departamentos. Ya que la organización debe de estar preparada para los impactos de aquellas variables críticas y poder tener un diseño que permita la adaptación a los cambios que pueden surgir en las normas, tecnologías, en la sociedad, en el medio ambiente, etc.

Marco metodológico

En este apartado, se encuentran una serie de metodologías relacionadas al desarrollo del presente proyecto, en donde se muestran los pasos que se realizan para el cumplimiento del objetivo determinado. La primera metodología que se analizó fue la del proyecto “Modelo EOQ para reducir los costos de inventarios en la empresa Clasa SAC, Trujillo 2018” en la que la metodología que utilizó fue la siguiente según [6].

- Determinar la demanda anual en la empresa: En esta etapa se realiza una clasificación de inventarios, utilizando la clasificación ABC donde se seleccionan los materiales de la clase A, posteriormente se pronostica la demanda, considerando solo los materiales de la clase A que son los que representan la mayor inversión para la empresa. Después de probar diferentes modelos de pronósticos, se selecciona un modelo.
- Determinar el costo de adquisición de la empresa: En esta etapa se calcula el costo de adquisición de cada uno de los materiales de la clase A, se multiplica la demanda pronosticada anual por el precio de cada uno de los materiales.
- Determinar el costo de pedido en la empresa: En esta etapa se analizan los costos por pedido, en donde primero se calcula el tiempo que el personal involucrado en las actividades de abastecimiento dedica a elaborar el pedido desde su requisición hasta su recepción e inspección. Así mismo se considera el sueldo del personal, los servicios básicos, útiles de oficina, entre otros costos
- Determinar el costo de mantenimiento en la empresa: En esta otra etapa se calculan los costos de mantenimiento de cada material en el inventario, se seleccionan aquellos costos que impactan en el almacenamiento de los mismos y se estiman por cada unidad de material.
- Determinar la cantidad óptima de materiales y justificar la reducción de los costos de inventario en la empresa: En esta última etapa se diseña un sistema de gestión de stock basado en el modelo EOQ acorde con la demanda independiente y variable de los materiales de la Clase A, determinado el tiempo de aprovisionamiento, la demanda promedio, la desviación de la demanda, la desviación del tiempo de aprovisionamiento, el lote económico, el punto de reorden (ROP), el número de pedidos y el stock de seguridad.

La segunda metodología que se analizó fue la del proyecto “Modelo de inventarios para el control económico de pedidos en empresa comercializadora de alimentos” en la que la metodología que utilizó fue la siguiente según [7]

- Recopilación de información; la información que se describe en su proyecto se obtuvo mediante la observación directa, la información histórica y la realización de entrevistas al personal que labora en la comercializadora.
- Aplicación del método ABC; en esta etapa se aplica el método ABC para los ítems comercializados por la distribuidora, para decidir sobre cuál de estos se hará el análisis; para esto, se cuenta con los nombres de cada artículo vendido, sus presentaciones, precios unitarios y volumen demandado
- Implementar el cálculo del modelo EOQ; en esta etapa consiste en observar los productos que representan mayor importancia para la distribuidora; clase A.
- Cálculo de la Q óptima (Q^*) de cada ítem, el costo total y el número óptimo de pedido; En esta etapa consta de obtener los datos de las demandas, los costos de realizar un pedido, los costos de mantener el inventario, para después proceder a calcular el Q^* de cada ítem; lo cual representa la cantidad óptima que se debe pedir, para poder minimizar los costos de tenencia de inventarios y los costos de pedidos. A su vez, con el valor de Q^* para cada producto de la clase A, se calcula el costo total del inventario, para poder minimizar este costo, es importante saber cuántos pedidos se deben hacer para abastecer de forma correcta la demanda; en este caso se determina el número óptimo de pedidos, para finalizar con la aplicación de este modelo, se hace necesario indicar a la distribuidora en qué momento debe hacer un pedido de estos productos, donde se toma como base la cantidad de unidades en inventario; esto se conoce como el punto de reorden.
- Determinar el costo de mantener el inventario; En esta última etapa permite determinar el costo del producto y el costo de mantenimiento del inventario, lo que le permite a la organización implementar estrategias para su inventario y conocer el costo que tienen estos productos de clasificación A mantener en almacenados.
- Por último, se encontró como referencia la metodología implementada en el proyecto “Implementación de un sistema de gestión de inventarios en Melexa S.A.” en la que la metodología que utilizó fue la siguiente según [8].

Aplicación de instrumentos de recolección de información; En esta etapa se lleva a cabo la recolección de información como el código, la descripción y monto de cada inventario de la organización bajo estudio y se procede a realizar un análisis de inventarios ABC.

Aplicación del método de la clasificación ABC; En la siguiente etapa para la definición de los productos principales se maneja el método de inventarios ABC el cual sirve para catalogar los productos en tres jerarquías, en las cuales los productos de tipo A son los que mayor porcentaje representan en los costos de almacenamiento, los tipos B son aquellos

que generan costos de tipo medio y tipo C que son los menos representativos en cuanto a costo se refiere pero que son indispensables para cumplir con un servicio de alta calidad.

Análisis de la clasificación ABC; En esta etapa, una vez se identifica el inventario, se procede con la clasificación de los productos teniendo en cuenta el precio de lista y la demanda de los productos. Se realiza clasificación por costos ABC, donde los productos que representan hasta el 73% del costo total del inventario son clasificación tipo A, los que están entre 74% y 93% del inventario con clasificación tipo B y entre el 94% y 100% son clasificación tipo C, productos que no tienen un alto impacto en costo, pero que son importantes para el portafolio de productos que permiten cumplir con la actividad que desarrolla la compañía. Con esto se profundiza la investigación a los productos tipo A, ya que son realmente los de mayor relevancia en los inventarios de la compañía.

- Determinación de pronóstico de demanda; Pronóstico de demanda con método regresión lineal y promedio móvil, para la realización de pronósticos de demanda se utilizaron datos históricos. Con lo anterior se realiza el pronóstico para doce meses siguientes, para realizar el comparativo y determinar la previsión para los meses futuros.
- Determinación de la demanda; En esta etapa se calcula la media y la desviación estándar de la demanda de las referencias analizadas. Preferentemente se recomienda el análisis de los últimos 3 años.
- Determinación de los costos del inventario; En esta etapa se determinaron los costos involucrados de los productos según la clasificación ABC, los costos de venta, los costos indirectos, costos de almacenamiento y costo de pedir producto.
- Aplicación del modelo EOQ; Para empezar a aplicar el sistema EOQ se define anteriormente los costos de pedir y de almacenar, Una vez recolectados todos los datos se puede citar la ecuación fundamental para hallar la cantidad económica de pedido (EOQ), donde la Raíz y 2 son factores fijos de la fórmula, $C_2 =$ Costo de pedir, $D =$ Demanda anual del producto y $C_3 =$ Costo de almacenar el producto.
- Aplicación del punto de reorden y la toma de decisiones; Para optimizar aún más el proceso y dejar parámetros al área de compras también se va a implementar el punto de reorden, con este el departamento de compras sabe exactamente cuándo pedir, lo que hace más eficiente el trabajo que deben realizar y permite que junto con el dimensionamiento de EOQ esta área sea mucho más productiva, dando solución al problema planteado en primera estancia que es la existencia de equipamiento obsoleto, el cual ningún cliente está dispuesto a pagar.

Resultados

En este apartado se presenta el procedimiento implementado en la elaboración del modelo de gestión de inventario para la empresa bajo estudio, dicho procedimiento está

fundamentado en [7,8] el cual permite a la organización llevar un control del inventario en el almacén y al departamento de compras conocer la cantidades de inventario óptimo, en donde se requiere realizar un análisis de la demanda, la clasificación ABC del inventario y la extracción de los productos estratégicos para llevar a cabo el modelo que permitirá obtener la cantidad económica de pedido, el punto de reorden y el inventario de seguridad. En la figura que se muestra a continuación se presentan los pasos que conforman la metodología a seguir para el desarrollo del proyecto.



Figura 1. Diagrama del método empleado para el desarrollo del proyecto

A. Identificación de oportunidades de mejoras en el sistema de inventarios

En este apartado se presentan algunos productos con su costo y movimiento el cual permitió identificar distintas áreas de oportunidad en la organización como son:

- Baja rotación de productos en inventarios, propiciando obsolescencia, caducidad, deterioro en la calidad del producto.
- Ineficiente distribución del espacio en el almacén
- Software sub-utilizado por la falta de aprovechamiento de las funciones y poco uso.
- Ineficiencia en el proceso de trazabilidad en los productos en el almacén.

Si bien existen otras áreas de oportunidad de mejora de la empresa bajo estudio, en lo general todas apuntan a la necesidad de implementar un modelo de gestión de inventario, que ayude a tomar mejores decisiones entorno a la variabilidad de demanda, así como, a determinar las cantidades óptimas de pedido que eviten la acumulación de inventario, un aumento en el costo de almacenamiento y el riesgo en el inventario de deteriorarse.

Por lo tanto, se propone contar con un modelo de control de inventario, permitiendo a la organización reducir la cantidad en su almacén, reduciendo así costos y generando una efectiva comunicación entre los departamentos.

B. Análisis de la clasificación ABC

En la siguiente tabla se presenta un listado de 20 productos existentes en el almacén bajo estudio, los cuales forman parte del total del inventario que se busca clasificar con la implementación de la metodología ABC.

Tabla 1. Lista de productos del almacén

Clave	Precio unitario	Cantidad
MC-QU-E002	\$29.00	900
MC-QU-E015	\$4,100.00	20
AC-EL-L004	\$55.00	400
MC-QU-A092	\$76.50	1761
AC-TR-M035	\$25.00	200
MC-QU-A080	\$3.59	700
AC-DM-B010	\$65.00	22
AC-MO-E001	\$2.00	3000
AC-EL-L004	\$33.50	100
AC-EL-P018	\$75.00	100
AC-VA-V007	\$1,386.79	75
AC-GE-T002	\$44.40	392
MC-QU-E001	\$30.49	17
AC-TR-M035	\$35.00	129
AC-TR-M032	\$955.00	30
MC-QU-A092	\$90.00	981
AC-RX-P010	\$280.00	45
MC-GE-S005	\$120.00	56
AC-EL-L004	\$55.00	100
AC-EL-P018	\$90.00	200

La tabla 1, representa sólo una muestra y contiene la clave de cada producto, el precio que representan en almacén cada uno de estos productos y las unidades actuales en inventario.

Para la realización de la clasificación ABC se utilizó un documento en el cual se encontraba la información de todos los productos que la empresa comercializa y con la que se obtuvo el resumen que se muestra a continuación:

Tabla 2. Resumen de Clasificación ABC 2018

Zona	2018			\$ Almacén
	No. Productos	% Inversión	% Acumulado	
A	16	79.83%	79.83%	\$42,647,947.23
B	38	15.10%	94.92%	\$8,066,866.69
C	172	5.08%	100%	\$2,711,551.25
Total	226	100%		

En la tabla 2, se presenta el resultado arrojado en base a los datos del año 2018 con la aplicación del método ABC de clasificación de inventarios, en donde se observa que 16

productos se encuentran en la zona A, lo que equivale aproximadamente el 80% de inversión acumulada, esto quiere decir que es el monto de inversión más alto en el almacén. En la zona B se encuentra la cantidad de 38 productos. La zona C con 172 productos que representan un 5.8% del porcentaje de inversión, esto dando como resultado la cantidad de 226 productos equivalentes al 100% de la inversión. Con esta información se permite a la organización implementar estrategias para reducir la cantidad, por lo que la empresa debe de poner atención a los productos que se encuentran en la zona A los cuales son de prioridad y relevantes para la organización tanto en su flujo como en el monto.

Tabla 3. Resumen Clasificación ABC 2019

2019				
Zona	No. Productos	% Inversión	% Acumulado	\$ Almacén
A	12	78.76%	78.76%	\$34,431,070.75
B	17	15.93%	94.69%	\$6,964,521.78
C	193	5.31%	100%	\$2,231,599.30
Total	222	100%		

En la tabla 3, se muestra el resultado arrojado en base a los datos del año 2019 con la aplicación del método ABC de clasificación de inventarios, en donde se presenta que 12 productos se encuentran en la zona A, equivalente al 78.76% de inversión acumulada, esto quiere decir que es el monto de inversión más alto en el almacén. En la zona B se encuentra la cantidad de 17 productos, que equivalen al 15.93%. La zona C con 193 productos y con un 5.31% de inversión, dando como resultado una cantidad de 222 productos totales equivalentes al 100% de la inversión en almacén, se observa un aumento de productos en la zona C y una disminución en los productos de la zona comparándolo con el año anterior.

Tabla 4. Resumen de Clasificación ABC 2020

2020				
Zona	No. Productos	% Inversión	% Acumulado	\$ Almacén
A	26	79.78%	79.78%	\$29,703,578.02
B	44	15.17%	94.95%	\$5,647,181.53
C	186	5.05%	100%	\$1,881,349.59
Total	256	100%		

En la tabla 4, se presenta el resultado arrojado en base a los datos del año 2020 con la aplicación del método ABC de clasificación de inventarios, en donde se presenta que 26 productos se encuentran en la zona A, que representan el 80% de inversión acumulada.

En la zona B se encuentra la cantidad de 44 productos. La zona C con 186 productos representando un 5.05% del porcentaje de inversión, dando como resultado la cantidad de 256 productos equivalentes al 100% de la inversión, esto indica un aumento en la cantidad de productos y un incremento en la cantidad de productos que se encuentran en la zona A, tales productos son los que se consideran de prioridad para la organización y en los cuales se debe de hacer el enfoque para conocer la cantidad óptima de pedido.

C. Determinación de los productos estratégicos

Una vez conocido los productos y su clasificación, en conjunto con el departamento de compras, analizando la clasificación ABC de los tres años anteriores y con la experiencia de un equipo en la organización, se obtuvo una lista de productos estratégicos, los cuales son de suma importancia para la empresa. La lista de códigos es: 1)AC-EL-L004, 2) MC-EE-R003, 3)MC-EE-R002, 4)MC-EE-R00, 5)AC-EL-P018, 6)AC-TR-M031, 7)MC-QU-E002, 8)MC-QU-A086, 9)MC-QU-E001, 10)MC-QU- A095.

Entre los 10 códigos encontramos productos estratégicos como resucitador adulto, resucitador pediátrico, lápiz electrocauterio, mascarilla facial, entre otros que como se puede apreciar con apoyo de la clasificación ABC, tienen un gran valor para la organización, a continuación, se muestra la demanda del año 2020, para los diez productos clasificados como A, tal información nos permitirá aplicar las fórmulas de la metodología EOQ.

Tabla 5. Demanda y desviación de productos estratégicos en el año 2020

Código	Demanda anual (unidades)	Desviación	Desviación diaria
AC-EL-L004	42606	4318.33	143.94
MC-EE-R003	4843	456.09	15.2
MC-EE-R002	1019	101.55	3.38
MC-EE-R001	1103	73.49	2.45
AC-EL-P018	4658	252.62	8.42
AC-TR-M031	912	203.72	6.79
MC-QU-E002	61206	6247.68	208.26
MC-QU-A086	6880	1360.68	45.36
MC-QU-E001	42299	5330.93	177.7

En la tabla 5, se presenta la demanda anualizada en unidades del año 2020 de los productos estratégicos seleccionados, dichas demandas fueron extraídas en base al registro histórico de ventas. Cabe señalar que la demanda mensual de cada producto muestra una variabilidad importante. Por ejemplo, la demanda mínima del producto MC-QU-E001 durante el 2020 fue de 700 unidades en el mes de enero con diferencia de septiembre que tuvo una alta demanda de 15022, por lo que la variación arrojada de este producto es relevante. Esto genera la presencia de una desviación significativa, así mismo se puede

observar que cinco de los productos presentes en la tabla su desviación es más grande con relación a la demanda de otros.

Esta tabla permite obtener la demanda anual, su desviación anual y su desviación diaria, dichos datos son necesarios para la implementación del modelo de EOQ, en dónde se aplican fórmulas ya determinadas que requieren los datos extraídos que son la demanda como de su desviación.

Para establecer el Modelo EOQ se buscó definir el costo de ordenar y el costo de mantener relacionados a los productos estratégicos, para determinar estos costos se extrajo de una tabla proporcionada por el departamento de compras, el costo anual de mantener de cada producto, volumen y el costo de ordenar.

Tabla 6. Costo de Ordenar y mantener en el año 2202

Clave	Volumen (unidades)	Costo de ordenar	Costo de mantener
AC-EL-L004	25000	\$21.69	\$0.15
MC-EE-R003	1840	\$169.52	\$1.64
MC-EE-R002	1896	\$165.28	\$0.96
MC-EE-R001	1707	\$158.04	\$1.60
AC-EL-P018	3000	\$32.88	\$0.38
AC-TR-M031	200	\$476.18	\$28.82
MC-QU-E002	60000	\$18.95	\$0.08
MC-QU-A086	4101	\$351.61	\$0.67
MC-QU-E001	22000	\$17.65	\$0.06
MC-QU-A095	7880	\$104.51	\$0.84

En la tabla 6 se presentan la descripción de cada uno de los productos estratégicos seleccionados y los datos necesarios para la aplicación de modelo EOQ, los datos extraídos fueron el volumen del año 2020, así como el costo de ordenar y el costo de mantener de cada uno de los productos en estudio, dicha información fue otorgada por la organización. Esta información es importante ya que permite conocer cuánto le está costando mantener estos productos a la organización, dependiendo de la demanda de ese producto, como se muestra en la tabla 6 el código MC-QU-E001 es el producto con el menor costo de mantener y unos de los que tiene el volumen más alto, para conocer su costo total se multiplica el volumen por su costo para así determinar cuál es el producto que cuesta más en mantener.

D. Implementación del Modelo EOQ

En este siguiente paso y una vez obtenidos los costos de ordenar y el de mantener el inventario de cada producto proporcionados por el departamento de compras, se procedió

a generar el modelo EOQ. Al ser un modelo ampliamente estudiado en la literatura y por cuestión de espacio, nos permitiremos no presentar las fórmulas sin embargo pueden consultarse en [9,10]. Así mismo, para efecto de la ejemplificación en el presente artículo sólo se muestra el resumen de resultados para el producto MC-QU-E001 que incluyen la cantidad económica de pedido (Q), punto de reorden (ROP) e inventario de seguridad se muestra a continuación.

Demanda	138	Inventario de seguridad	1132
Desviación Estándar de la			
Nivel de servicio Σ (α2σ)	Γ'ε42		
Tiempo de entrega (Γ)	Γ2	Punto de Reorden (ROP)	3232
Días Laborales al año:	200		
		Tiempo entre pedidos (L)	31
Costo de Mantener (H)	0'00		
Costo de Ordenar (Z)	1'02	Número de pedidos por año (N)	8
Demanda Diaria (q)	Γε3		
Demanda Anual (D)	43200	Cantidad Económica de Pedido (Q)	4880
Modelo EOQ para MC-QU-E001			

Figura 2. Modelo EOQ de Esponja. Chica (MC-QU- E001)

En la figura 2, el modelo arrojó que en cada ocasión que se necesite realizar un pedido de MC- QU-E001 se van a ordenar 4989 unidades de ese producto con 8 pedidos realizados por año. De acuerdo con el resultado anterior, es necesario contar con un indicador que alerte al departamento de compras el momento correcto para generar una orden de compra del producto, es por eso que en el mismo modelo se encuentra el apartado del punto de reorden (ROP), Q es la cantidad de producto que se tendrá que ordenar, cada vez en la que la existencia del artículo toque o esté por debajo del punto de reorden que es de 3572 unidades. Para responder a la demanda variable del mercado es necesario contar con un inventario de seguridad (SS), el modelo nos indica que se tiene que contar con un inventario de mínimo 1132 piezas en almacén para cumplir con el cliente en caso de presentarse un cambio inesperado en la demanda.

E. Análisis de los costos de los productos estratégicos

Para el análisis de los costos de los productos se diseñó una herramienta que grafica el costo total de llevar el inventario por producto, se tomaron en cuenta 4 factores, las unidades a pedir, costo de ordenar, costo de mantener y costo total, con estos factores se generó un rango de unidades de las cuales se obtuvieron los costos y así realizar el análisis de costos de la tabla siguiente.

Tabla 7. Comparación de costos (MC-QU-E001)

Unidades a pedir	Costo de ordenar	Costo de mantener	Costo total
400	\$1.866,44	\$12,00	\$1.878,44
1750	\$426,62	\$52,50	\$479,12
2200	\$339,35	\$66,00	\$405,35
3550	\$210,30	\$106,50	\$316,80
4989	\$149,64	\$149,67	\$299,31
5889	\$126,77	\$176,67	\$303,44
6339	\$117,78	\$190,17	\$307,95
7239	\$103,13	\$217,17	\$320,30
8139	\$91,73	\$244,17	\$335,90

La tabla 7 muestra el costo de mantener, costo de ordenar y costo total de una lista de unidades a pedir, como primer lugar se encuentra la cantidad de 400 unidades las cuales tienen un costo total de \$1,878,44 y en último lugar la cantidad de 9489 unidades con un costo total de \$363.35 pero de acuerdo con el modelo EOQ y la tabla de los costos, la cantidad económica de pedido se encuentra en realizar una orden por 4894 unidades de MC-QU-E001 dando el menor costo total por la cantidad de \$299,31 por cada pedido al año.

En base a la tabla 7, se presenta la siguiente figura donde se puede observar el comportamiento de los costos y el punto de equilibrio en donde se interceptan las líneas indicando cual es la cantidad óptima a pedir y así mismo el costo de almacenamiento MC-QU-E001.

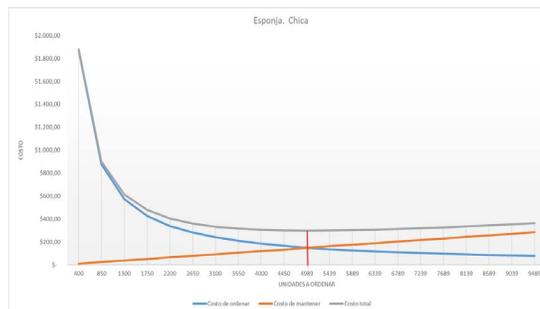


Figura 3. Punto de equilibrio de Esponja Chica

En la figura 3 se presenta la gráfica del punto de equilibrio de la Esponja chica, dicha gráfica se realizó en base a los datos de la tabla de los costos, en donde se presenta de manera clara las unidades a ordenar en el eje X y en el eje Y el costo, siendo la línea gris el costo total del producto el cual aumenta cuando las unidades a ordenar son menores y va disminuyendo en base al aumento de las unidades a ordenar, la línea naranja representa el costo de mantener, el cual aumenta cuando aumenta las unidades a ordenar y la línea azul es el costo de ordenar el cual aumenta cuando las unidades a ordenar van dis-

minuyendo por lo cual el punto de equilibrio de MC-QU-E001 es de 4989 unidades con un costo de aproximadamente \$200, con dicha información una vez replicada al resto de los productos se permite a la organización poder tomar decisiones para llevar a cabo acuerdos con sus proveedores para reducir sus costos de almacenamiento e implementar políticas, para ver el comportamiento del costo óptimo del resto de productos estratégicos.

Conclusiones

Con el presente proyecto se logró desarrollar un sistema de gestión de inventarios para una empresa comercializadora de dispositivos médicos en el Sur de Sonora. En el cual es posible determinar la cantidad económica de pedido, número de pedidos por año, tiempo entre pedidos por año, punto de reorden, inventario de seguridad y el costo total, todo esto para tener una correcta gestión de los inventarios y una comunicación eficiente entre las áreas involucradas.

Una de las importantes ventajas de este modelo de gestión de inventarios es que le permite a la empresa responder y anticiparse a los cambios repentinos que se den en la demanda, al contar con un nivel óptimo de inventario de seguridad, este permite satisfacer la demanda del cliente con mayor eficacia mejorando el nivel de servicio. Para lograr el objetivo y dar respuesta a la problemática fue necesario primero conocer su cadena de suministro y los factores que la afectan.

Otra variable importante que se tomó en cuenta en la realización del proyecto es que su demanda es variable, es decir, que se corre el riesgo de no poder abastecer la cantidad requerida por el cliente del algún producto específico, otra situación es que la mayoría de sus proveedores son extranjeros por lo que se pide una grande cantidad del producto por los costos que estos conllevan, lo que puede generar inventario acumulado en el almacén el cual corre el riesgo de irse deteriorando, ya que muchos de sus productos requieren estar actualizados. Por lo tanto, se llevó a cabo el análisis del historial de ventas del equipo médico para identificar la variación y poder diseñar un modelo de gestión de inventario que permita el óptimo flujo del inventario y un control de los costos de almacenamiento, ya que mantener el inventario suele ser muy costoso.

A través del análisis de la clasificación ABC y en base al criterio y la experiencia de un equipo interno, se logró determinar los productos estratégicos en los cuales nos enfocamos para poder implementar el modelo de gestión de inventario, con base a las ventas del año 2020 y con los datos necesarios que requiere el modelo. Teniendo como resultado las cantidades óptimas de pedido, inventario de seguridad y costo total de cada uno de los productos estratégicos, permitiendo a la organización conocer su situación actual e implementar políticas para el flujo y almacenamiento de sus productos.

Se recomienda a la organización aplicar este modelo a todos aquellos productos que se encuentran dentro de la clasificación A y de los productos innovadores, para conocer el tiempo de pedido y la cantidad óptima de inventario, como también llevar a cabo una capacitación del modelo, lo que permitirá a los escalones de la organización llevar una eficiente comunicación y clara interpretación de los datos arrojados, y de esta manera poder establecer políticas para un mejor control del inventario, determinar las cantidades de cada producto y un orden en el almacén en base a la importancia y al flujo de los productos.

También se recomienda a la organización que lleve a cabo un análisis del sistema de proveeduría para establecer sus tiempos de abastecimiento y cantidades de inventario, para poder reducir los costos de almacenamiento.

Por lo que este modelo permitirá a la organización disminuir la cantidad de inventario acumulado o de flujo nulo, como también reducir la probabilidad de incumplimiento hacia los clientes, y reducir los costos de mantener el inventario en el almacén.

Reconocimientos

La presente investigación es resultado del proyecto de práctica profesional de EBG y JACC, quienes agradecen la apertura de la organización bajo estudio y el apoyo brindado por las autoridades del Instituto Tecnológico de Sonora, a través del programa PROFA-PI-2022-0038.

Referencias

- [1] Ramírez, M. J. (2021). El mercado de dispositivos se reactiva lentamente en América Latina. Conexión Equipo Med. Obtenido de <https://www.conexiones365.com/nota/expo-med/innovacion/mercado-dispositivos-medicos-al>
- [2] Sandoval, M., Carreón, M., Ortiz, D. & Moreno, J., (2011). Mapa de ruta de dispositivos médicos. ProMéxico, 11-12
- [3] Bonal, R. M. (2016). LA INNOVACIÓN EN LA INDUSTRIA DE LOS DISPOSITIVOS.
- [4] Fernández, D. (2016). El mercado de equipamiento médico- hospitalario en México. México: ICEX.
- [5] Quispe, J. (2019). Gestión de abastecimiento de medicamentos aplicando el modelo EOQ (Economic Order Quantity) para la farmacia de un hospital categoría III. Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú.
- [6] Avalos, V & López, A. (2018). Modelo EOQ para reducir los costos de inventarios en la empresa Clasa SAC, Trujillo 2018 (Tesis de licenciatura). Universidad Privada del Norte. Trujillo, Perú

- [7] Causado Rodríguez, Edwin (2015). Modelo de inventarios para control económico de pedidos en empresa comercializadora de alimentos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14 (27), 163-177.
- [8] Castañeda, R., Yuly, & Silva, V. (2013). Implementación de un sistema de gestión de inventarios en MELEXA S.A. *Revista Universidad libre, facultad de ingeniería programa de ingeniería industrial*, Bogotá D.C.
- [9] Chase, R., Aquiliano, N., Jacobs, F. (2018). *Operations Management for competitive Advantage*. McGraw-Hill Higher Education. International edition.
- [10] Pérez Mantilla, Freddy Andrés y Torres, Fidel (2014). Modelos de Inventarios con Productos Perecederos: Revisión de la Literatura. *Ingeniería*, 19 (2), 9-40.

CADENAS DE SUMINISTRO ROBUSTAS

Sistema de asignación de la flota vehicular utilizada por una entidad del estado en Bogotá – Colombia

Erika Tatiana Ruíz Orjuela

Santiago Cruz González

Wilson Adarme Jaimes

Universidad Nacional de Colombia

Resumen—La gestión de la flota es una actividad de gran importancia a nivel táctico y operativo. El lugar en el que se realiza este trabajo es una entidad pública que cuenta con 18 dependencias y dentro sus procesos se requiere el uso de flota vehicular. Esta entidad presenta oportunidades de mejora en los procedimientos actuales de gestión de solicitudes, la asignación de tareas y los registros de control de flota. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una herramienta que permita la explotación de la información y una adecuada y posterior mejora en el servicio de la asignación de los vehículos de la entidad. Este trabajo se resolverá como un problema de asignación de vehículos a través de tres fases: Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes; Formulación y solución del modelo; validación e implementación del modelo. Se espera que los resultados de este proyecto contribuyan a la estandarización de los parámetros y variables del modelo, que permita controlar y monitorear actividades del parque automotor de acuerdo con la funcionalidad general de las solicitudes de servicio de transporte y que facilite la toma de decisiones en este aspecto, soportado en un cuadro de mando que permite el seguimiento a indicadores claves de desempeño y a su control. Como trabajos futuros se espera que la captura de datos permita establecer parámetros suficientes para aplicar algún modelo de programación lineal.

Palabras Clave—Asignación, Flota vehicular, Procesos, Cuadro de control

Introducción

La gestión de flotas es una actividad de gran importancia a nivel táctico y operativo a la que se enfrentan las empresas tanto públicas como privadas, ya sean de transporte de mercancías o de pasajeros [1] . Una gestión de flota adecuada permite obtener una eficiencia económica en un sistema de transportes y adicionalmente influye en la satisfacción del cliente [2].

Las organizaciones de transporte deben pensar en cómo administran su flota para operar de manera eficiente. Esta entidad en que se desarrolla el trabajo busca identificar oportunidades de mejora en sus servicios internos de transporte con el acompañamiento de la Universidad Nacional de Colombia a través del grupo de Investigación SEPRO (Sociedad Economía y Productividad). Parte importante del ejercicio conlleva la discusión y propuesta de mejora del proceso de asignación de la flota de transporte.

Actualmente, el proceso de asignación se lleva a cabo de forma manual, apoyada principalmente del conocimiento y habilidades del capital humano del área de transporte. Considerando el tamaño de la operación, se identifica un volumen muy alto de información que el personal debe manejar diariamente, haciendo la tarea muy dispendiosa y dando lugar a posibles riesgos operativos en el desarrollo de la labor. Además, los criterios utilizados para la asignación no han sido explícitamente definidos, debido a que se centran en observaciones empíricas y necesidades del día a día.

Los procedimientos actuales de gestión de solicitudes, su consolidación, la asignación de tareas y los registros de control de flota presentan oportunidades de mejora importantes en cuanto al uso y explotación de esta información para fines de captura de datos, automatización de las operaciones y comunicación con los usuarios del servicio. Consecuentemente, los mecanismos por los cuales se llevan a cabo estos procesos representan riesgos importantes para la misionalidad de la entidad asociados a pérdida de información, sesgos no cuantificados en la asignación y potenciales bajas en la calidad del servicio debidos a un escaso nivel de calidad de la información generada.

Este trabajo presenta la construcción de un modelo de asignación que permita facilitar el proceso que se realiza actualmente de manera manual basado en información suministrada por la entidad. La construcción del modelo es un proceso que se retroalimenta con la disponibilidad de información, por eso el desarrollo de la herramienta propuesta pretende disminuir potenciales riesgos operativos asociados a las actividades realizadas de forma manual, disminuir los tiempos de procesamiento de información y apoyar en la toma de decisiones de forma tal que logre racionalizar los costos asociados al número de personas que trabajan y las distancias que recorren brindando un nivel de servicio adecuado y contemplando las características asociadas al tipo de vehículos.

Adicionalmente, se formulan indicadores que permitirán analizar el desempeño del proceso mediante su seguimiento a través de una herramienta de visualización de datos que soporte la toma de decisiones en la operación, mantenimiento y costos monetarios de la flota de transporte.

En el capítulo II se presenta una revisión de literatura orientada a la asignación de vehículos. El capítulo III una breve descripción de la entidad, el capítulo IV el planteamiento del problema, el capítulo V la Metodología.

Revisión de literatura

A. Gestión Logística

La gestión logística incluye diferentes actividades como el transporte entrante y saliente, asignación de vehículos, almacenamiento, gestión de flotas, manipulación de materiales, diseño de redes logísticas, entre otros [3].

Dentro de las actividades primarias que proporcionan valor a una empresa se destaca la logística externa [4]. Como argumentan Popović, Vidović & Radivojević, los costos de transporte e inventario tienen mayor impacto en una compañía, alcanzando entre un 10 a 20% de los costos finales de un producto [5].

Por otro lado, el impacto medioambiental ocasionado por las emisiones de CO₂ proceden en un 75% por los diferentes modos de transporte. [6]. Un trabajo realizado por Suarez-Chilma & Sarache [7], describe cómo las emisiones de combustible influyen en aspectos como la capacidad de los vehículos, la velocidad del transporte y la distancia recorrida.

De acuerdo con M. Bielli, A. Bielli & R. Rossi [1], la gestión de flotas es una actividad de gran importancia a nivel táctico y operativo que enfrentan tanto empresas privadas como públicas, ya sea para el transporte de carga o pasajeros. Estos mismos autores explican que en la gestión de flotas se deben realizar las siguientes actividades: determinar la composición de la flota (tamaño y tipo de vehículo); asignar trabajos de transporte a los vehículos; diseñar las rutas para los vehículos; planificar y programar el mantenimiento y reemplazo de los vehículos. A continuación, se mencionan algunos aspectos importantes sobre estas actividades:

Tamaño de la flota: el problema del tamaño de la flota se centra en hacer coincidir la oferta y la demanda en un sistema de transporte. Consiste en determinar el número de vehículos que debe contener la flota, de tal manera, que se satisfagan las solicitudes de transporte, pero tratando de evitar altos costos fijos [9].

Diseño de rutas para los vehículos: el diseño de rutas para los vehículos es un problema que se conoce como “problema de ruteo de vehículos” (VRP por sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem). Un VRP se puede definir según [10], de la siguiente manera: “El problema de generación de rutas para vehículos se puede describir como el problema de diseñar rutas óptimas de entrega o recolección desde uno o varios depósitos a varias

ciudades o clientes dispersos geográficamente, sujeto a un conjunto de restricciones”.

Asignación de trabajos de transporte a los vehículos: Como se argumenta en [8-9], un modelo de asignación de vehículos se puede considerar como una extensión del modelo de asignación generalizado (GAP, por sus siglas en inglés, Generalized Assignment Problem). Un problema de asignación consiste en emparejar los elementos de dos o más conjuntos de manera óptima. Cuando se presentan dos conjuntos es común referirse a estos como “tareas” y “agentes”.

B. Asignación de vehículos

Algunos estudios de asignación cuentan con aplicaciones en sectores como: salud, transporte de pasajeros, carga, alquiler de vehículos, entre otros. En cada caso, la forma de solución del problema ha sido muy variada usando metaheurísticas como búsqueda local, algoritmos genéticos o búsqueda tabú.

Laurent & Hao (2007) [10], por ejemplo, optimizaron la carga de trabajo en la asignación entre conductores y limosinas, su formulación es dinámica debido a que el coordinador de las asignaciones puede modificar algunas restricciones de acuerdo con su percepción actual, muy similar a las situaciones de emergencia que expone la entidad. En los resultados reportados, obtuvieron horarios de alta calidad en los que se asigna la mayor parte de los viajes y se satisfacen todas las limitaciones mientras que se reducen los costos operativos, incluida la cantidad de recursos, la cantidad de actualizaciones y el tiempo total de inactividad. El enfoque también demostró ser flexible unificando el tratamiento de las partes estáticas y dinámicas de este problema en un solo marco.

Por su parte, Zak, Redmer & Sawicki [2], documentaron como en una empresa de transporte de pasajeros por carretera, de largo recorrido, con una flota heterogénea de autobuses en la que desarrollaron su trabajo, pudieron aumentar las utilidades en un 4.5%, logrando además un mayor aprovechamiento de la capacidad de asignación de vehículos (con un aumento de cerca de un 30%).

En trabajos más actuales como el de Detti, Papalini & Lara [11], se abordó el problema de “dial-a-ride” para aumentar la calidad del servicio y minimizar los costos en una aplicación médica usando una metaheurística que complementa un algoritmo de búsqueda tabú con otro de búsqueda local.

Otro caso de optimización diferente a las ganancias o costos fue optimizar la cantidad y el tipo de transporte que se requiere para cada actividad desde una red híbrida desarrollada por Choi, Lee & Park (2018) [12]. Se considera que los vehículos programados regularmente y los vehículos programados temporalmente, satisfacen la variación de la

demanda y encuentran soluciones muy cerca del óptimo global, siempre ofreciendo el mejor servicio.

Por otra parte, Yücenur [13], abordó el problema de asignación desde las distancias entre algunos autobuses y unos garajes en Estambul (problema con gran cantidad de buses y garajes). De acuerdo con los resultados computacionales, el algoritmo propuesto tiene un mejor rendimiento de agrupamiento en términos de la distancia desde cada punto de inicio de línea de bus hasta cada garaje de bus en el grupo, dando como resultado menores costos operativos y una mayor satisfacción entre los conductores.

En los últimos años, se han mejorado los algoritmos para minimizar el tiempo en buscar una solución óptima global que permita asignar y mejorar la ruta considerando el menor tiempo y restricciones como horarios de tiempo de recogida, características del vehículo, entre otros. Debido a que se tiene un amplio estudio en diferentes restricciones que permiten flexibilizarse para diferentes problemas. Problemas cotidianos en asignación se tiene especialmente para consideraciones como buses o camiones en diferentes compañías [14].

Como se analiza desde estos ejemplos, la optimización en la asignación ha servido principalmente para maximizar ganancias y mejorar las condiciones del servicio entre las empresas, sujeto a las restricciones del proceso de cada organización.

Planteamiento del problema

La organización objeto de estudio, busca identificar oportunidades de mejora en su servicio interno de transporte con el apoyo de SEPRO. Una de las partes más importantes de este trabajo, conlleva a la discusión y propuesta de mejora del proceso de asignación de la flota de transporte dirigida a los funcionarios, los cuales son parte fundamental en la operación de la entidad.

Actualmente, el proceso de asignación de la flota se lleva a cabo de forma manual, apoyada principalmente por el conocimiento y habilidades del capital humano del área de transporte. Considerando el tamaño de la operación, se identifica un volumen muy alto de información, la cual, el personal de transporte debe manejar a diario haciendo que la tarea sea muy dispendiosa y dando lugar a posibles riesgos operativos en el desarrollo de esta. Además, los criterios utilizados para la asignación no han sido definidos de manera explícita, debido a que se centran en observaciones empíricas y necesidades del día a día.

El procedimiento actual de gestión de solicitudes, su consolidación, la asignación de tareas y los registros de control de flota presentan significativas oportunidades de mejora

relacionadas con el uso y manejo de datos, estandarización de los procesos y comunicación con los usuarios del servicio.

La pregunta que busca resolver este trabajo es ¿qué elementos debe contemplar una herramienta que permita la explotación de la información y una adecuada y posterior optimización en el servicio de la asignación de los vehículos de la entidad? . El presente trabajo busca responder a los siguientes puntos:

- Desarrollo de un marco sujeto a los criterios de asignación.
- Generación de herramientas para apoyar las labores de asignación.
- Estructurar el manejo de información de solicitud y respuesta de la flota de transporte.

Metodología

Aplicar modelos a la resolución de problemas del mundo real implica desarrollar un mecanismo mediante el cual, de forma sistemática, se reproduzca la realidad lo más fielmente posible, tratando de entender cómo funciona un sistema y obtener las respuestas que se pueden esperar de determinadas acciones. Para la construcción de esta herramienta, primero se realiza un diagnóstico caracterizando del problema; posteriormente se define la mejor herramienta a usar (macros de Excel); y por último, se procede a su desarrollo junto a un formato estándar y una redefinición del proceso de acuerdo a las mejoras sugeridas.

- Tipo de estudio: exploratorio y descriptivo.
- Enfoque de la investigación: cualitativo y cuantitativo.
- Fuentes de información: trabajo de campo el cual permite capturar datos primarios asociados a localizaciones, tiempos, recorridos y demás variables de estudio. Con base en documentos, registros e informes se realizará el análisis de la información secundaria.
- Contexto Geográfico: Bogotá, Colombia.
- Objeto de estudio: parque automotor de la Entidad del estado.
- Población: vehículos propios y tercerizados.
- Instrumentos y técnicas de recolección de datos: se recolectó información asociada a rutas, velocidades y tiempos de recorrido, información de tiempos, costos y personal involucrado y transportado en cada uno de los recorridos, la cual fue recopilada a través del desarrollo de trabajo de campo en la ciudad de Bogotá.
- Análisis de datos: estadística descriptiva, indicadores de desempeño -KPI.

Considerando lo anterior se plantean tres fases, para la solución de este trabajo, en la siguiente figura se presentan y luego se detallan.

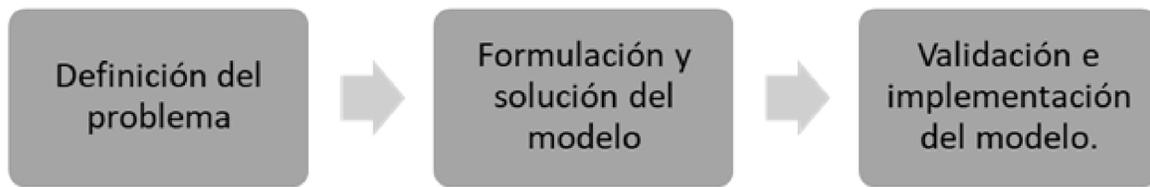


Figura 1. Fases metodológicas

Fase 1. Definición del problema: En este primer paso, es necesario estudiar y comprender cómo funciona el sistema, es decir, dar una caracterización de la situación actual de la organización y acotar el alcance de lo que se supone que se debe hacer. Es importante definir cuáles son los objetivos, las limitaciones de lo que se puede hacer, las relaciones entre las diferentes áreas de la organización y cómo se toman las decisiones, etc. Otro aspecto importante en esta etapa es la recolección de datos que servirán como parámetros al modelo propuesto.

Fase 2. Formulación y solución del modelo: Una vez definido el problema, es necesario representarlo de manera que sea conveniente para el análisis con algunas reglas. En particular, durante esta etapa es importante identificar las variables de decisión: en el caso de la entidad, se deben tomar decisiones con respecto al vehículo a entregar para cada pedido de transporte. De igual forma, se debe determinar una métrica de desempeño para conocer la calidad de una propuesta de solución al problema principal. Finalmente, se deben tener en cuenta los datos y parámetros que rigen la lógica del proceso. Luego de formulado el modelo se encuentra la solución inicial de este.

Fase 3. Validación e implementación: Este paso incluye un examen completo del modelo para encontrar y corregir cualquier defecto o error existente. Para tal fin se diseña un experimento, identificando la variable a medir y los factores, para posteriormente realizar el análisis estadístico de los datos. El objetivo es determinar si la solución da resultados consistentes, es decir, verificar si el modelo predice adecuadamente el comportamiento del sistema bajo estudio. Una vez validado el modelo, el paso final es ejecutarlo. Para ello, es necesario establecer instrucciones de uso escritas y comprensibles. En esta etapa es muy importante capacitar al personal involucrado en la toma de decisiones sobre el problema en estudio, por lo que se diseña un cuadro de mando para visualizar información clave del proceso.

Resultados

Para la identificación y caracterización del proceso actual, se obtuvo información a través de diferentes canales. Al inicio se solicitó a la entidad todo tipo de documentación que

permitiera conocer la situación actual del proceso de transporte, los vehículos que manejan, los formatos, etc. De forma adicional, se llevaron a cabo reuniones virtuales donde los actores involucrados en el proceso dieron sus apreciaciones y explicaron distintos aspectos del proceso. Finalmente, se hicieron visitas a las instalaciones de la entidad, donde se hizo un recorrido por la misma, se observó el manejo de la oficina de transporte, se aclararon algunas dudas y los actores del proceso explicaron más a fondo la operación de este.

Fase 1. Esta organización, tiene un componente altamente activo en el que atiende diversas actividades, operativos y emergencias dentro de la ciudad y cercanías, para ello cuenta con una sola unidad de transporte que concentra sus esfuerzos en atender las necesidades de movilidad de los distintos actores que cubren toda la operación. Dichas actividades varían de acuerdo con sus 18 dependencias, las cuales pueden requerir uno o más profesionales. Además de que pueden necesitar movilizar diferentes equipos para la ejecución del servicio, o incluso, recoger flora y fauna. Es por esto, que los requerimientos de vehículos son muy variables, pero se convierten en criterios a ser tenidos en cuenta por la gestión de transporte en el momento en que cada dependencia realice solicitudes.

Cada una de las dependencias envía al área de transporte por correo electrónico institucional en dos días a la semana, el formato de solicitud de vehículo diligenciado, documento en donde se relaciona la hora de inicio, hora estimada de terminación y objeto del desplazamiento. Este proceso de asignación lo realiza el encargado del área a través de un proceso estrictamente manual, sin embargo, este debe contemplar otros criterios que, si bien no están en el formato, se tienen en cuenta para la asignación de los vehículos a las solicitudes de transporte:

- Asignación de acuerdo con el nivel de calificación (habilidades del conductor).
- Los vehículos eléctricos tienen una restricción por la distancia máxima que pueden recorrer (90 km aproximadamente).
- Algunos vehículos hacen servicios durante toda la noche.
- Un vehículo puede realizar más de una ruta siempre y cuando haya finalizado el servicio anterior y esté disponible al momento en que solicitan el servicio (estas son solicitudes de emergencia).
- Carga laboral.

Después viene la programación, cuando ya se tiene realizada, el encargado de transporte notifica a los usuarios y conductores, indicando el punto de encuentro y la hora de salida. Posterior al recorrido el conductor debe diligenciar un formato, que firma el funcionario que recibe el servicio y entregarlo al encargado del área de transporte. Finalmente, la empresa contratista diligencia un formato mensual y lo envían al encargado de transpor-

te, quien lo revisa y lo envía al área financiera los cuales realizan el pago. En la siguiente figura se presenta el resumen del proceso descrito anteriormente.

Toda la flota se maneja en un mismo pool (flota propia y tercerizada) ofreciendo un total de 74 vehículos (20 vehículos propios y 54 vehículos en alquiler). Además, cada conductor tiene un único vehículo asignado. Cuando se ejecuta el servicio de transporte, el conductor debe recoger al o a los funcionarios, llevarlos a sus destinos y esperar con él durante el transcurso del servicio. En la siguiente figura se resume el proceso de asignación de flota actual.

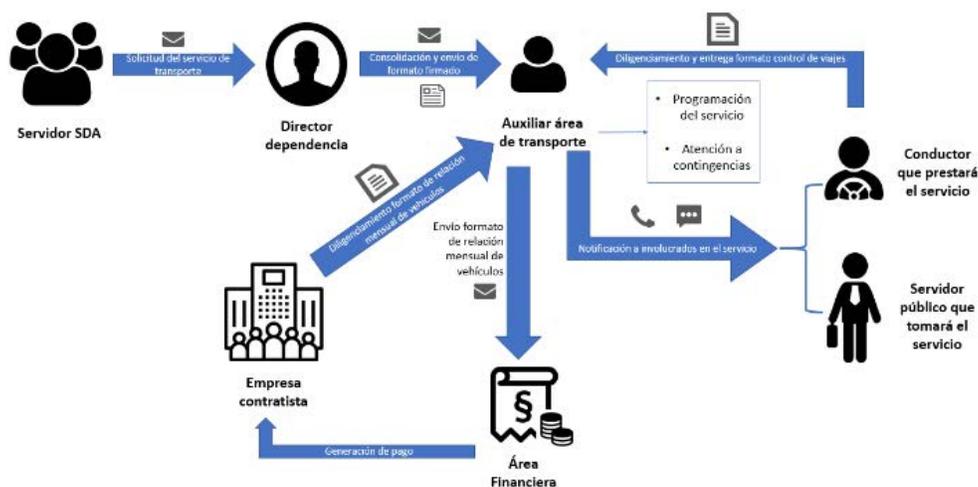


Figura 2. Descripción del proceso

Fase 2. El desarrollo del modelo de asignación tiene como objetivos los siguientes:

- Mejorar la gestión de la información relacionada a la solicitud de vehículos que facilite el proceso de asignación de la flota de transporte.
- Generar registros de asignación, que consigne la operación de la flota de transporte, posibilitando la estructuración de históricos más sólidos.
- Desarrollar una herramienta que permita la explotación de la información y una adecuada y posterior optimización en el servicio de la asignación del vehículo.

Los procedimientos actuales de gestión de solicitudes, su consolidación, la asignación de tareas y los registros de control de flota presentan oportunidades de mejora importantes en cuanto al uso y explotación de esta información para fines de captura de datos, automatización de las operaciones y comunicación con los usuarios del servicio. Por lo cual nuevas herramientas que permitan explotar la información, y gestionar nuevas actividades en el desarrollo hacia una asignación más eficiente (Figura 3).



Figura 3. Uso herramienta para diligenciamiento

A Partir de estas oportunidades de mejora se busca conseguir la mayor cantidad de información, y luego desarrollar una herramienta que permita a los encargados del área gestionar con mayor facilidad las solicitudes y asignaciones. Se busca lograr la integración de un modelo de asignación de acuerdo con las características de los vehículos, conductores y condiciones topológicas (Figura 4).



Figura 4. Objetivos del modelo de asignación

Este modelo de asignación busca:

- Estructuración:** La información de solicitudes será más fácil de almacenar y consultar.
- Trazabilidad:** Cada solicitud única se mantendrá desde su generación, hasta lo archivado y podrá seguir alimentando y mejorando el modelo.
- Agilidad:** El proceso de asignación podrá ganar celeridad y ser más amigable con los encargados.
- Mitigación:** Se disminuirá el riesgo de pérdida de información, o de solicitudes incompletas.

La herramienta contempla los siguientes parámetros:

- Fecha de servicio: representa la fecha en la que se desea realizar la tarea o el servicio.
- Hora de inicio: es la hora en que el vehículo debe comenzar a operar.
- Hora estimada de finalización: hora en la que se desea que haya sido terminada la tarea o actividad por la cual se solicitó el vehículo y que el vehículo haya regresado a su lugar de origen.

- Objeto del desplazamiento: es un campo abierto que permite hacer una trazabilidad sobre la razón de los diferentes desplazamientos.
- Tipo de vehículo: esta característica ayuda a definir si el vehículo sirve para hacer un servicio que lleve carga o no, es decir, si es necesario un vehículo que cuente con platón para cargar equipos, personas, animales u otros.
- Lugar de inicio: representa la localidad donde se comienza el recorrido

La asignación de los vehículos se realizará teniendo en cuenta:

- Características del vehículo.
- Tiempo de trabajo del conductor del día previo.
- Cercanía del vehículo respecto a las localidades.
- Disponibilidad del vehículo.

Una vez se ha verificado que los archivos sean los deseados se usa el botón programar en la misma hoja “padre” de Excel, para que como el nombre lo indica, se puedan programar las actividades de acuerdo al día o al conjunto de días según sea lo deseado y se obtendrá el vehículo y el conductor que mejor se ubique para la labor deseada. En cuanto haya logrado la correcta programación se le debe hacer llegar al conductor la información de la fecha y hora de la tarea programada.

Fase 3. En cuanto al desarrollo de la interfaz recolectora de datos de solicitudes de servicio de transporte, consiste en el uso de una plantilla de Excel diseñada de manera exclusiva para esta actividad y que permite digitalizar la información inicial para poder ser usada como entrada a la herramienta que apoya el proceso de asignación. En la plantilla, un valor agregado esencial es la posibilidad de realizar consultas de interés para filtrar información si es necesario y así tener un mayor control para determinar respuestas a preguntas de interés. Como, por ejemplo: ¿cuáles dependencias hacen mayor uso de los servicios de transporte?; ¿cuáles vehículos son los más usados en los servicios? o ¿qué localidades son las más frecuentadas al utilizar estos servicios de transporte?

En conclusión, se busca mejorar los procesos de trabajo del parque automotor de la entidad, especialmente en el proceso de asignación y digitalización de datos, debido a que se diagnosticaron procesos de trabajo manuales sin digitalización de información de interés, además de una falta de control operativo en cuanto al conocimiento de la situación del parque automotor.

Así mismo, se busca que en cualquier momento los actores involucrados tengan conocimiento del estado del servicio, puesto que permite detectar alertas y posibles riesgos para que puedan ser mitigados a tiempo y de la manera más conveniente posible, y en general, las herramientas propuestas buscan disminuir los tiempos de procesamiento

de información y sobre todo apoyar en la toma de decisiones. Esto de tal forma que se logre racionalizar los costos asociados al número de personas que solicitan el servicio y las distancias que recorren brindando un nivel de servicio adecuado y contemplando las características asociadas al tipo de vehículos.

La gestión de la flota vehicular a través de indicadores de desempeño (KPIs) es fundamental para la toma de decisiones; sin embargo, es crucial elegir las métricas de desempeño que mejor se ajusten al proceso. En la literatura se abordan casos de estudio estableciendo variedad de indicadores a tener en cuenta en la gestión de las flotas vehiculares; en general, los más comunes son los siguientes:

Mantenimiento: Se incluyen indicadores asociados al programa de mantenimiento preventivo, mediante una metodología de semáforo se establece el estado de los vehículos.

Costos: Contempla los indicadores asociados al costo de operación de la flota vehicular; por ejemplo costos de combustible, costos de mantenimiento.

Operación: Contiene estadísticas e indicadores que caracterizan el desempeño de la flota en términos operativos; por ejemplo: tiempos de servicio, utilización de la flota.

Cada una de las visuales debe contener los siguientes filtros generales

Tipo de vehículo: Está dado por el modelo del vehículo, que consta de año, marca y tipo.

Vehículo: Es un filtro más específico pues selecciona un solo vehículo de acuerdo a su placa.

Tiempo: Es un filtro que permite filtrar por ventanas de tiempo (días, semanas o meses)

El cuadro de mando tiene los permisos de ingreso correspondientes a las personas que cuentan con permiso para acceder a la información que se muestra ahí, y respecto al manual de usuario, en la entrega se adjunta un vídeo con explicación sobre la forma de uso del cuadro de mando. En la siguiente figura se visualiza una vista de este cuadro usando PowerBI de Microsoft ®.



Figura 5. Cuadro de mando

Conclusiones y recomendaciones

Como se mencionó en otros apartados de este documento, una gestión adecuada de la flota permite obtener una eficiencia económica en un sistema de transportes y adicionalmente influye en la satisfacción del cliente. También se debe tener en cuenta que una de las actividades importantes en esta gestión, consiste en asignar trabajos de transporte a los vehículos.

El diagnóstico realizado permitió establecer que el proceso de transporte presenta varias oportunidades de mejora, de manera puntual en lo referente a la asignación de vehículos a cada una de las solicitudes de servicio realizadas por las diferentes dependencias. Como solución al problema planteado, se propuso una herramienta de soporte en Microsoft Excel que facilita el proceso de asignación, mejorando la velocidad del proceso y considerando tanto los costos asociados a la distancia como la carga laboral de los empleados. Además de algunas restricciones de operación como por ejemplo: la posibilidad de los vehículos de transportar carga (pasajeros y carga o solo pasajeros). Es importante mencionar que la aplicación desarrollada, para la cual se elaboraron los respectivos manuales de usuario, realiza el proceso de asignación teniendo en cuenta algunas reglas, como, por ejemplo: la cercanía entre el lugar de inicio del servicio solicitado y el hogar de los conductores; además de la carga laboral de los conductores respecto al tiempo laborado el día anterior y el tiempo estimado de servicio del día actual.

Realizar una asignación para un horizonte de tiempo más largo permite en la mayoría de los casos obtener mayores ventajas operacionales. Lo anterior quiere decir que es posible realizar la asignación de forma semanal en vez de a diario, lo cual puede ayudar a reducir costos y equilibrar mejor la carga de trabajo de los conductores. La herramienta desarrollada por el Grupo SEPRO de la Universidad Nacional de Colombia, permite realizar la asignación para toda la semana programando cada día de manera individual, sin embargo, se deberían hacer unos ajustes para que tenga cuenta no solo el día anterior sino la semana y de esta manera, equilibrar cargas de trabajo.

Se recomienda trabajar en el potencial desarrollo de un sistema de planificación detallada / programación / control sobre una tecnología que otorgue una mayor robustez al proceso como, por ejemplo, la proporcionada por programación matemática. Diversos trabajos llevados a cabo con anterioridad, e incluso una aproximación académica desde este mismo trabajo, muestran una amplia gama de posibilidades adicionales relacionadas con decisiones en diferentes horizontes de tiempo. Ejemplo de ello, es la discusión sobre el tamaño optimizado de la flota, la programación con mayor anticipación de conductores, el balance de carga más preciso entre los diferentes conductores/vehículos y la inclusión de características de habilidades blandas relacionadas con la calidad del servicio y la percepción del usuario.

Referencias

- [1] M. Bielli, A. Bielli, and R. Rossi, "Trends in models and algorithms for fleet management," in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2011, vol. 20, pp. 4–18, doi: 10.1016/j.sbspro.2011.08.004
- [2] J. Zak, A. Redmer, and P. Sawicki, "Multiple objective optimization of the fleet sizing problem for road freight transportation," *J. Adv. Transp.*, vol. 45, no. 4, pp. 321–347, Oct. 2011, doi: 10.1002/atr.111
- [3] Council of Supply Chain Management Professionals, "SCM Definitions and Glossary of Terms," 2020. .
- [4] D. Cattaruzza, N. Absi, D. Feillet, and J. González-Feliu, "Vehicle routing problems for city logistics," *EURO J. Transp. Logist.*, vol. 6, no. 1, pp. 51–79, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>.
- [5] D. Popović, M. Vidović, and G. Radivojević, "Variable Neighborhood Search heuristic for the Inventory Routing Problem in fuel delivery," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 18, pp. 13390–13398, 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.05.064.
- [6] D. . Esty and Simmons P.J, "The green to gold business playbook: How to implement sustainability practices for bottom-line results in every business function," Hoboken, NJ John Willey y Sons, Inc., vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2011, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [7] V. F. Suarez-Chilma, W. A. Sarache, and Y. J. Costa, "Una Solución al Enrutamiento de Vehículos en Ciudades Montañosas Considerando Aspectos Ambientales y Económicos," *Inf. tecnológica*, vol. 29, no. 3, pp. 3–14, 2018, doi: 10.4067/s0718-07642018000300003.
- [8] G. Laporte, "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 59, no. 3, pp. 345–358, Jun. 1992, doi: 10.1016/0377-2217(92)90192-C.
- [9] F. Monnerat, J. Dias, and M. J. Alves, "Fleet management: A vehicle and driver assignment model," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 278, no. 1, pp. 64–75, 2019, doi: 10.1016/j.ejor.2019.03.021.
- [10] L. Kang, S. Chen, and Q. Meng, "Bus and driver scheduling with mealtime windows for a single public bus route," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 101, pp. 145–160, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.005>.
- [11] P. Detti, F. Papalini, and G. Z. M. de Lara, "A multi-depot dial-a-ride problem with heterogeneous vehicles and compatibility constraints in healthcare," *Omega (United Kingdom)*, vol. 70, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1016/j.omega.2016.08.008.
- [12] J. Choi, C. Lee, and S. Park, "Dantzig–Wolfe decomposition approach to the vehicle assignment problem with demand uncertainty in a hybrid hub-and-spoke network," *Ann. Oper. Res.*, vol. 264, no. 1–2, pp. 57–87, May 2018, doi: 10.1007/s10479-017-2730-x.
- [13] G. N. Yücenur, "Two-step Meta-heuristic Approach for a Vehicle Assignment Problem – Case from İstanbul/Turkey," *Promet - Traffic&Transportation*, vol. 32, no. 1, pp. 79–90, Feb. 2020, doi: 10.7307/ptt.v32i1.3156.
- [14] K. Sörensen, M. Sevaux, and F. Glover, "A history of metaheuristics," *Handb. Heuristics*, vol. 2–2, no. January, pp. 791–808, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-07124-4_4.

Erika Tatiana Ruiz Orjuela, Estudiante de Doctorado en Ingeniería, Industrias y Organizaciones de la Universidad nacional de Colombia, Magister en Ingeniería industrial e Ingeniera Industrial, Investigadora asociada al Grupo en Sociedad, Economía y Productividad – SEPRO con interés en Gestión de la cadena de suministro, optimización y mejoramiento continuo. <https://orcid.org/0000-0002-1047-9989>

Santiago Cruz González, Magíster en ingeniería industrial e ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, Investigador asociado al Grupo en Sociedad, Economía y Productividad- SEPRO, con interés en Gestión de la cadena de suministro y logística agrícola. <https://orcid.org/0000-0001-6590-8157>

Wilson Adarme Jaimes, Doctor en Ingeniería Industrial, Magíster en ingeniería industrial, especialista en gerencia de la producción y mejoramiento continuo e ingeniero industrial. Investigador Senior asociado al Grupo en Sociedad, Economía y Productividad- SEPRO, Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, con interés en Gestión de la cadena de suministro. <https://orcid.org/0000-0001-7401-223X>

Desempeño de los algoritmos Genético y Recocido Simulado para resolver el problema CVRP

*Adriana Mexicano Santoyo, Jesús Carlos Carmona Frausto,
Claudio Ramón Bravo*

División de Estudios de Posgrado e Investigación
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, ITCV

Sonia López Ruiz

Departamento de Ciencias Computacionales e Ingeniería
Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles, UdG

Resumen— *La distribución de productos es uno de los procesos logísticos en la industria que más gastos genera, ya que los productos deben ser distribuidos a los clientes en diferentes lugares, con diferentes solicitudes y utilizando vehículos con capacidad limitada. Dicho problema es conocido como Ruteo de vehículos con capacidad limitada CVRP en la literatura especializada. En las últimas décadas se han desarrollado varios métodos con diferentes técnicas para resolver el problema. El objetivo de este trabajo es hacer una comparativa del desempeño del Algoritmo de Recocido Simulado (SA, por sus siglas en inglés) y el Algoritmo Genético (GA, por sus siglas en inglés) los cuales se han caracterizado por ser útiles en la optimización de problemas complejos con rutas de reparto a clientes. La experimentación fue realizada utilizando 14 instancias del conjunto A y 16 instancias del conjunto B, ambas extraídas del repositorio CVRPLIB, además de comparar los resultados obtenidos con los de un trabajo del estado del arte que trabaja con el mismo grupo de instancias. Aunque los tiempos de ejecución de los algoritmos muestren que el algoritmo genético usa menos tiempo en promedio que el algoritmo de recocido simulado para obtener el resultado final, tanto para el conjunto A, como para el conjunto B, los resultados muestran que, aunque los algoritmos presenten una desviación estándar similar en la estabilidad. El algoritmo de recocido simulado en promedio obtiene mejores soluciones que el algoritmo de genético.*

Palabras Clave— Comparativa, algoritmo genético, algoritmo de recocido simulado, CVRP

Introducción

El problema de ruteo de vehículos (VRP), que fue introducido por primera vez por Dantzig y Ramser [5], es un problema de optimización combinatoria muy conocido en el campo de la gestión de operaciones de servicios y la logística. El problema de enrutamiento de vehículos con capacidad limitada (CVRP) según [4] es un problema de dificultad NP para determinar simultáneamente las rutas de varios vehículos desde un depósito central hasta un conjunto de clientes, y luego regresar al depósito sin exceder las restricciones de capacidad de cada vehículo. En la práctica, el problema tiene como objetivo minimizar el costo total de las rutas combinadas para una flota de vehículos. Dado que el costo está estrechamente asociado a la distancia, en general, el objetivo es minimizar la distancia recorrida por una flota de vehículos con diversas restricciones. El presente trabajo muestra la comparación del desempeño de 2 algoritmos, el algoritmo de recocido simulado, el cual fue elegido debido a su gran capacidad de salir de óptimos locales y realizar una búsqueda de soluciones en un entorno global [13], y el algoritmo genético, que tiene capacidad para trabajar con varios puntos simultáneamente abarcando así un espacio mucho mayor de búsqueda [9]. Ambos algoritmos usan como generador de soluciones iniciales, el algoritmo del vecino más cercano, el cual realiza el agrupamiento de clientes tomando como criterio principal la distancia entre cada uno de ellos [11]. Con la finalidad de determinar cuál algoritmo ofrece mejor desempeño se consideró la calidad de la solución en distancia recorrida, la desviación estándar de los resultados y el tiempo de ejecución promedio de cada algoritmo.

El resto del documento está estructurado de la siguiente forma: En la Sección 2 se incluye el marco conceptual donde se definen conceptos básicos utilizados en este trabajo. La Sección 3 describe algunos trabajos relacionados. En la Sección 4 se describe la forma en que se implementaron los algoritmos comparados. La Sección 5 presenta los resultados experimentales. Finalmente, la Sección 6 muestra la conclusión del estudio.

Marco conceptual

Modelo matemático del CVRP

El presente modelo matemático del CVRP se basa en la formulación de Radiy [19] y es presentado a continuación:

$$\text{minimizar } D = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{i < j}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a

$$\sum_{j < i} x_{ij} + \sum_{i < j} x_{ji} = 2, \quad (2)$$

$$\forall i \in V \setminus \{0\}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} x_{oi} = 2K, \quad (3)$$

$$\forall i \in V \setminus \{0\}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{\substack{h < i \\ h \in S}} x_{hi} + \sum_{i \in S} \sum_{\substack{i < j \\ j \in S}} x_{ij} \geq 2r(S), \quad (4)$$

$$\forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset$$

$$h = 0, 1, \dots, n; i = 1, 2, \dots, n; j = 2, 3, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V \setminus \{0\}, \quad (5)$$

$$i < j, (i = 1, 2, \dots, n-1; j = 2, 3, \dots, n)$$

$$x_{0j} \in \{0, 1, 2\},$$

$$\forall j \in V \setminus \{0\}, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

La función objetivo del modelo (1) consiste en minimizar la distancia total recorrida por la flota de k vehículos. La distancia total recorrida será igual a D , la cual se calcula sumando todas las distancias d_{ij} consideradas en las rutas de los vehículos.

Sujeto a:

La restricción (2) indica que cada cliente es visitado solamente una vez por un vehículo.

La restricción (3) indica que k vehículos entran y k vehículos salen del almacén. La restricción (4) abarca ambas restricciones, no solo la de eliminación de subrutas que no consideren al almacén, sino también la de capacidad, eliminando recorridos que si están conectados al almacén, pero violan la restricción de capacidad. Exige que cierta cantidad mínima de aristas debe salir y entrar de cualquier subconjunto $S \subseteq V \setminus \{0\}$.

$r(S)$ es la cantidad mínima de rutas requeridas para satisfacer la demanda en un cualquier subconjunto $S \subseteq V \setminus \{0\}$. El valor de $r(S)$ será:

$$r(S) = \left\lceil \frac{\sum_{i \in S} q_i}{Q} \right\rceil$$

En (5) y (6) se define el dominio de la variable discreta x_{ij} y puede tomar los siguientes valores:

Si $x_{ij} = 0$ significa que la arista (i, j) no es parte de alguna ruta de algún vehículo en la solución.

Si $x_{ij} = 1$ significa que la arista (i, j) es parte de alguna ruta de algún vehículo en la solución y aparece una sola vez.

Si $x_{ij} = 2$ significa que la arista (i, j) es parte de alguna ruta en la solución y aparece exactamente dos veces. Este caso en particular quiere decir que el vehículo sigue una ruta de la forma $0-j-0$.

Algoritmo del vecino más cercano

De acuerdo a González y Gómez [11] es un algoritmo que permite crear una ruta para cada vehículo, realizando un análisis de los puntos de clientes a visitar próximos posteriormente escogiendo el más cercano, siempre repitiendo el ciclo hasta alcanzar la capacidad del vehículo, sin embargo, el comportamiento del algoritmo puede llevarlo a obtener costos elevados. A pesar de esta limitación, el algoritmo da resultados cercanos al óptimo, razón por la cual generalmente se utiliza para calcular la solución inicial de alguna metaheurística.

Algoritmo de recocido simulado

Escobar y Linfati mencionan en [7] que este algoritmo simula la evolución de un sistema físico inestable de un equilibrio termodinámico a una temperatura fija. En cada ciclo de este procedimiento, una nueva solución (x') es seleccionada de forma aleatoria de las vecindades de la solución actual (x). Este algoritmo acepta nuevas soluciones de acuerdo a dos criterios: i) el valor de la función objetivo de la nueva solución es mejor y ii) el valor de la función objetivo de la nueva solución es peor, y un valor aleatorio generado entre cero y uno es menor que la diferencia entre la solución actual y la nueva solución dividido por la temperatura del sistema T . La temperatura del sistema es ajustada en un valor al inicio del algoritmo. Este valor disminuye cada n ciclos de forma proporcional a un factor de enfriamiento.

Según Dowsland y Díaz [6] es una de las herramientas metaheurísticas más clásicas, la simplicidad y los buenos resultados en numerosos problemas la hacen una herramienta muy poderosa en la aplicación de solución de estos. Kirkpatrick [14], menciona que los algoritmos tradicionales de búsqueda local parten de una solución inicial que de modo paulatino es transformada en otras, que a su vez son mejoradas al introducir pequeñas perturbaciones o cambios (tales como cambiar el valor de una variable o intercambiar los valores que tienen dos variables). Si este cambio da lugar a una solución “mejor” que la actual, se sustituye esta por la nueva, continuando el proceso hasta que no es posible ninguna nueva mejora. Esto significa que la búsqueda finaliza en un óptimo local, que no tiene por qué ser forzosamente global [8]. Un modo de evitar este problema es permitir que algunos movimientos sean hacia soluciones peores. Pero si la búsqueda está realmente yendo hacia una buena solución, estos movimientos de “escape” deben realizarse de un modo controlado. En el caso de recocido simulado, esto se realiza controlando la frecuencia de escape mediante una función de probabilidad hacia soluciones peores conforme avanza la búsqueda (y por tanto es previsiblemente estar más cerca del óptimo global) [8].

Algoritmo genético

Como lo menciona Mohammed et al. [17], el algoritmo genético basa su búsqueda en recombinar una solución. Su nombre nace en la imitación del proceso de evolución y utiliza la idea de la selección natural. Este algoritmo trabaja con una población de individuos que representan una solución factible para un problema determinado, asimismo a cada individuo se le asigna un valor relacionado con la bondad de dicha solución. Si un individuo se adapta mejor al problema, tendrá mayor posibilidad de ser seleccionado para reproducirse cruzándose con otro individuo que fue seleccionado de la misma manera para producir mejores descendientes. Caso contrario, si un individuo no logra adaptarse al problema tendrá menor posibilidad de que sea seleccionado para su reproducción. De esta manera se crea una población nueva de individuos (posibles soluciones) que reemplazan a las soluciones anteriores donde se favorece la propagación de las mejores soluciones durante las posteriores generaciones. El parámetro usado para medir la aptitud de las soluciones es el fitness, que como lo plantea [17], depende de la distancia, que es la variable principal. La aptitud del individuo puede calcularse esencialmente obteniendo el total de distancias entre cliente y cliente de todos los clientes en el individuo, donde d_{12} = distancia de cliente 1 a cliente 2, d_{25} = distancia de cliente 2 a cliente 5, hasta se adquiera el total. Es importante mencionar que la distancia debe reducirse para ampliar la aptitud del individuo.

Trabajos relacionados

Algunos trabajos destinados a resolver el CVRP mediante algoritmos metaheurísticos se describen a continuación.

En [17] se presenta un algoritmo genético con un esquema de mutación que se repite 3 veces en cada iteración con el objetivo de garantizar que se produzca un cromosoma alternativo al primero producido y dar una mayor probabilidad de descubrir el resultado ideal. Con esta adaptación se encuentra la ruta más corta para el servicio de autobuses con capacidad limitada para transportación de estudiantes. En [13] los operadores de intercambio, inserción y reversión se aplicaron aleatoriamente para hallar una mejor solución referente a la actual. Además, se determinó con una probabilidad de 1/3 cuál de estos operadores se utilizaría para tener una tendencia de mejores resultados más rápida. En [16] se menciona que un algoritmo genético combinado con el algoritmo de colonia de hormigas mostró mejor desempeño que algoritmos metaheurísticos como recocido simulado, búsqueda tabú y optimización por enjambre de partículas. En el algoritmo genético original, la población inicial se genera aleatoriamente, mientras que en este trabajo se propone el manejo del algoritmo de la colonia de hormigas para crear la población inicial. Todos los métodos metaheurísticos, así como el algoritmo propuesto se probaron en 10 instancias. Siendo el algoritmo propuesto de algoritmo genético y colonia de hormigas con el que se obtuvieron mejoras en los resultados. En [12] se soluciona un

CVRP, implementando un algoritmo de recocido simulado con operadores aleatorios y determinísticos que se fundamentan en la indagación del problema, selecciona una distribución inicial y posteriormente realiza una sucesión de iteraciones. Para cada iteración se genera una nueva configuración en la población moviendo a los clientes que tienen las distancias más largas a otras rutas. En [15] un algoritmo híbrido es propuesto, que toma los atributos de los algoritmos recocido simulado y búsqueda tabú para solucionar un CVRP. En [1] se compara el rendimiento de las metaheurísticas algoritmo genético (AG), la optimización de colonias de hormigas (ACO), la optimización de enjambres de partículas (PSO) y el recocido simulado (SA). Se trabaja con dos casos para captar las diferentes características de los datos empíricos y 58 minoristas; el segundo caso presenta la estrategia de colaboración en el problema de entrega, con la participación de dos operadores logísticos y 142 minoristas. Los resultados indican que ACO y SA tienen un mejor rendimiento en cuanto a la menor distancia recorrida para ambos casos y una mayor utilidad del camión y un menor número de rutas para el segundo caso. Presentando resultados experimentales que igualan los resultados conocidos por los autores de la instancia adquirida de [21], [10]. En [8] un algoritmo genético (GA) es comparado contra una metaheurística híbrida (N2) que combina operadores de tres diferentes algoritmos, que son algoritmo cromático, optimización por enjambre de partículas y búsqueda tabú, para solucionar cinco instancias de 25 clientes adaptadas de la literatura. Los resultados permiten demostrar la efectividad del modelo y muestran que el nuevo algoritmo es capaz de obtener mejores resultados en comparación con el algoritmo evolutivo.

Metodología

Para realizar la comparación del desempeño entre los algoritmos de recocido simulado y algoritmo genético se realizó la implementación de ambos algoritmos considerando como solución inicial el resultado obtenido por el algoritmo del vecino más cercano. Estos algoritmos fueron los implementados para contribuir a la optimización de las rutas de envío planteadas en el repositorio de instancias en [2] donde tanto el almacén como los clientes están ubicados con coordenadas en un plano cartesiano.

A continuación, se describe la implementación de cada una de las metaheurísticas utilizadas mediante la solución de la instancia A-n32-k5 del repositorio CVRPLIB [2], la cual cuenta con un almacén, 31 clientes y 5 vehículos, todos con capacidad homogénea de 100 unidades.

En la Figura 1 se muestra la representación en el plano de los clientes y el almacén en un plano cartesiano.

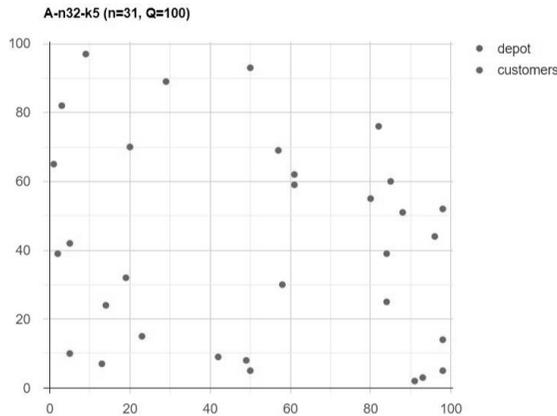


Figura 1. Ubicación de clientes y almacén en el plano cartesiano

A. Algoritmo de recocido simulado

1) Inicialización de parámetros

Se entra en un ciclo “externo” que parte de una temperatura inicial que se irá decremen-
tando con la multiplicación por una constante de enfriamiento hasta llegar a una tempe-
ratura final. Al llegar la temperatura inicial a ser igual que la temperatura final, se detiene
la ejecución del código y se obtiene el mejor resultado obtenido hasta el momento. Esta
función se le conoce como temperatura computacional [18].

Las constantes de temperatura inicial (T_i), temperatura final (T_f) y de enfriamiento (F_f)
fueron establecidas empíricamente como lo señala [20]. Finalmente, para este trabajo T_i
 $=100$, $T_f = 0.01$ y $F_f = 0.999$, que fueron las que mejores resultados obtuvieron.

2) Cálculo de la solución inicial

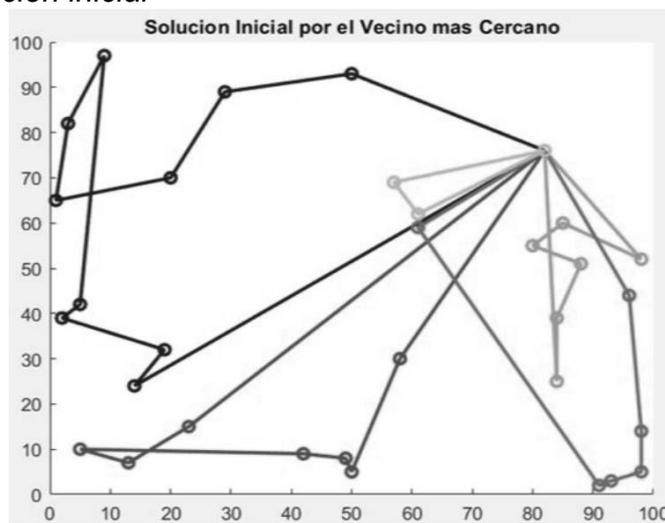


Figura 2. Solución inicial obtenida con el algoritmo del vecino más cercano

El algoritmo de vecino más cercano [11] es utilizado en este trabajo para generar una solución inicial, teniendo los nodos que representan a los clientes y el almacén ubicados en el plano, con el objetivo de mejorar esta solución inicial con el uso de un algoritmo de recocido simulado. En la Figura 2 se presentan la solución inicial obtenida con el algoritmo del vecino más cercano.

3) Generación de nuevas soluciones

Para cada temperatura, la cantidad de iteraciones en el ciclo Metrópolis [3] fue establecida en 100, ya que con esta cantidad se llega a una convergencia del mejor resultado en un menor tiempo de ejecución.

En cada iteración del ciclo Metrópolis se genera una nueva solución cambiando el orden de los elementos de la solución inicial [20] con el uso de 3 operadores de desarrollo de rutas, elegidos de forma probabilística [13], es decir, que en cada iteración del ciclo Metrópoli se genera una solución nueva ya sea utilizando el operador de reversión, intercambio o inserción y además con el objetivo de tener una búsqueda global de soluciones, se realiza un intercambio de clientes entre las sub rutas generadas de la nueva solución, donde se toman 2 sub rutas aleatoriamente y se selecciona 1 cliente de cada sub ruta para ser intercambiado, es decir, se selecciona una cliente de la sub ruta A para ser intercambiado con un cliente de la sub ruta B. Se verifica si con este intercambio de clientes no viola la capacidad del automóvil, si no se cumple este criterio, las sub rutas mantendrán la estructura previa al reordenamiento.

Una vez terminado este proceso de reordenamiento de clientes se genera la nueva solución, como puede verse en la Figura 3.

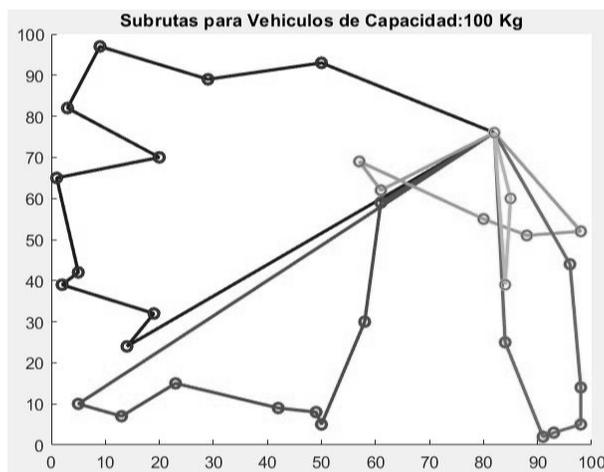


Figura 3. Solución nueva generada y con reordenamiento de clientes en el ciclo Metrópolis

4) Selección

Si la solución nueva es mejor que la solución inicial, esta solución nueva será ahora la solución inicial en la siguiente iteración. Pero si la solución nueva es peor, no siempre será rechazada, también puede ser tomada en cuenta, ya que el algoritmo de recocido simulado permite escapar de óptimos locales aceptando soluciones peores para expandir su búsqueda en un rango global, no solo local [18]. Cabe señalar que no se aceptan todas las soluciones peores, estas pueden ser aceptadas siempre y cuando cumplan que, la probabilidad de Boltzmann [18], sea mayor que un valor aleatorio generado entre cero y uno, como se puede ver en el diagrama de flujo presentado en la Figura 4.

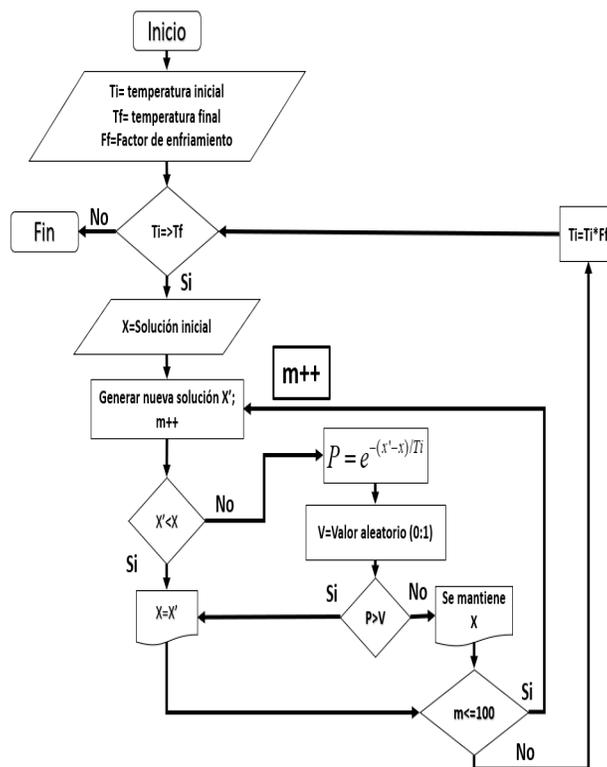


Figura 4. Diagrama de flujo del Algoritmo de Recocido Simulado

Al cumplirse esta condición se tiene como solución inicial ahora una que no mejora la anterior solución inicial, con el objetivo de expandir la búsqueda de mejores soluciones. Si no se cumple la condición, la solución inicial se mantiene sin cambios y se inicia otra vez el ciclo completo durante 100 iteraciones. Terminadas las 100 iteraciones del ciclo Metrópolis, se decrementa la temperatura del ciclo “externo” y se inicia otro ciclo con la mejor solución encontrada.

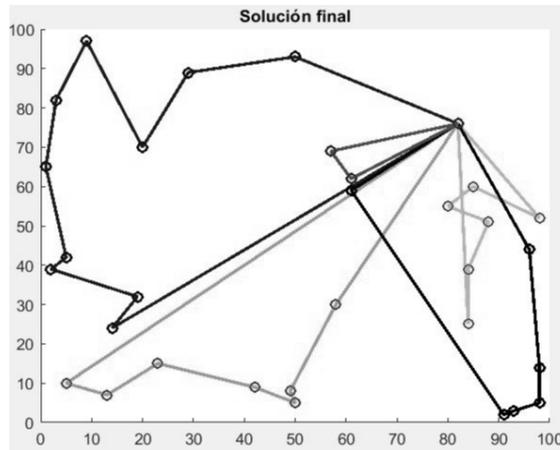


Figura 5. Solución final con sub rutas generadas a partir de las demandas de los clientes y las capacidades de los vehículos

Una vez que la temperatura inicial ha llegado hasta la final se termina la ejecución del RS y se llega a la mejor solución a la que pudo encontrar el algoritmo, la solución final, como se puede ver en la Figura 5.

Algoritmo genético

1) Generación de la población

Para la población inicial se plantean 500 individuos para tener una búsqueda de mejores soluciones más extensa, basándose en la solución inicial obtenida con el algoritmo del vecino más cercano. La población de individuos se genera aleatoriamente incluyendo en esta población, a la solución obtenida por el algoritmo del vecino más cercano.

La Tabla 1, muestra manera de ejemplo usando la misma instancia explicada en el RS (A-n32-k5), 2 individuos generados de aleatoriamente, haciendo hincapié que son 500 individuos a incluirse en la población.

Tabla 1. Representación numérica de individuos

Individuo	Recorrido	Fitness
Individuo 1	1-21-6-30-16-11-26-23-10-19-9-1	906.08
	1-29-5-12-24-4-3-7-1	
	1-14-8-17-27-31-13-1	
	1-2-22-32-20-18-15-1	
	1-25-28-1	
Individuo 2	1-11-23-9-30-21-26-29-6-16-19-1	1023.45
	1-5-10-24-12-4-3-7-1	

	1-14-8-13-31-27-17-1	
	1-2-22-32-25-15-18-1	
	1-28-20-1	

2) Cruza

Se procedió a realizar la cruce de individuos con una probabilidad de 0.90 para generar descendientes. Por cada par de individuos seleccionados para cruzar (padres) se generan dos hijos con los elementos del primer padre más los elementos que se encuentran en el segundo padre.

Para este trabajo se implementan 3 métodos de reproducción [22] que son la cruce de punto sencillo, la cruce de punto doble y la cruce uniforme.

En el método de cruce de punto sencillo, se selecciona aleatoriamente un lugar en los genes de ambos padres. Este lugar se denomina punto de cruce o punto de corte. Los genes situados a la derecha de ese punto se intercambian entre los dos cromosomas de los padres. Como resultado, se obtienen dos descendientes, en los que cada uno de ellos lleva parte de la información genética de ambos progenitores.

En la Figura 6 muestra la operación de cruce de un punto sencillo, con el punto de cruce situado entre el quinto y el sexto gen:

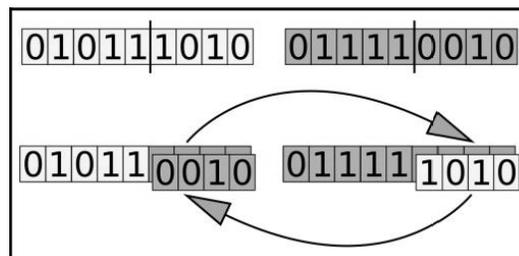


Figura 6. Cruza de punto sencillo [22]

En el método de cruce de punto doble, se seleccionan aleatoriamente dos puntos de cruce en ambos padres. Los genes que se encuentran entre estos puntos se intercambian entre los dos padres.

En la Figura 7 muestra una cruce de punto doble, con el primer punto de cruce situado entre los genes tercero y cuarto y el otro entre los genes séptimo y octavo:

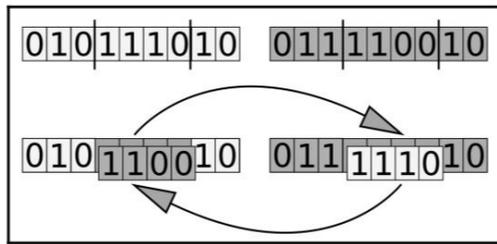


Figura 7. Cruza de punto sencillo [22]

En el método de cruce uniforme, cada gen se determina de forma independiente eligiendo uno de los padres. Cuando la distribución aleatoria es del 50%, cada progenitor tiene la misma probabilidad de influir en la descendencia, como se ilustra en la Figura 8.

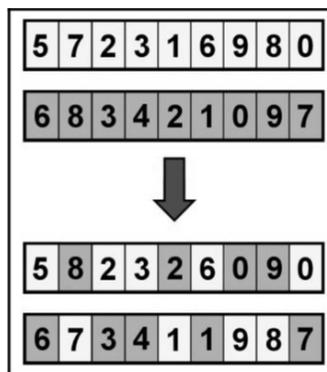


Figura 8. Cruza de punto sencillo [22]

Para seleccionar el método de cruce que será aplicado, se genera un valor aleatorio P_B [0 1] donde:

$P_B \leq 0.33$ se usa la cruce de punto sencillo para generar los 2 hijos de los 2 padres.

$0.33 < P_B < 0.66$ se usa la cruce de punto doble para generar los 2 hijos de los 2 padres.

$P_B > 0.66$ se usa la cruce uniforme para generar los 2 hijos de los 2 padres.

3) Mutación

Para evitar estancamientos en óptimos locales, se aplicó la mutación con una probabilidad de 0.1 para cada uno de los elementos (genes) de cada uno de los individuos. La mutación se realizó por el intercambio de un par de posiciones en el mismo individuo.

4) Selección

Después de las etapas de cruce y mutación se evalúa cada individuo de la nueva población generada y se incorpora el individuo con mejor aptitud a la siguiente generación (elitismo).

Debido a que el factor selectivo es importante para llegar a una mejor solución [17], se aplica una selección de tipo ruleta. Con esta selección se formó el conjunto de individuos que tendrán la posibilidad de cruzarse para formar mejores soluciones.

Este proceso es repetido por un número finito de iteraciones para así ir mejorando gradualmente las soluciones. En esta implementación el algoritmo se detiene al realizar 1000 generaciones.

Resultados obtenidos

Para realizar la comparación de los dos algoritmos, ambos se implementaron en MATLAB 2020 en una computadora portátil marca Asus, modelo Q550LF con un sistema operativo Windows 10 Pro de 64 bits, memoria RAM de 8 GB, procesador Intel core i7 y un disco duro de estado sólido de 480 GB.

Los algoritmos fueron probados con instancias de prueba obtenidas del CVRPLIB [2]. Se utilizaron 14 instancias del conjunto A y 16 instancias del conjunto B, propuestas por Augerat [3]. Las instancias cuentan con un depósito y el número de puntos de demanda oscila entre 31 y 79, y el número de vehículos entre 5 y 10. Los algoritmos se ejecutaron 30 veces para cada una de las instancias de prueba y los resultados obtenidos fueron comparados contra los mejores valores reportados por el repositorio CVRPLIB [2] y contra los mejores valores reportados presentados en [13], que presenta un algoritmo de recocido simulado basado en la población.

Para cada uno de los algoritmos se realizaron diferentes experimentos para mejorar los resultados, tales como, en recocido simulado, la modificación de los parámetros de enfriamiento del sistema para aumentar o disminuir la cantidad de iteraciones de la ejecución con el objetivo de converger en el mejor resultado encontrado en el menor tiempo de ejecución posible. Así como también en el algoritmo genético, la modificación de las probabilidades de cruce y el método usado para ella, la probabilidad de mutación y el aumento o disminución de la población inicial de individuos.

Experimentación

Por cada uno de los algoritmos se muestra la mejor y peor solución obtenida y el valor promedio de las soluciones. Adicionalmente, se calculó la desviación estándar para determinar la estabilidad del algoritmo y el tiempo promedio de ejecución. Los resultados obtenidos para el conjunto A se muestran en las tablas 2 y 3, mientras que para los resultados obtenidos para el conjunto B se muestran en las tablas 4 y 5. Todas las tablas presentan el siguiente formato: En la columna 1 se muestra el nombre de la instancia

de prueba, en la columna 2 el mejor valor reportado en el repositorio CVRPLIB, en la columna 3 el mejor valor reportado en [13], en la columna 4 el mejor valor obtenido de las 30 ejecuciones con el algoritmo, en la columna 5 el peor valor obtenido de las 30 ejecuciones con el algoritmo, en la columna 6 el valor promedio de las 30 ejecuciones con el algoritmo, en la columna 7 la desviación estándar de las ejecuciones realizadas, en la columna 8 se indica la diferencia del resultado obtenido con el algoritmo propuesto y el mejor valor reportado del repositorio CVRPLIB, en la columna 9 se indica la diferencia del resultado obtenido con el algoritmo propuesto y el mejor valor reportado en [13] y en la columna 10 se muestra el tiempo promedio de ejecución de cada instancia.

1) Conjunto A

La Tabla 2 muestra los resultados del conjunto de instancias A [2] con el algoritmo de recocido simulado y la Tabla 3 muestra los resultados del algoritmo genético, los cuales muestran que el desempeño de estos 2 algoritmos lograron acercar los resultados a los planteados por el repositorio CVRPLIB [2] y al trabajo [13].

Tabla 2. Resultados obtenidos con el algoritmo de recocido simulado Para el conjunto A

Instancia	Mejor valor reportado (CVRPLIB)	Mejor valor reportado (Artículo)	Recocido simulado			Desviación estándar	Diferencia con CVRPLIB	Diferencia con Artículo	Tiempo promedio (seg)
			Mejor	Peor	Promedio				
A-n32-k5	784	784	803.05	813.67	808.52	3.53	2.4%	2.4%	1226.54
A-n33-k5	661	661	680.40	697.58	688.19	5.42	2.9%	2.9%	1497.11
A-n33-k6	742	750	793.40	813.87	803.17	6.12	6.9%	5.8%	918.83
A-n37-k5	669	669	743.03	827.06	784.58	24.57	11.1%	11.1%	616.88
A-n37-k6	949	972	975.34	1005.52	990.11	9.04	2.8%	0.3%	1122.96
A-n39-k6	831	831	946.85	1003.40	972.13	16.57	13.9%	13.9%	675.92
A-n45-k6	944	958	971.71	991.80	981.84	6.48	2.9%	1.4%	1146.82
A-n45-k7	1146	1146	1150.05	1236.33	1197.61	26.85	0.4%	0.4%	1224.09
A-n46-k7	914	939	942.26	976.66	958.12	11.30	3.1%	0.3%	1231.43
A-n48-k7	1073	1073	1178.35	1207.51	1192.42	9.56	9.8%	9.8%	1118.90
A-n55-k9	1073	1073	1237.64	1258.20	1248.43	5.33	15.3%	15.3%	1301.30
A-n60-k9	1354	1380	1593.90	1608.20	1600.77	4.74	17.7%	15.5%	1327.18
A-n65-k9	1174	1174	1351.93	1379.76	1365.22	8.82	15.2%	15.2%	1389.02
A-n80-k10	1763	1837	2162.11	2224.85	2193.46	20.77	22.6%	17.7%	1290.80
Promedio de diferencias:							9.1%	8.0%	
Promedio de tiempos:									1149.1

Cabe señalar que el algoritmo de recocido simulado, aunque no muestra una desviación estándar estable, tuvo un mejor desempeño en la calidad de soluciones que el algoritmo genético, como se puede observar en el promedio de diferencias entre el resultado del algoritmo ejecutado y mejor valor reportado por el repositorio CVRPLIB y el mejor valor reportado en [13] donde el RS tuvo un promedio de diferencias de 9.1% comparado con CVRPLIB y 8.0% comparado con el trabajo mencionado, mientras que el AG presenta un promedio de diferencias de 20.4% comparado con CVRPLIB y 19.3% comparado con el trabajo mencionado. En cuanto a los tiempos de ejecución de cada algoritmo, el RS muestra en promedio más tiempo con 1149.1 segundos de ejecución para las instancias, mientras que el AG, muestra un promedio de 409.4 segundos.

Tabla 3. Resultados obtenidos con el algoritmo de genético para el conjunto A

Instancia	Mejor valor reportado (CVRPLIB)	Mejor valor reportado (Artículo)	Algoritmo genético			Desviación estándar	Diferencia con CVRPLIB	Diferencia con Artículo	Tiempo promedio (seg)
			Mejor	Peor	Promedio				
A-n32-k5	784	784	912.26	943.75	926.24	10.14	16.4%	16.4%	549.62
A-n33-k5	661	661	809.01	820.98	815.99	3.78	22.4%	22.4%	279.08
A-n33-k6	742	750	796.69	857.65	831.22	16.17	7.4%	6.2%	438.36
A-n37-k5	669	669	820.44	836.38	827.21	4.37	22.6%	22.6%	576.12
A-n37-k6	949	972	1039.42	1051.11	1045.80	3.41	9.5%	6.9%	603.36
A-n39-k6	831	831	1020.09	1056.55	1040.05	12.40	22.8%	22.8%	519.57
A-n45-k6	944	958	1193.54	1252.28	1225.12	18.46	26.4%	24.6%	380.53
A-n45-k7	1146	1146	1359.80	1386.79	1373.17	9.88	18.7%	18.7%	333.46
A-n46-k7	914	939	1071.17	1120.87	1097.09	17.27	17.2%	14.1%	305.53
A-n48-k7	1073	1073	1360.00	1365.99	1362.60	1.78	26.7%	26.7%	304.81
A-n55-k9	1073	1073	1297.66	1359.00	1331.54	18.94	20.9%	20.9%	345.47
A-n60-k9	1354	1380	1691.74	1752.82	1723.44	20.94	24.9%	22.6%	353.6
A-n65-k9	1174	1174	1433.95	1511.11	1466.49	23.81	22.1%	22.1%	355.43
A-n80-k10	1763	1837	2258.11	2376.94	2311.46	38.29	28.1%	22.9%	387.11
Promedio de diferencias:							20.4%	19.3%	
Promedio de tiempos:									409.4

2) Conjunto B

Mientras que la Tabla 4 muestra los resultados del conjunto de instancias B [2] con el algoritmo de recocido simulado y la Tabla 5 muestra los resultados del algoritmo genético, los cuales muestran que las soluciones de estos 2 algoritmos lograron acercar los resultados a los planteados por el repositorio CVRPLIB [2] y al trabajo [13].

Tabla 4. Resultados obtenidos con el algoritmo de recocido simulado para el conjunto b

Instancia	Mejor valor reportado (CVRPLIB)	Mejor valor reportado (Artículo)	Recocido simulado			Desviación estándar	Diferencia con CVRPLIB	Diferencia con Artículo	Tiempo promedio (seg)
			Mejor	Peor	Promedio				
B-n31-k5	672	672	704.67	718.5	710.41	2.97	4.9%	4.9%	1417.23
B-n34-k5	788	788	867.02	898.13	880.02	10.37	10.0%	10.0%	586.51
B-n38-k6	805	820	828.13	832.98	830.56	1.37	2.9%	1.0%	641.60
B-n39-k5	549	549	591.51	666.94	637.53	18.18	7.7%	7.7%	1371.19
B-n41-k6	829	831	838.39	846.44	841.92	2.11	1.1%	0.9%	1066.85
B-n43-k6	742	742	754.13	831.25	811.19	20.41	1.6%	1.6%	715.16
B-n44-k7	909	937	915.78	1034.23	996.53	32.62	0.7%	-2.3%	1038.58
B-n45-k5	751	751	796.25	861.3	845.96	22.68	6.0%	6.0%	1426.01
B-n45-k6	678	678	696.89	795.62	768.31	33.20	2.8%	2.8%	1137.01
B-n50-k7	741	750	778	806.52	792.27	9.59	5.0%	3.7%	1349.46
B-n50-k8	1312	1358	1349	1423.43	1382.35	23.04	2.8%	-0.7%	1463.30
B-n56-k7	707	707	765.19	857.92	819.21	26.86	8.2%	8.2%	857.92
B-n66-k9	1316	1318	1404.21	1432.57	1417.19	8.66	6.7%	6.5%	1109.99
B-n67-k10	1032	1062	1113.06	1116.93	1115.04	1.21	7.9%	4.8%	1245.20
B-n68-k9	1272	1272	1336.23	1374.77	1359.38	11.03	5.0%	5.0%	1333.91
B-n78-k10	1221	1250	1513.65	1594.79	1554.67	26.22	24.0%	21.1%	1356.78
Promedio de diferencias:							6.1%	5.1%	
Promedio de tiempos:									1132.3

Cabe señalar que el algoritmo de recocido simulado, aunque no muestra una desviación estándar estable, tuvo un mejor desempeño en la calidad de soluciones que el algoritmo genético, como se puede observar en el promedio de diferencias entre el resultado del algoritmo ejecutado y el mejor valor reportado por el repositorio CVRPLIB y el mejor valor

reportado en [13] donde el RS tuvo un promedio de diferencias de 6.1% comparado con CVRPLIB y 5.1% comparado con el trabajo mencionado, mientras que el AG presenta un promedio de diferencias de 14.9% comparado con CVRPLIB y 13.8% comparado con el trabajo mencionado. En cuanto a los tiempos de ejecución de cada algoritmo, el RS muestra en promedio más tiempo con 1132.3 segundos de ejecución para las instancias, mientras que el AG, muestra un promedio de 551.6 segundos.

Tabla 5. Resultados obtenidos con el algoritmo de genético Para el conjunto b

Instancia	Mejor valor reportado (CVRPLIB)	Mejor valor reportado (Artículo)	Algoritmo genético			Desviación estandar	Diferencia con CVRPLIB	Diferencia con Artículo	Tiempo promedio (seg)
			Mejor	Peor	Promedio				
B-n31-k5	672	672	713.35	715.97	714.63	0.79	6.2%	6.2%	347.23
B-n34-k5	788	788	832.62	853.87	844.09	7.00	5.7%	5.7%	602.69
B-n38-k6	805	820	908.01	913.74	910.81	1.85	12.8%	10.7%	567.58
B-n39-k5	549	549	683.13	695.60	688.56	3.67	24.4%	24.4%	456.22
B-n41-k6	829	831	840.19	848.80	843.83	2.74	1.3%	1.1%	505.18
B-n43-k6	742	742	854.66	875.78	864.76	6.78	15.2%	15.2%	341.06
B-n44-k7	909	937	1008.09	1027.53	1016.91	6.45	10.9%	7.6%	671.61
B-n45-k5	751	751	867.17	874.95	871.40	2.40	15.5%	15.5%	659.84
B-n45-k6	678	678	758.58	791.83	772.58	10.26	11.9%	11.9%	660.86
B-n50-k7	741	750	905.40	920.68	911.87	4.87	22.2%	20.7%	726.3
B-n50-k8	1312	1358	1473.29	1481.59	1477.28	2.37	12.3%	8.5%	638.66
B-n56-k7	707	707	852.94	887.68	871.84	11.41	20.6%	20.6%	313.15
B-n66-k9	1316	1318	1522.00	1534.83	1528.85	4.10	15.7%	15.5%	605.92
B-n67-k10	1032	1062	1208.23	1223.59	1216.56	4.54	17.1%	13.8%	775.79
B-n68-k9	1272	1272	1447.85	1516.58	1481.33	22.77	13.8%	13.8%	430.92
B-n78-k10	1221	1250	1624.06	1700.82	1661.80	23.70	33.0%	29.9%	523.34
Promedio de diferencias:							14.9%	13.8%	
Promedio de tiempos:									551.6

Conclusión

En este trabajo se realizó una comparativa entre los algoritmos de recocido simulado y genético, con el fin de determinar cuál proporciona mejor desempeño al resolver instancias del CVRP. Los algoritmos fueron implementados en MATLAB y probados con 30 instancias de prueba del repositorio CVRPLIB [2]. Así como también se compararon los resultados obtenidos contra un trabajo del estado del arte [13].

Para determinar cuál de los algoritmos proporciona mejores resultados se consideró el valor de la distancia total de las subrutas generadas en cada instancia, la desviación estándar de los resultados para cada instancia y el tiempo promedio de ejecución.

Los comparación de los resultados adquiridos tanto para el repositorio CVRPLIB Dantzig [2] y para la comparación de resultados del trabajo [13] muestran que, en los tiempos de ejecución de los algoritmos, el algoritmo genético requiere menos tiempo en promedio que el algoritmo de recocido simulado para obtener el resultado final, y estos resultados mostraron que el algoritmo de recocido simulado brinda mejores soluciones en promedio con respecto al algoritmo de genético, ya que con el RS se obtienen menores promedios de diferencias en comparación con los resultados obtenidos con el AG.

Para futuras ejecuciones se recomienda hacer uso del RS para la mejor adquisición de resultados, pero si lo que se busca es encontrar resultados en un menor tiempo de ejecución se recomienda el uso del AG.

Referencias

- Asih, A. M. S., Sopha, B. M., and Kriptaniadewa, G., "Comparison study of metaheuristics: Empirical application of delivery problems," *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1177/1847979017743603.
- Augerat, P., "CVRPLIB - All Instances." <http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/index.php/en/> (accessed Nov. 21, 2021).
- Augerat, P., Belenguer, J., Benavent, E., Corberan, A., Naddef, D., and Rinaldi, G., "Computational results with a branch and cut code for the capacitated vehicle routing problem," reporte de investigación, Laboratoire ARTEMIS, Grenoble, Francia, 1995.
- Chen, A. L., Yang, G. K., and Wu, Z. M., "Hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem," *J. Zhejiang Univ. Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 607–614, 2006, doi: 10.1631/jzus.2006.A0607.
- Dantzig, G. B. and Ramser, J. H., "The truck dispatching problem," *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91., 1959.
- Dowland, K. A. and Díaz, B. A., "Diseño de heurística y fundamentos del recocido simulado," *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial.*, vol. 7, no. 19, p. 1-12, 2003.
- Escobar, J. and Linfati, R., "Un algoritmo metaheurístico basado en recocido simulado con espacio de búsqueda granular para el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 11, no. 21, pp. 139–150, 2012.
- Galarcio, J. D., Buelvas, M. P., Nisperuza, P. A., López Pereira, J. M., and Hernández Riaño, H. E., "Nueva Metaheurística Aplicada Al Problema De Ruteo," *Ingeniería e Innov.*, vol. 5, no. 1, pp. 60–72, 2017.
- Goldberg, D.E. and Holland, J. H., "Genetic Algorithms and machine learning," 1998 Kluwer Acad. Publ., vol. 19, no. 1, pp. 95–99, 1998.
- Golden, B. L., Wasil, E. A., Kelly, J. P., and Chao, I. M., "The Impact of Metaheuristics on Solving the Vehicle Routing Problem: Algorithms, Problem Sets, and Computational Results," *Fleet Manag. Logist.*, pp. 33–56, 1998, doi: 10.1007/978-1-4615-5755-5_2.
- González, D. and Gómez, D., "Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Entregas y Recogidas Aplicando el Algoritmo de Pétalos y la Heurística del Vecino Más Cercano," tesis licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2019.
- Harmanani, H., Azar, D., Helal, N., and Keirouz, W., "A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 265, no. 3, pp. 843–859, 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.08.035.
- Ilhan, I., "A population based simulated annealing algorithm for capacitated vehicle routing problem," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp. 1217–1235, 2020, doi: 10.3906/elk-1902-122.

- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing," *Science* (80-.), vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983, doi: 10.1007/978-3-642-24974-7_7.
- Lin, S. W., Lee, Z. J., Ying, K. C., and Lee, C. Y., "Applying hybrid meta-heuristics for capacitated vehicle routing problem," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 1505–1512, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.060.
- Mazidi, A., Fakhrahmad, M., and Sadreddini M., "A meta-heuristic approach to CVRP problem: local search optimization based on GA and ant colony," *J. Adv. Comput. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–22, 2016, [Online]. Available: http://jacr.iausari.ac.ir/article_646698.html.
- Mohammed, M. A., Abd Ghani, M. K., Hamed, R. I., Mostafa, S. A., Ahmad, M. S., and Ibrahim, D. A., "Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution," *J. Comput. Sci.*, vol. 21, no. 1, pp. 255–262, 2017, doi: 10.1016/j.jocs.2017.04.003.
- Rabbouch, B., Saâdaoui, F., and Mraihi, R., "Empirical-type simulated annealing for solving the capacitated vehicle routing problem," *J. Exp. Theor. Artif. Intell.*, vol. 32, no. 3, pp. 437–452, 2020, doi: 10.1080/0952813X.2019.1652356.
- Radiy, M., "A hybrid method for capacitated vehicle routing problem," Tesis de doctorado, Curtin University of Technology, 2010.
- Santa Chávez, J. J., Peñuela Meneses, C. A., and Granada Echeverry, M., "Algoritmo de recocido simulado aplicado al problema de secuenciamiento regular," *Av. Investig. en Ing.*, vol. 11, no. 1, p. 9, 2014, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.295.
- Toth, P., and Vigo, D., "The Vehicle routing problem," *Siam, Monographs on Discret Mathematics and Applications*, Philadelphia, 2000.
- Wirsansky, E., *Hands-On Genetic Algorithms with Python*, Packt Publishing, Reino Unido. 2020.

Rediseño de rutas de entrega para una empresa panificadora en Cd. Obregón, Sonora

Ernesto Alonso Vega Telles
María del Pilar Lizardi Duarte
Alfredo Bueno Solano
Juan Daniel Ortiz Monge
Instituto Tecnológico de Sonora

Resumen— En el desarrollo de la presente investigación, se propone el rediseño de la ruta de distribución del Valle del Yaqui y Mayo, en una organización de la industria panificadora, dedicada a la producción y comercialización de pan e insumos para la preparación de comida rápida, mediante la aplicación de métodos de ruteo con el fin de determinar una propuesta de mejora que impacte en el proceso de distribución encaminados a la reducción de los tiempos de entrega, así como también costos operativos presentes por el desarrollo de dicho proceso. Esto derivado de la identificación de problemas asociados con la insatisfacción por los consumidores debido a las demoras existentes en las entregas de los pedidos, así como la presencia de inconformidades en los repartidores a causa del tiempo implementado en el recorrido de la ruta, ya que en la organización bajo estudio se carece de una planeación de rutas de entrega eficiente siendo estas construidas de manera empírica en función a la experiencia del repartidor. Cabe mencionar que, al término de la investigación, se obtuvo como resultado la propuesta de una ruta más óptima que la empleada en la actualidad por la organización, con la cual se observa una reducción en el tiempo de entrega de pedidos, así como un ahorro en el gasto de combustible. Por lo que se concluye que la ruta propuesta da solución a la problemática planteada y logra cumplir con el objetivo del proyecto, brindando beneficios tangibles tanto para la empresa, como para sus trabajadores y consumidores.

Palabras Clave—Rediseño; Ruta de distribución; Métodos de ruteo; Entrega

Introducción

En la actualidad, las organizaciones se encuentran inmersas dentro de un mercado altamente competitivo, donde tanto el comercio electrónico, los mercados globalizados así como la inmediatez, están en constante cambio, de tal forma que, las necesidades de los consumidores son cada vez mayores a tal grado que el cliente espera la recepción de su mercadería en un lapso no mayor a las 24 horas, lo que obliga a reducir tiempos de atención así como potencializar las capacidades en las cadenas de suministro, por lo que se requiere un aumento tanto en la agilidad operativa como en la eficiencia de cada uno de los procesos que conforman a las mismas. [1]

Dando pauta con ello a lo definido por Michael Porter quien estableció que “En el futuro, la competencia no se dará de empresa a empresa sino más bien de cadena de suministro a cadena de suministro”, convirtiendo dicho futuro en un presente [2]; Siendo esto lo que incrementa la competitividad entre las empresas sin considerar tamaño o giro, obligando a ir más rápido en todos los aspectos desde lo estratégico hasta lo operativo, viendo entonces que no es el pez más grande quien se come al más chico sino ahora el más rápido al más lento. [3]

Sin embargo, ante dicha situación, las grandes empresas llevan una ventaja al respecto ya que por su capacidad de inversión, infraestructura y gestión, cuentan con avances referente al tema, mientras que las Pequeñas y Medianas empresas (Pymes), tienen fortalezas en sus procesos operativos ya que cuentan con la capacidad de no solo ofrecer un producto o servicio al consumidor en función a sus necesidades, sino también los motive a volver a consumir y recomendar dicho servicio, mientras que en contra como debilidad se observa la presencia de ciertos problemas relacionados con la última milla, siendo este momento preciso en el cual se mantiene la interacción entre cliente – proveedor, predominando situaciones como la entrega de productos con fallas, baja o nula capacidad de reacción ante eventos espontáneos, deficiencia en el entrenamiento de personal de reparto en relación con la atención al cliente, falta de monitoreo del estado de las entregas, así como poca o nula planeación de rutas de entrega. [4].

Derivado de las debilidades mencionadas anteriormente, estas se convierten en temas de interés a ser abordados tanto por el sector gobierno como particular, ya que forman parte de organizaciones importantes que fomentan la generación de empleo y con ello el desarrollo económico de los países y a su vez estas representan un nuevo tipo de negocio que puede adaptarse con facilidad a las necesidades y exigencias de flexibilidad impuestas por la sociedad y partes interesadas. [5]

La presente investigación se desarrolla dentro de una Pyme del giro de la industria panificadora localizada en Ciudad Obregón, Sonora. La cual se dedica a la producción y

comercialización de insumos para puestos de comida rápida de un estilo americano. Los productos que comercializa, son una gran variedad de pan, en los que prevalecen el pan para hot dogs, hamburguesas, teleras, así como insumos adicionales como tocino, papas fritas, mayonesa, salsa de tomate y salchichas entre otros insumos requeridos por los consumidores.

Como parte de las actividades, se realizan entregas de productos a diferentes clientes de manera diaria, lo que convierte a esta en una función crítica dentro del área de distribución. Donde en la ejecución de estos procesos, no se lleva un control sobre las rutas que se deben tomar para llegar a los distintos puntos de entrega, por ende, los repartidores trazan sus rutas de manera empírica, lo que genera diferencia entre las distancias recorridas, tiempos y consumo de combustible reales, contra lo planeado por la administración. Esto hace que la empresa tenga que lidiar, por un lado, con demoras en las entregas causando insatisfacción en los clientes, por el otro, los repartidores se inconforman con la hora que terminan de realizar su trabajo.

A partir de la problemática anterior, se planteó la siguiente incógnita de investigación, ¿Qué acciones se pueden llevar a cabo para reducir los costos y el tiempo de entrega en el área de distribución de una empresa panificadora de la región?

Fundamentación teórica

La logística según [6], es una actividad la cual es realizada por el hombre desde que este comenzó con las tareas de almacenar y de transportar mercancías, lo que da a entender que la logística existe desde hace mucho tiempo, desde culturas prehispánicas hasta lo que se conoce hoy en día, como las actividades que las empresas realizan para mantener un orden en toda su cadena de suministro.

Por otro lado, [7] define a la logística como los procesos por los cuales las empresas gestionan de forma correcta el movimiento, la eficiente distribución y el buen almacenamiento de las mercancías; al mismo tiempo que lleva un control de inventarios, manejando a su vez con acierto los flujos de información asociados.

Por lo que, en el mundo empresarial, lo que la logística pretende manejar es el flujo de los productos, desde el origen hasta la entrega a quien será el consumidor final, determinando cómo, y cuándo se deben movilizar los recursos hacia los puntos donde resulta necesario el suministro de estos.

Sin embargo, para ser posible que un producto llegue a los consumidores o clientes, desde donde se obtienen las materias primas hasta su destino final, es una labor com-

pleja, para lo cual se requiere de un sistema, donde este se define como el conjunto de elementos relacionados entre sí con un fin común en específico. [8], dice que un sistema se puede conceptualizar como una abstracción de sus componentes, esto con el objetivo de expresar su comportamiento y sus procesos.

Mientras que [9], establece que Van Gich define al sistema como “una unión de partes o componentes, conectados en una forma organizada. Las partes se afectan por estar en el sistema y se cambian si lo dejan. La unión de partes hace algo (muestra una conducta dinámica como opuesto a permanecer inerte). Además, un sistema puede existir realmente como un agregado natural de partes componentes encontradas en la naturaleza, o ésa puede ser un agregado inventado por el hombre, una forma de ver el problema que resulta de una decisión deliberada de suponer que un conjunto de elementos está relacionado, y constituyen una cosa llamada “un sistema”.”

Por lo que considerando los elementos que, involucrados en las actividades relacionadas con la logística, se adquiere la definición de sistema logístico donde, según lo que dice [7], las transacciones que manejan las empresas son mercancías, por lo cual surge la necesidad de la existencia de un sistema que sea capaz de organizar este tipo de movimientos logrando una alta efectividad. En este sistema se incluye, desde el transporte, el control de la mercancía, hasta el almacenamiento; a todo esto, se le denomina como un sistema logístico y constituye un entramado necesario en lo que es la vida comercial de un mercado moderno.

Por otra parte, también se puede ver a un sistema logístico como un conjunto de recursos, métodos y recursos que permiten que la logística se mantenga sostenida en una empresa, y su fin principal es hacer que haya una interacción de manera ordenada con los recursos logísticos y de esta forma alcanzar de manera efectiva los objetivos previstos. [10]

Para englobar de forma general este concepto de sistema logístico, se puede decir que es el conjunto de los recursos, medios y acciones que permite a las empresas que los productos lleguen desde el lugar de producción hasta los consumidores finales. Es de suma importancia que las empresas tengan noción sobre este concepto ya que ayuda a contribuir a dar más valor al producto y a la empresa. Lo que le da valor es que el producto llegue en tiempo y forma al consumidor final, para lo cual se requiere de la correcta definición de la distribución logística, donde este concepto de distribución se puede ver como una de las etapas de la logística, la cual sitúa los productos donde el cliente los va a requerir, [11] define a la distribución de la siguiente manera: “Grupo de intermediarios que hacen llegar los productos de los fabricantes a los consumidores y usuarios finales”

De forma más detallada se puede decir que la distribución es un elemento de suma importancia para las empresas. Con una buena área de distribución es posible realizar las actividades de una manera óptima y eficiente, logrando así reducir tiempos, costos, y gastos; aparte de que el prestigio de la organización puede verse en aumento ya que el consumidor final siempre busca obtener sus productos de la mejor manera y lo más rápido posible. Siendo esto alcanzable mediante lo que se le conoce como canales de distribución logísticos.

La organización comercial de una empresa busca poner los productos que se ofrecen al alcance del usuario, determinando las cantidades y momentos que se consideren pertinentes, utilizando preferentemente para ello los canales de distribución. Una de las tareas del área de la logística es lograr cumplir con este objetivo de entregar según las especificaciones, los productos; evitando elevar los costos a ciertos niveles que signifiquen pérdida para la empresa.

Por lo que un adecuado rediseño de rutas de distribución, es un proceso clave dentro de la logística, ya que este condiciona tanto el proceso de preparación de mercadería como el transporte posterior, para esto es de suma importancia considerar ciertos aspectos tales como la posición geográfica de los puntos, las distancias y tiempos de tránsito entre puntos y el almacén, tiempo de carga, tiempo de descarga en cada uno de los puntos de entrega, horario preferente para entrega, demanda de cada cliente, número de vehículos que conforman la flota de distribución así como la capacidad de cada uno de estos, etc. [12]

Como medida de soporte para la adecuada gestión de rutas, existen distintos métodos de ruteo que facilitan dicha labor tales como el método de barrido, siendo este una metodología sencilla con el propósito de aumentar la eficiencia en los costos asociados a la distribución para micro empresas, ya que se basa en no pasar dos ocasiones por el mismo punto o cerca del mismo durante la distribución de la mercancía, además se caracteriza por ser una herramienta sencilla y rápida, lo que permite que los encargados de reparto actualicen la técnica según el incremento de punto de ventas que tengan durante pasa el tiempo [13].

En un segundo momento, se tiene al método de vecino más cercano, el cual se cataloga por ser un algoritmo heurístico diseñado para solucionar el problema de agente viajero, el cual no asegura soluciones óptimas, sin embargo suele proporcionar buenas soluciones, y sobre todo tiene un tiempo de cálculo muy eficiente, el procedimiento consiste en identificar en un primer momento el punto de partida y posteriormente, evaluar y seleccionar el vecino más cercano, la siguiente iteración habrá que considerar los vecinos más cercanos y así sucesivamente hasta agotar el total de puntos presentes en la red y culminar de nuevo regresando al punto de partida. [14]

Así mismo, es importante mencionar que, se debe de trabajar en forma estrecha con todas áreas de la organización, para que, de esta manera, sea posible diseñar y operar el sistema de distribución mediante la medición y el control de ciertas variables básicas como, por ejemplo, el tiempo de respuesta o la capacidad, entre otros. [6]

Metodología

En el apartado del procedimiento se presenta el desarrollo de los pasos para el alcance del objetivo planteado en la investigación; para lo cual se implementó una metodología híbrida compuesta por las distintas propuestas presentadas por [15]; [16] Dicho procedimiento, cuentan con 7 pasos los cuales están separados en 2 fases explícitas a continuación.

Fase 1: Mapear el sistema de distribución

1) Determinar la ubicación de los clientes que conforman la ruta bajo estudio.

Como primer paso del procedimiento, se realizó un mapeo de la ubicación de los consumidores que conforman la ruta bajo estudio mediante el uso de Google Earth, con la finalidad de conocer las distancias entre la matriz de la organización y cada uno de los nodos (consumidores) y ubicación en el mapa, por lo que se obteniendo gráficos de ubicación geográfica.

2) Trazar las rutas de entrega actuales

Para el desarrollo del presente paso, fue de suma importancia en un primer momento, conocer las rutas actuales implementadas por la organización para la entrega de sus productos, con la finalidad de recolectar información crucial para el trazado de la ruta bajo estudio actual.

Para lo cual se utilizó el software Geo Tracker, ya que esta aplicación proporciona información referente a tiempos de recorrido, velocidad promedio del vehículo, además de que traza en un mapa el recorrido y el tiempo real; Como resultado del análisis realizado a la ruta actual, se creó una figura con la cual es posible observar la secuencia de visita de los consumidores en cada una de sus ubicaciones.

3) Caracterizar la flotilla para las entregas

Con la intención de caracterizar la flotilla que cuenta la organización para la distribución de los productos, se diseñó una base de datos que permitió recabar información sobre los vehículos utilizados a lo largo del proyecto.

Fase 2: Desarrollo y rediseño de rutas de entrega

4) Implementar los diferentes métodos de ruteo

En este punto se implementaron, los diferentes métodos de ruteo empleados para la solución del problema del proyecto, los métodos empleados en este punto fueron en un primer momento el método de barrido, seguido del método vecino más cercano, y por último el método de ahorros. Los resultados obtenidos con el desarrollo de los tres métodos fueron tablas para cada uno, donde se colocó en orden los poblados a visitar y la distancia correspondiente entre cada uno de los nodos.

5) Comparativa de resultados de métodos empleados

Posterior a la implementación de cada uno de los métodos mencionados anteriormente, con la intención de determinar cuál sería la opción más viable a tomar en cuenta para realizar la propuesta de mejora, se hizo una comparativa donde se evaluaron distintos parámetros de los tres métodos implementados, por lo que para un mejor entendimiento de toda la información se hizo un resumen en una tabla donde se muestran la evaluación de las tres propuestas.

6) Realizar la propuesta de rediseño de rutas

Partiendo de la comparativa de las soluciones, se realizó lo que sería la propuesta para la mejora de la ruta actual que se usa para la distribución de las entregas en el Valle del Yaqui y Mayo. Para esto se realizó una tabla donde se muestra la comparativa de dicha propuesta de mejora, contra el estado actual de la ruta empleada por la organización.

7) Recabar información de la propuesta realizada

Al realizar la comparación de la propuesta contra el estado actual, se obtuvo como resultado que la nueva ruta aportaría más beneficios a la organización, por lo que se procedió a realizar su trazado con el software Google Earth para conocer la distancia de recorrido real, se obtuvo una figura donde ejemplifica la secuencia del recorrido propuesto, así como los ahorros esperados al momento de la implementación de dicha ruta.

Materiales

Los materiales empleados para la correcta aplicación de las metodologías presentadas en el proyecto fueron las siguientes:

Geo Tracker®: Software de uso libre utilizado principalmente en celulares que permitió el trazado en tiempo real de las rutas, implementado para conocer los tiempos de recorrido que tomaba hacer las distancias entre distintos puntos, además de conocer los kilómetros recorridos en las rutas, lo que facilitó la captura e interpretación de información.

Google Maps: Utilizado desde un dispositivo móvil, implementado con la finalidad de comprobar los tiempos entre cada uno de los puntos de entrega que conforman la ruta bajo

estudio y los tiempos totales que tardaría la flotilla de entrega en completar la ruta, todo mediante su algoritmo que traza las rutas en automático y estima un tiempo aproximado. *Google Earth*: Software implementado para trazar de forma manual las distancias entre puntos, así como la verificación de posibles cambios en el recorrido de las rutas.

Resultados

Fase 1. Mapeo del sistema de distribución

En lo referente al mapeo del sistema de distribución actual de la empresa bajo estudio, se obtuvo la descripción de la ubicación de cada uno de los clientes pertenecientes a la ruta en análisis, la definición de la ruta actual, así como información en relación con la flotilla vigente en la organización.

Mediante la implementación de la plataforma Google Earth se localizó a los clientes que conforman la ruta del valle del yaqui y mayo, resultando estos un total de 10 consumidores enlistados en la tabla siguiente.

Tabla 1. Distancias de todos los poblados a entregar con respecto a Pan PEPES

Poblado	Distancia
Centauro	14.35 km
Tobarito	14.52 km
Antonio Rosales	17.79 km
F. Villa	18.59 km
Morelos Uno	24.04 km
Quetchehueca	25.24 km
Guayparin	26.14 km
Fundición	27.1 km
Mayojusalit	37.35 km
Villa Juárez	41.7 km

Fuente: elaboración propia (2021)

Como se aprecia, la localidad más cercana a la matriz de la organización es el poblado el Centauro seguido de Tobarito a una distancia de 14.35 y 14.52 Km respectivamente, mientras que los poblados más lejanos son Mayojusalit con 37.35 Km y Villa Juárez con 41.7 Km.

Considerando las distancias entre la matriz de la empresa y la localización de los consumidores, se categorizaron las localidades por cercanías donde los más cercanos son aquellos poblados que se encuentran en un rango entre 14 y 20 Km; Zona intermedia entre 21 y 30 Km, mientras que los más lejanos entre 31 y 42 Km, tal como se muestra en la Figura 1.

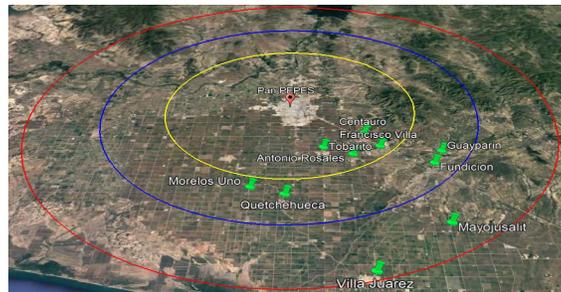
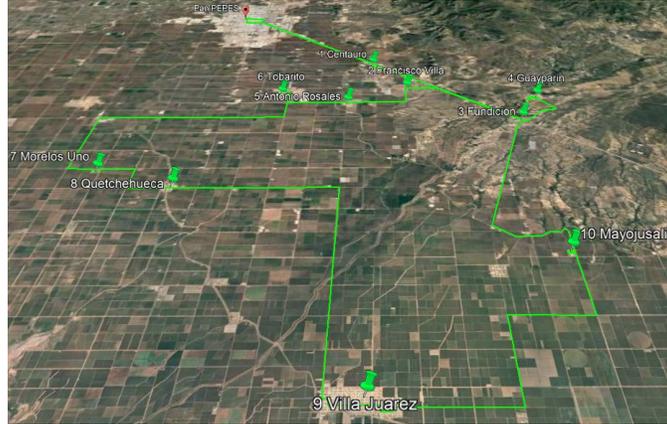


Figura 1. Rango de distancias entre Pan PEPES y los poblados a entregar
Fuente: elaboración propia con ayuda del software Google Earth (2021)

En la figura 1, se observa a detalle la ubicación y las categorías previamente mencionadas, todos los círculos tienen como su centro a la matriz Pan PEPES, los poblados cercanos están dentro del círculo amarillo, los cuales son un total de cuatro siendo estos el poblado Centauro, Francisco Villa, Tobarito y Antonio Rosales.

En lo que respecta a la zona intermedia marcada con un círculo azul en la cual están el poblado de Morelos Uno, Quetchehueca, Fundición y Guayparin en un radio de 30 kilómetros de distancia, mientras que, la zona más lejana está marcada de color rojo, donde solo están los poblados de Villa Juárez y Mayojustalit, estos a una radio de 42 kilómetros de distancia.

Prosiguiendo con el mapeo del sistema de distribución actual, se trazó la ruta de entrega vigente, siendo estas de forma empírica en función a la experiencia y decisión del repartidor, generando la siguiente figura a manera de representación del trazo que se emplea para visitar a cada uno de los poblados iniciando y culminando la ruta en la matriz de la organización.



Pan PEPES → Centauro → Francisco Villa → Fundación → Guayparin (4 clientes) → Antonio Rosales → Tobarito (3 clientes) → Morelos Uno → Quetchehueca (2 Clientes) → Villa Juárez (3 clientes) → Mayojustalit (2 clientes) → Pan PEPES

Total, distancia recorrida: 196 km

Figura 2. Ruta de entrega vigente de la panadería bajo estudio
 Fuente: elaboración propia con ayuda del software Google Earth (2021)

Analizando la figura anterior se muestra el trazado de la ruta que se realiza para la entrega de pedidos en la organización, la cual comienza partiendo de la matriz de la organización (Origen), donde el primer lugar que se visita es el poblado Centauro, seguido de Francisco Villa, después se parte hacia el poblado de Fundación, pasando después por Guayparin para posteriormente regresar a Francisco Villa y tomar camino al poblado de Antonio Rosales y Tobarito, seguido de esto se viaja hacia Morelos Uno, así mismo se visitan clientes en Quetchehueca y se visita el poblado más lejano, que es Villa Juárez, una vez o repartido las entregas aquí el próximo y último destino es Mayojustalit para finalmente regresar al punto origen con una distancia total recorrida de 195 kilómetros en un tiempo total de 4 horas con dos minutos. más lejano, que es Villa Juárez, una vez o repartido las entregas aquí el próximo y último destino es Mayojustalit para finalmente regresar al punto origen con una distancia total recorrida de 195 kilómetros en un tiempo total de 4 horas con dos minutos.

En relación con la caracterización de la flotilla actual implementada para la atención a los consumidores, se tiene que es una flotilla de carácter heterogénea compuesta por vehículos de la línea Nissan, Dodge, Kia y Chevrolet, para los cuales se identificó el modelo, año y rendimiento en consumo de combustible, donde dicha información se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Información sobre flotilla de entrega

Marca	Modelo	Año	Rendimiento
Nissan	March	2018	20.7 km/l
Nissan	Tsuru III	1998	17 km/l
Dodge	RAM 2500	2016	5.31 km/l
Kia	Rio	2020	17.81 km/l
Chevrolet	Beat	2019	21 km/l

Fuente: elaboración propia (2021)

En cuestión de los vehículos de la marca Nissan se tiene un automóvil march año 2018 y Tsuru 1998 con rendimientos registrados de 20.7 y 17 Km/l respectivamente, mientras que en relación a la marca Dodge se muestra la pick up RAM 2500 año 2016 con un bajo rendimiento de 5.31 Km/l, sin embargo, para efectos del estudio se utiliza el vehículo Chevrolet Beat 2019 con rendimiento de 21 Km/l, esto debido a la economía que representa en el consumo de combustible para el desarrollo de la actividad, aunado al rendimiento del combustible, se determinó la capacidad de carga del mismo tomando en consideración el acomodo óptimo de los productos, para lo cual en la siguiente tabla se muestra información referente a la capacidad de carga tanto en peso (Kg) como volumen.

Tabla 3. Determinación de capacidad para vehículo de entrega Chevrolet Beat

Capacidad de carga para panes	
Piezas de pan	1,200 panes
Bolsas de pan	48 bolsas
Peso promedio por bolsa	1.7 kg
Peso total	81.6 kg
Capacidad de carga para otros productos	
Peso máximo de carga	81 kg
Total, de peso por ambas capacidades	
Capacidad de panes	81.6
Capacidad de otros productos	81
Total, ambas capacidades	162.6 kg

Fuente: elaboración propia (2021)

La capacidad del vehículo se calculó de maneras separadas, por una parte, se tomó en cuenta la cantidad de pan máxima para cargar sin que este se dañe o sea afectado, y por el otro se tomó en cuenta a los otros productos que se entregan a los clientes (tocino, salchichas, bolsas o cajas de papa, mayonesa y salsa de tomate).

La cantidad máxima alcanzada para el acomodo del pan se determinó en 1,200 panes, de los cuales se cargán aproximadamente 48 bolsas, el peso promedio de las bolsas de pan se determinó en un total de 1.7 kilos, por lo que genera un total de 81.6 kg.

Mientras que, en lo correspondiente a los otros productos, estos requieren de menor espacio y no son tan delicados como lo es el pan, por lo que su área para cargar, aunque es menor puede llevar un mayor peso. Lo máximo que se llegó a cargar fue un total de 81 kilos. Por lo tanto, la carga en kilos del vehículo de manera que los productos no se vean afectados es un total de 162.6 kilogramos.

Fase 2. Desarrollo y rediseño de rutas de entrega

Como segundo momento, en el desarrollo de la investigación, se procedió a la implementación de los métodos de ruteo, así como la comparación entre los distintos métodos aplicados con la intención de identificar cual es el método óptimo a considerar para la propuesta del rediseño de rutas y por último la implementación de la propuesta.

En relación con la implementación de los métodos de ruteo, se desarrollaron los métodos de barrido, vecino más cercano y ahorro, donde previo a la aplicación de los métodos, se obtuvo la construcción de una matriz de distancia para la determinación del total de kilómetros recorridos en cada uno de los métodos en estudio, donde en un primer lugar se observan los resultados arrojados mediante el método de barrido generando la siguiente tabla.

Tabla 4. Resultados método de barrido

Nodo	Poblado	Nodo a Nodo	Distancia en Km
F	Morelos Uno	A-F	23.95
G	Quetchehueca 1	F-G	4.92
H	Quetchehueca 2	G-H	0.47
I	Villa Juárez 1	H-I	18.29
J	Villa Juárez 2	I-J	0.43
K	Villa Juárez 3	J-K	1.74
C	Tobarito 2	K-C	27.24
D	Tobarito 3	C-D	0.16
B	Tobarito 1	D-B	0.22

E	Antonio Rosales	B-E	4.99
M	Mayojusalit 2	E-M	19.65
L	Mayojusalit 1	M-L	0.29
R	Francisco Villa	L-R	18.9
S	Centauro	R-S	4.9
N	Fundición	S-N	13.08
P	Guayparin 3	N-P	3.27
O	Guayparin 2	P-O	0.41
Q	Guayparin 4	O-Q	0.39
Ñ	Guayparin 1	Q-Ñ	0.15
A	Pan PEPES	Ñ-A	26.49
Total, de distancia recorrida			169.94

Como resultado, se obtuvo un total de 20 secuencias considerando el punto Origen, con un total de 169.94 Km, quedando la ruta comprendida como se ilustra en la siguiente Figura.

<p>Pan PEPES → Morelos Uno → Quetchehueca 1 → Quetchehueca 2 → Villa Juárez 1 → Villa Juárez 2 → Villa Juárez 3 → Tobarito 2 → Tobarito 3 → Tobarito 1 → Antonio Rosales → Mayojusalit 2 → Mayojusalit 1 → Francisco Villa → Centauro → Fundición → Guayparin 3 → Guayparin 2 → Guayparin 4 → Guayparin 1 → Pan PEPES</p> <p>Total, distancia recorrida: 169.94 km</p>

Figura 3. Secuencia de ruta aplicando método de barrido
Fuente: elaboración propia (2021)

La secuencia de acuerdo al método de barrido, establece que se visiten primero los poblados de Morelos Uno, Quetchehueca y se llega al poblado más lejano que es Villa Juárez, después de esto se viaja a Mayojusalit, Francisco Villa y Centauro, dejando para el final a los poblados de Fundición y Guayparin, concluyendo la ruta con el regreso a la matriz de la organización.

Un segundo método es el de vecino más cercano donde se consideró la matriz de distancias con el fin de identificar la distancia existente entre cada uno de los nodos según lo requerido por el método, generando así una tabla de información con la distancia existente entre cada uno de los nodos en estudio, tal como se muestra en la tabla.

Tabla 5. Resultados método vecino más cercano

Nodo	Poblado	Nodo a Nodo	Distancia en Km
A	Pan PEPES	A	0
S	Centauro	A-S	14.35
R	Francisco Villa	S-R	4.96
E	Antonio Rosales	R-E	4.45
D	Tobarito 3	E-D	5.05
C	Tobarito 2	D-C	0.16
B	Tobarito 1	C-B	0.16
H	Quetchehueca 2	B-H	12.45
G	Quetchehueca 1	H-G	0.47
F	Morelos Uno	G-F	4.92
I	Villa Juárez 1	F-I	22.6
J	Villa Juárez 2	I-J	0.43
K	Villa Juárez 3	J-K	1.74
L	Mayojusalit 2	K-L	13.42
M	Mayojusalit 1	L-M	0.29
N	Fundición	M-N	13.08
P	Guayparin 3	N-P	3.27
O	Guayparin 2	P-O	0.41
Q	Guayparin 4	O-Q	0.39
Ñ	Guayparin 1	Q-Ñ	0.15
A	Pan PEPES	Ñ-A	26.49
Total, de distancia recorrida			129.24 km

Fuente: elaboración propia (2021)

Mediante la implementación del método de vecino cercano, se obtiene una ruta de 129.24 Km, resultando una menor distancia que el método anterior, debido a que la presente técnica no toma en consideración las rutas o caminos, por lo que la secuencia a seguir quedaría conformada de la siguiente manera.

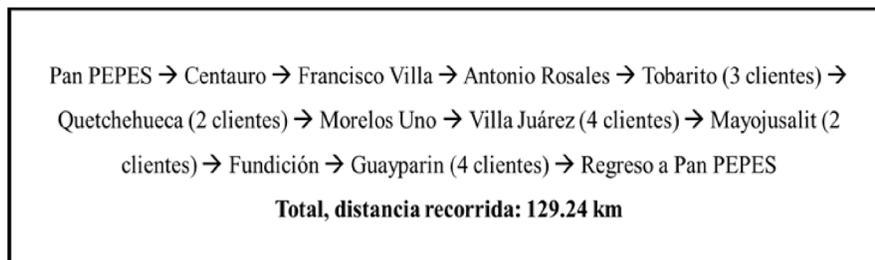


Figura 4. Secuencia de ruta aplicando método vecino más cercano
 Fuente: elaboración propia (2021)

La secuencia de acuerdo al método vecino más cercano, establece que se visiten primero los poblados de Centauro, Francisco Villa, Antonio Rosales, Tobarito, Quetchehueca, Morelos Uno, Villa Juárez, Mayojustalit, Fundición y Guayparin concluyendo la ruta con el regreso a la matriz de la organización.

Por último, se empleó el método de ahorros, en el cual de igual forma se hizo uso de la matriz de distancias directas, sin embargo, para el empleo de este, fue necesario usar el software Excel como apoyo en la solución de operaciones para la creación de una nueva matriz en función a las características de la técnica, Después de realizar los cálculos necesarios para la solución del método, se obtuvo la solución que se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados método de ahorros

Nodo	Poblado	Nodo a Nodo	Distancia den Km
A	Pan PEPES	A	0
S	Centauro	A-S	14.35
R	Francisco Villa	S-R	4.96
E	Antonio Rosales	R-E	4.45
N	Fundición	E-N	11.74
Ñ	Guayparin 1	N-Ñ	3.7
Q	Guayparin 4	Ñ-Q	0.15
O	Guayparin 2	Q-O	0.39
P	Guayparin 3	O-P	0.41
L	Mayojustalit 1	P-L	16.31
M	Mayojustalit 2	L-M	0.29
K	Villa Juárez 3	M-K	13.42

J	Villa Juárez 2	K-J	1.74
I	Villa Juárez 1	J-I	0.43
H	Quetchehueca 2	I-H	18.02
G	Quetchehueca 1	H-G	0.47
F	Morelos Uno	G-F	4.92
D	Tobarito 3	F-D	13.59
C	Tobarito 2	D-C	0.16
B	Tobarito 1	C-B	0.16
A	Pan PEPES	B-A	14.53
Total, de distancia recorrida			124.19 km

Fuente: elaboración propia (2021)

La secuencia que se obtiene mediante el desarrollo del método de ahorros comienza parecida al de vecino más cercano, sin embargo, con el presente método se encontró una manera de ahorrar más, si de Antonio Rosales se visita Fundición en lugar de Tobarito, por lo que a partir de aquí la ruta cambia y el recorrido de la distancia total fue de 124.19 kilómetros utilizando la matriz de distancias directas. A continuación, se muestra la secuencia resultante con este método de ruteo.

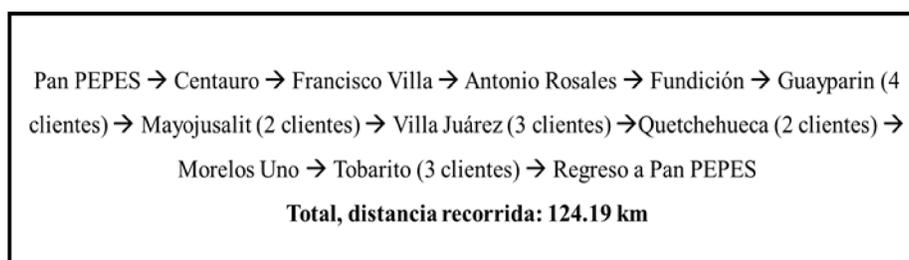


Figura 5. Secuencia de ruta aplicando método de ahorros

Fuente: elaboración propia

La secuencia de acuerdo al método de ahorro, establece que se visiten primero los poblados de Centauro, Francisco Villa, Antonio Rosales, Fundición, Guayparin, Mayojustalit, Villa Juárez, Quetchehueca, Morelos Uno y Tobarito concluyendo la ruta con el regreso a la matriz de la organización, lo que genera una diferencia de 5.05 Km con el método de vecino más cercano.

Posterior a la implementación de los métodos de ruteo mostrados anteriormente, se compararon estos con la finalidad de determinar cuál es la ruta óptima para realizar la propuesta del rediseño de ruta. La información acerca de la comparación se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Comparativa de los 3 métodos de ruteo implementados

Comparativa de los 3 métodos de ruteo			
	Barrido	Vecino cercano	Ahorros
Secuencia	A-F-G-H-I-J-K-C-D-B-E-M-L-R-S-N-P-O-Q-Ñ-A	A-S-R-E-D-C-B-H-G-F-I-J-K-L-M-N-P-O-Q-Ñ-A	A-S-R-E-N-Ñ-Q-O-P-L-M-K-J-I-H-G-F-D-C-B-A
Distancia directa	169.94 km	129.24 km	124.19 km
Distancia real	220.5 km	174.5 km	163.4 km
Tiempo de recorrido	03:52	03:33	03:21

Rendimiento de vehículo (Chevrolet Beat)			
kilómetros por litro	21 km/l	21 km/l	21 km/l
Consumo de gasolina	10.5 litros	8.31 litros	7.78 litros
Costo total	\$ 213.78	\$ 169.18	\$ 158.42

Fuente: elaboración propia (2021)

En la tabla, se muestra la comparativa de los tres métodos de ruteo, así como los distintos parámetros para determinar la viabilidad de cada una de las rutas, cabe mencionar que la distancia directa es la obtenida mediante el empleo de los métodos de ruteo (sin tener en cuenta los caminos y carreteras, solo la distancia entre cada nodo), mientras que la distancia real es la calculada aplicando la secuencia de los nodos en el software Google Maps y de esta forma se logró determinar la distancia real así como el tiempo que estaría activo el vehículo según la información brindada por el software.

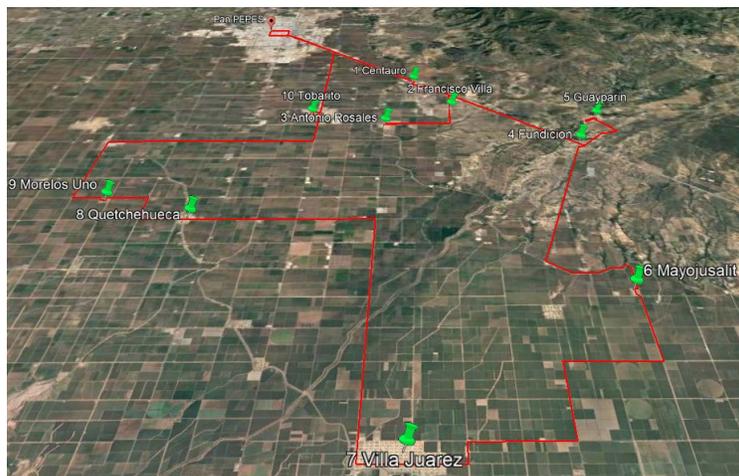
Tomando en consideración la comparativa de métodos empleados, se propone a la organización bajo estudio se implemente la ruta resultante por medio del método de ahorro, ya que resulta ser la ruta más corta tanto en cuestión de distancia total a recorrer, así como en tiempo, lo que generaría un ahorro significativo económicamente tal y como se muestra en la tabla de comparativa entre la ruta actual contra el método sugerido.

Tabla 8. Comparativa del estado actual contra el método de ahorros

Comparativa ruta actual contra método de ahorros			
Promedios del estado actual		Método de ahorros	
Longitud de ruta	198.69 km	Longitud de ruta	163.4 km
Duración vehículo activo	03:40	Duración vehículo activo	03:21
Costo de ruta	\$ 192.63	Costo de ruta	\$ 158.42

Fuente: elaboración propia (2021)

En efecto, la ruta propuesta representa una disminución en 35.4 Km de distancia recorrida, así como 19 minutos en la actividad del vehículo, lo que representa un ahorro promedio de \$34.21 por cada ocasión que se recorra dicha ruta, por lo que la secuencia propuesta a implementar sería en el orden ilustrado en la Figura 6.



Pan PEPES → Centauro → Francisco Villa → Antonio Rosales → Fundición → Guayparin (4 clientes) → Mayojustalit (2 clientes) → Villa Juárez (3 clientes) → Quetchehueca (2 clientes) → Morelos Uno → Tobarito (3 clientes) → Regreso a Pan PEPES
Total, distancia recorrida: 163.4 km

Figura 6. Secuencia de ruta propuesta con método de ahorros

Fuente: elaboración propia

Se observa que la propuesta inicia visitando en un primer momento al poblado de Centauro, después Francisco Villa, Antonio Rosales y de aquí se regresa hacia Fundición y posteriormente a Guayparin, habiendo terminado con este poblado se regresa a visitar

Mayojusalit, Villa Juárez y posteriormente los últimos 3 poblados, Quetchehueca, Morelos Uno y Tobarito en esa secuencia, estando en el Tobarito al ser el último de los destinos se procede a viajar de regreso hasta el punto origen.

Cabe mencionar que, la ruta obtenida mediante el método de ahorros se puso a prueba visitando los 10 poblados de acuerdo con la secuencia establecida por el método de ahorro, previo al recorrido, se habló con el encargado de la ruta del Valle del Yaqui y Mayo, el cual aceptó realizar la secuencia propuesta y se le explico la ruta a seguir antes de salir de la panadería.

Sin embargo, con base a su experiencia comentó que el camino para pasar de Francisco Villa hacia Antonio Rosales se encuentra en malas condiciones y que no es seguro transitar por esa zona. Por lo que la ruta tuvo que modificarse y resultó como se muestra en la siguiente Figura 7.

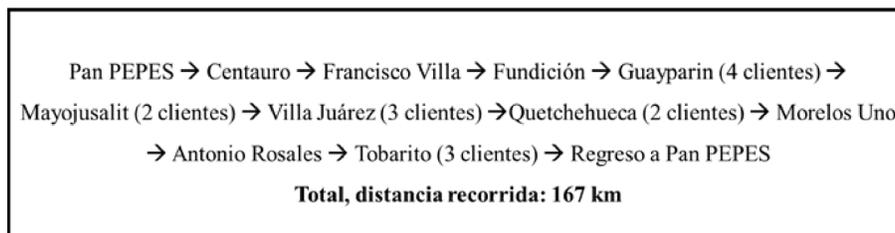


Figura 7. Modificación de ruta propuesta con método de ahorros
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, la ruta cuenta con una variación que afecta tanto a la secuencia a seguir, como al total de la distancia recorrida, ya que la ruta óptima obtenida por el método de ahorros fue de 163.4 kilómetros, sin embargo, al poner a prueba la propuesta de ruta, sufrió el cambio previamente mencionado por lo que la distancia recorrida aumento a 167 km, teniendo un aumento de 3.6 kilómetros, sin embargo, aún con dichas modificaciones, esta se sigue manteniendo como la mejor ruta por la distancia que esta representa así como los ahorros que trae consigo como consecuencia de la reducción de la distancia total recorrida.

Conclusiones

Mediante el desarrollo del presente proyecto se desarrolló una propuesta de mejora en la ruta de entrega del Valle del Yaqui y Mayo de la organización bajo estudio, mediante la implementación de distintos métodos de ruteo, impactando de forma positiva en el área de distribución ya que mediante la solución propuesta se observa una reducción favorable tanto en los tiempos de entrega, como en los costos operativos, por lo que se puede concluir que el problema presentado fue abordado de manera exitosa ya que se

logró presentar una solución a los inconvenientes identificados y además se alcanzó la creación de una nueva ruta funcional que refleja ahorros para la empresa.

Por lo que se recomienda que la organización implemente la ruta propuesta con el fin de analizar comportamientos futuros, esto mediante el uso del software GeoTracker, ya que, por medio de este, es posible capturar datos de valor y con ello la generación para la toma de decisiones basada en datos cuantitativos por parte de la dirección.

De igual manera se recomienda para futuras investigaciones o proyectos, realizar un análisis similar en cuanto a metodología, en las otras rutas restantes que maneja la empresa ya que es un área de oportunidad traducida en ahorros significativos en el corto, mediano y largo plazo.

Reconocimientos

Los autores de la presente investigación, agradecen el apoyo recibido a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) del programa de “Laboratorios Nacionales. Así como a la dirección y personal operativo de la empresa bajo estudio, por la apertura de sus puertas y proporción de información para llevar a cabo el presente Proyecto, por último el más grato agradecimiento a cada una de las personas involucradas en el desarrollo del mismo, por su valiosa participación y aportaciones efectuadas durante el desarrollo de la investigación.

Referencias

- [1] Vicenti , M. (2 de Noviembre de 2021). É Logística . Obtenido de <https://logisticasud.enfasis.com/logistica-y-distribucion/velocidad-de-entrega-la-nueva-normalidad-en-la-supply-chain/#>
- [2] Zamarripa Belmares , N. (s.f.). Gestipolis . Obtenido de <https://www.gestipolis.com/cadena-suministro/>
- [3] El Economista . (12 de Agosto de 2012). Obtenido de <https://eleconomista.com.ar/negocios/las-tres-tendencias-estan-cambiando-reglas-juego-e-commerce-n45446>
- [4] Peralta , F. (19 de Abril de 2022). Driv.in. Obtenido de <https://blog.driv.in/es/problemas-de-entrega/>
- [5] Chamba , J., Cazull, C., & Rodríguez , A. (2016). Método para la gestión integrada de la tranferencia tecnológica en pequeñas y medianas empresas angoleñas. Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, “Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface,” IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p. 301, 1982].
- [6] Solis, A. C. (2014). Logística de la A a la Z. Lima: Fondo Editorial PUCP.

- [7] Boubeta, A. I. (2007). Distribucion Logistica y Comercial. España: Ideaspropias Editorial.
- [8] Zalazar, R. J. (2011). Introduccion a la Administracion: Paradigmas en las Organizaciones. Obtenido de eumed.net: <https://www.eumed.net/libros-gratis/2011e/1090/sistema.html>
- [9] Zalazar, R. (2011). INTRODUCCIÓN LA ADMINISTRACIÓN: PARADIGMAS EN LAS ORGANIZACIONES. Obtenido de <https://www.eumed.net/libros-gratis/2011e/1090/sistema.html#:~:text=Seg%C3%BAAn%20Van%20Gigch%2C%20un%20sistema,como%20opuesto%20a%20permanecer%20interte>).
- [10] Echeverria, A. L. (Julio de 2012). DISEÑO DE UN SISTEMA LOGISTICO DE PLANIFICACION DE INVENTARIOS PARA APROVISIONAMIENTO EN EMPRESAS DE DISTRIBUCION DEL SECTOR DE PRODUCTOS DE CONSUMO MASIVO. Sistema Logistico. San Salvador.
- [11] Avila, S. (2010). Logistica y distribucion fisica internacional. Bogota: LEGIS S.A.
- [12] Routingmaps. (S/F). Tech4log Routingmaps. Obtenido de <https://www.routingmaps.com/disenio-de-rutas-de-transporte-logistica/>
- [13] Mancinella Togni, E. (22 de Marzo de 2021). Infocabildo. Obtenido de <https://infocabildo.com/2021/03/22/metodo-de-barrido-herramienta-para-mejorar-la-distribucion-de-mercaderia/>
- [14] Salazar López , B. (12 de Junio de 2019). Ingenieria industrial online. Obtenido de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/problema-del-agente-viajero-tsp/>
- [15] Ascencio Laguna, J. A., Bustos Rosales, A., Jiménez Sánchez, J. E., Balbuena Cruz, J. A., & Zamora Domínguez, A. R. (2018). Asistente automático para diseño de rutas de distribución. Obtenido de IMT Instituto Mexicano del Transporte: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt538.pdf>
- [16] Calderón, J. H., Gomez, A., & Gongora, A. (25 de Marzo de 2016). Metodologia para el diseño de rutas en un sistema de logistica inversa, caso: bando de alimentos. Obtenido de Uniminuto: <https://revistas.uniminuto.edu/>

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS LOGÍSTICOS

Estudio comparativo de métodos para resolver el problema de calendarización en una línea de producción manufacturera

Jesús Carlos Carmona Frausto, Adriana Mexicano Santoyo
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Salvador Cervantes Alvarez, José Antonio Cervantes Alvarez
Departamento de Ciencias Computacionales e Ingenierías
Universidad de Guadalajara, U de G

Resumen— *En la actualidad, la calendarización de trabajos y procesos se ha convertido en un tema muy importante para todas las industrias debido a su necesidad de mantenerse competitivas y ofrecer a los clientes los mejores productos y servicios. El no contar con una buena calendarización de trabajos llevaría a retrasos en los tiempos de entrega o incumplimiento. Cuando la cantidad de trabajos a ordenar es baja, dicha calendarización puede llevarse de manera manual pero cuando el número de trabajos a ordenar aumenta debemos hacer uso de algún ordenamiento por computadora ya que realizarlo de manera manual sería impráctico. Por ejemplo, si quiere ordenar un conjunto de 100 trabajos se tienen 3,628,800 posibilidades distintas de ordenamiento. Generalmente los problemas de calendarización suelen venir acompañados de un conjunto de restricciones que nos indican las prioridades de ésta. Una de las más importantes a destacar es el tiempo que tarda en terminarse todo el conjunto de trabajos de una calendarización. En este trabajo se presenta una comparativa de una regla de prioridad y cuatro de los métodos meta-heurísticos más usados para resolver el problema de calendarización de trabajos en una sola maquina mediante la minimización de la tardanza total ponderada. Los conjuntos de datos utilizados se obtuvieron de la Biblioteca OR de J.E. Beasley [6]. Los resultados obtenidos por cada uno de los algoritmos son comparados mediante diferentes métricas que nos indican su desempeño.*

Palabras Clave — estudio; métodos; calendarización; producción; manufactura

La calendarización de trabajos es un tema predominante en el campo industrial. Se re-

fiere al orden y tiempo en el que se deben atender las diferentes tareas de un proceso industrial con el fin de minimizar la tardanza total en la producción. La correcta calendarización del trabajo debe tener en cuenta los requisitos de la demanda y las capacidades de producción de una empresa. Es bien sabido que la ordenación de los trabajos tiene un impacto directo en la eficiencia de la producción y en los costos de los sistemas de fabricación [19].

Para obtener una correcta calendarización del trabajo, se consideran diferentes parámetros como: el tiempo de procesamiento, la fecha de vencimiento y el tiempo de flujo, este último se refiere al tiempo acumulado del trabajo en relación con los demás trabajos de la secuencia.

Uno de los objetivos más importantes a lograr con la calendarización industrial es minimizar el tiempo de demora para completar todos los trabajos en el proceso con el fin de entregar productos y servicios en el tiempo y la forma adecuados. Esto se conoce como el problema de minimización de la tardanza total ponderada [8]. Siendo el problema de la tardanza total de naturaleza combinatoria, se ha demostrado que es un problema de complejidad del tipo NP-hard [8]. Esto significa que el espacio de su solución es inmenso y, por lo tanto, no es posible obtener una solución óptima en un tiempo razonable utilizando métodos exactos cuando es necesario calendarizar una gran cantidad de trabajos. Debido a esto, se han desarrollado métodos de búsqueda especializados, tales como: Algoritmos Genéticos, Búsqueda Tabú, Ramificación y poda, entre otros [3] y su efectividad ha sido probada en trabajos como [10] y [14], donde se brindan buenas soluciones en un tiempo razonable para problemas numéricos combinatorios de gran costo computacional.

El presente trabajo muestra una comparativa de una regla de prioridad y tres de los métodos metaheurísticos más usados para resolver el problema de calendarización de trabajos. Todos los métodos se implementaron de acuerdo con su respectivo trabajo de referencia. Además, los algoritmos se compararon con base en diferentes métricas útiles para evaluar el desempeño de los algoritmos en diferentes aspectos.

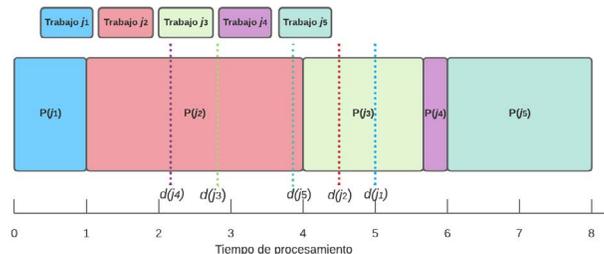
El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: Algunos conceptos básicos para la comprensión del problema se definen en la Sección 2. Trabajos relevantes en el estado del arte son presentados en la Sección 3. La Sección 4 explica los materiales usados en este estudio y el funcionamiento de los algoritmos para su implementación. La Sección 5 presenta los resultados experimentales de los métodos aplicados. Finalmente, la Sección 6 muestra las conclusiones del estudio.

Marco conceptual

El problema de calendarización de trabajos con una sola máquina

Un problema de calendarización de trabajos con una sola máquina se puede definir como un conjunto de trabajos serializados que sólo pueden ser atendidos por una sola máquina o recurso. Los trabajos se toman de uno en uno y el siguiente sólo puede comenzar cuando finaliza el anterior. El j -ésimo trabajo se denota como J_j y tiene un tiempo de procesamiento de p_j y una fecha de vencimiento d_j y el objetivo es minimizar el tiempo de tardanza total. La Fig. 1 muestra un ejemplo de una calendarización de 5 trabajos, donde el Trabajo 1, representado como la primera caja azul, tiene un tiempo de procesamiento de 1 y debe completarse antes de su fecha de vencimiento representado como la línea vertical azul. Para el caso del Trabajo 2 se puede observar que cuenta con un tiempo de procesamiento de 2 y debe completarse antes del tiempo 3 y así sucesivamente.

Figura 1. Calendarización de trabajos con una sola máquina



Una de las maneras ampliamente usadas para evaluar lo optimalidad de la calendarización es por medio del tiempo de tardanza total.

Tiempo de Tardanza Total

La Tardanza Total se refiere a la suma de las tardanzas en la entrega de todos los trabajos de una calendarización. Du y Leung [8] encontraron que minimizar el tiempo de tardanza en una máquina tiene una complejidad NP-hard. Esto significa que las soluciones óptimas no pueden ser encontradas en tiempo polinomial [15]. La Tardanza Total también es conocida como Tardanza Total Ponderada cuando se usa un coeficiente de ponderación que señala una prioridad en el trabajo. Jianzhong define la Tardanza Total Ponderada (TT) en la función objetivo de la Ecuación 1:

$$(1) \quad TT_S = \sum_{j=1}^n W_j \max(0, C_{jS} - d_j)$$

donde TT_S denota el tiempo de tardanza total ponderada con el calendario S ; C_{jS} se refiere al tiempo de flujo o tiempo acumulado del tiempo de procesamiento hasta el trabajo con un calendario S ; W_j es la prioridad o coeficiente de ponderación del trabajo J_j ; y d_j es

la fecha de vencimiento del trabajo j . En esta formulación, sólo se tiene en cuenta la tardanza, pero no la precocidad.

Estado del arte

Existen diversas propuestas de trabajos que se han realizado en el área de investigación de operaciones para dar solución al problema de la tardanza total en las industrias usando diferentes algoritmos. Entre las propuestas más relevantes y comparativas que se han realizado se encuentran las siguientes.

En [2], tanto el problema de Tardanza Total Single Machine como el problema de la optimización de la varianza del tiempo de espera, fueron resueltos mediante el uso de 4 algoritmos genéticos, cada uno de estos con una función de adaptación estática o dinámica, y una población iniciada aleatoriamente o mediante un método heurístico. Usando problemas generados por el autor, se llegó a la conclusión que el uso de una población iniciada por método heurístico, y una función de adaptación dinámica provee de un algoritmo genético más efectivo y mejora sustancialmente su rendimiento.

Schaller [16], por su parte, comparó el rendimiento de varias metaheurísticas, incluyendo dos recocidos simulados y una Optimización por Colonia de Hormigas, y propuso un algoritmo genético frente al problema de la Tardanza Total tomando en cuenta los anticipos y el uso de múltiples máquinas. En el artículo, los autores compararon los métodos con instancias generadas aleatoriamente y encontraron que su algoritmo genético se desempeñó mejor que los demás.

Chou [7] propuso un algoritmo genético de aprendizaje para resolver el problema de reducción de la Tardanza Total Ponderada Single Machine, para ello utilizó un proceso de inmigración que crea nuevas soluciones a partir de iteraciones pasadas.

H. Nazif [13] desarrolló un algoritmo genético de Cruza Optimizada (OCGA) para resolver el problema de calendarización Single Machine por familias y lo comparó con dos métodos: una Búsqueda Tabú de Longitud Dinámica (DLTS) y un método aleatorio de descenso pronunciado (RSDM), el algoritmo OCGA obtuvo los mejores resultados.

Materiales y métodos

Para la implementación de los algoritmos utilizó el entorno de programación Matlab R2015a. Los conjuntos de datos de Tardanza Total Ponderada fueron obtenidos de [6] los cuales se utilizaron para la experimentación. Las instancias de los conjuntos de datos se agruparon en tres clases según el número de trabajos: 40, 50 y 100. Cada uno de estos grupos contiene 125 instancias de problemas con diferentes tiempos de procesamiento, fechas de vencimiento y pesos para cada trabajo.

Una forma de dar solución al problema de Tardanza Total Ponderada es mediante reglas de prioridad, aunque estas reglas comúnmente no son el mejor ordenamiento. Otra manera de encontrar mejores resultados para dar solución al problema de calendarización de trabajos es a través de metaheurísticas, ejemplos de éstas son: los Algoritmos Genéticos, Recocido Simulado, Colonia de Hormigas, Búsqueda Tabú entre otros. En este estudio se analizó, implementó y se compararon tres de las metaheurísticas frecuentemente usadas para la resolución al problema de calendarización de trabajos con base en la tardanza total. Además, también se analizó el desempeño de la regla de prioridad más usada para la resolución de este problema (EDD). Las implementaciones se realizaron acorde con su respectivo trabajo de referencia. En las siguientes subsecciones se explican algunas reglas de prioridad y los algoritmos metaheurísticos usados.

A. Reglas de prioridad

Las reglas de prioridad se pueden clasificar de acuerdo con la información que utilizan. Las más utilizadas se basan en información relacionada con un trabajo concreto, como su fecha de vencimiento, tiempo de procesamiento, número de operaciones restantes, etc. Algunas de las más utilizadas son: 1) SPT. Tiempo de procesamiento más corto, clasifica las tareas de acuerdo con su tiempo de procesamiento de menor a mayor [18]. 2) LPT. El tiempo de procesamiento más largo, a diferencia de SPT, clasifica los trabajos de mayor a menor tiempo de procesamiento. 3) EDD. Fecha de vencimiento más temprana, ordena los trabajos según sus fechas de vencimiento más tempranas. 4) FIFO. Primero en entrar, primero en salir, atiende los trabajos en el orden en que llegan. 5) LIFO. Último en entrar, primero en salir, atiende los trabajos como lo contrario de FIFO, el último en llegar es el primero en realizarse.

En este trabajo se decidió comparar la regla EDD por su amplia usabilidad en el ambiente industrial respecto a las demás reglas con dos de los métodos metaheurísticos más usados: Búsqueda Tabú y Recocido Simulado los cuales se explican a continuación.

B. Búsqueda Tabú

La Búsqueda Tabú es un procedimiento de búsqueda de soluciones basado en el proceso de guiar una búsqueda local, haciendo uso de una memoria a corto y largo plazo, el algoritmo explora el espacio de soluciones tratando de evitar caer en óptimos locales. La memoria está representada por una matriz de movimientos prohibidos o “tabú” de tamaño $n \times n$ denominada estructura tabú, donde hay un registro de los movimientos aplicados en la secuencia que impiden volver a explorar el mismo espacio de búsqueda para un cierto número de iteraciones [9].

Considerando el conjunto inicial de 5 trabajos que se muestran en la Tabla 1, el procedimiento es el que se describe a continuación:

Tabla 1. Conjunto inicial de trabajos

Trabajo	Tiempo de proceso	Fecha de entrega	Ponderación
1	10	50	1
2	30	45	1
3	15	25	1
4	5	22	1
5	20	40	1

Generación de la solución inicial: El algoritmo primero genera una solución inicial que puede ser aleatoria o guiada por alguna regla de prioridad o solución previa. Para esta implementación de Búsqueda Tabú se utilizó la regla de fecha de vencimiento más temprana (EDD) como solución inicial debido a su bajo costo computacional y la calidad de la solución relativamente buena, en este caso resultó el ordenamiento {4, 3, 5, 2, 1}.

$$TTs = \{1 * \max(0, [5-22])\} + \{1 * \max(0, [20-25])\} \\ + \{1 * \max(0, [40-40])\} + \{1 * \max(0, [70-45])\} \\ + \{1 * \max(0, [80-50])\} = 55$$

Una vez calculada la solución inicial, se evaluó utilizando la función objetivo de la Ecuación 1 dando un total de 55 días de retraso.

Búsqueda local: A partir de la solución inicial, se realiza una búsqueda local para explorar soluciones vecinas. Esto se logra intercambiando trabajos aleatorios desde sus respectivas posiciones de forma iterativa hasta que se encuentra el intercambio que genera la secuencia con el mejor valor de tardanza total. Por cuestiones del tiempo de cálculo, se generó un máximo de 100 intercambios aleatorios por iteración y se seleccionó el mejor. Un ejemplo de solución aleatoria fue {5, 3, 4, 2, 1} dando como resultado un total de 83 días, lo cual empeoró la solución previa.

Actualización tabú: Una vez que se ha identificado el mejor movimiento, se busca en la matriz tabú. Si el movimiento está en la matriz, se rechaza y se vuelven a generar intercambios aleatorios, este proceso se llama memoria a corto plazo. De lo contrario, si el movimiento no está en la matriz, se acepta, se agrega a la secuencia principal y se marca como prohibido para un cierto número de iteraciones. En la Tabla 2, se presenta un ejemplo de una matriz tabú para el problema de Calendarización de 5 trabajos, donde sus filas y columnas simbolizan las posiciones de la secuencia. Se puede ver que los intercambios entre las posiciones 2 y 3, así como el de las posiciones 3 y 5 están bloqueados o “tabú”, y estarán desbloqueados hasta las iteraciones 3 y 2, respectivamente.

Tabla 2. Matriz tabú

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	X	0	3	0	0
3	X	X	0	0	2
4	X	X	X	0	0
5	X	X	X	X	0

Memoria a largo plazo: Adicionalmente, existe una matriz donde se registra el número de veces que se acepta un movimiento. El objetivo es evitar excesos frecuentes. Esto se conoce como la matriz de memoria de largo plazo, que permite intensificar la búsqueda en regiones para encontrar soluciones que no han sido exploradas previamente. La memoria a largo plazo está representada por una matriz $n \times n$, como la matriz tabú. La Tabla 3 muestra que el intercambio entre las posiciones 2 y 3 ha ocurrido sólo una vez, mientras que el intercambio entre las posiciones 3 y 5 ha ocurrido 5 veces.

Tabla 3. Matriz de memoria de largo plazo

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	2
2	X	0	1	0	0
3	X	X	0	0	5
4	X	X	X	2	0
5	X	X	X	X	0

Esta implementación de búsqueda tabú repite los pasos de Actualización tabú y finaliza hasta que se hayan completado 2000 generaciones y se selecciona la mejor solución de todo el proceso. En la Fig. 2 se puede ver el seudocódigo del Algoritmo Búsqueda Tabú.

Require:
Gen : número de iteraciones
L : número de movimientos
ten : número de iteraciones tabú

- 1: Generar una solución inicial *Solucion*
- 2: $TT_{solucion} = \sum_{j=1}^n W_j \max(0, C_j, Solucion - d_j)$ ▷ Evaluación de la solución inicial
- 3: **for** *i* = 1, ..., *Gen* **do**
- 4: *Tab* = *Falso*
- 5: **for** *ind* = 1 ... *L* **do** ▷ Generación de movimientos tabú
- 6: *Candidato_{ind}* ← *MovimientoBusqueda*(*Solucion*) ▷ Modificación
- 7: *Tardanza* = *TT*(*Candidato_{ind}*)
- 8: **if** *Tardanza* < *TT*(*Solucion*) **then**
- 9: *Mejor* = *Candidato_{ind}*
- 10: **end if**
- 11: **end for**
- 12: **while** *Tab* = *Falso* **do**
- 13: **if** *Mejor* no es *Tabu* **then** ▷ Si el candidato no está en lista tabú
- 14: *Mejor* es *tabu*(*ten*) ▷ Agregar a lista tabú
- 15: *MemoriaLargoPlazo* = *MemoriaLargoPlazo* + 1
- 16: *Solucion* = *Mejor*
- 17: *Tab* = *Verdadero*
- 18: **else**
- 19: Elige el *SiguienteMejor* candidato
- 20: *SiguienteMejor* ← *tabu*(*ten*) ▷ Agregar a lista tabú
- 21: *MemoriaLargoPlazo* = *MemoriaLargoPlazo* + 1
- 22: *Solucion* = *SiguienteMejor*
- 23: *Tab* = *Verdadero*
- 24: **end if**
- 25: **end while**
- 26: **end for**
- 27: *Resultado* = *Solucion*

Figura 2. Algoritmo Búsqueda Tabú

C. Recocido Simulado

El recocido simulado es un algoritmo que parte del proceso de enfriamiento y cristalización de los materiales y su tendencia a permanecer en una configuración de baja energía [1]. Es especialmente eficaz en problemas de minimización de funciones de costos como el actual problema de Tardanza Total. El algoritmo utiliza un concepto análogo a la temperatura, que descenderá iterativamente a un valor predeterminado mientras las soluciones se reorganizan en cada iteración. El procedimiento es el siguiente.

Inicialización de parámetros: El proceso comienza definiendo los parámetros de temperatura inicial y final, el número de iteraciones para cada valor de temperatura y la función de disminución de la temperatura. La temperatura inicial se fija normalmente utilizando un valor muy alto, lo que permite una gran diversidad de soluciones, y la temperatura final debe ser un valor muy pequeño cercano a cero (0.001). El parámetro de disminución de temperatura se puede configurar aplicando varias opciones lineal, exponencial, logarítmica, etc. [1]. En este procedimiento de recocido simulado, la disminución de temperatura usada se describe en la Ecuación 2.

$$\alpha(T) = \alpha T_2$$

donde α se refiere al coeficiente de disminución el cual se estableció en 0.99, y T representa la temperatura.

Generación de solución inicial: La solución inicial se genera utilizando una secuencia inicial aleatoria o aplicando cualquier método de ordenación. El valor de temperatura inicial se calcula de acuerdo con un porcentaje de la Tardanza Total de esa solución inicial. En este trabajo el porcentaje utilizado fue del 50% de la tardanza total.

Búsqueda local: Se aplica una búsqueda local, en este caso un intercambio de pares aleatorio, para generar 200 soluciones candidatas vecinas y se evalúa cada una. Se calcula la diferencia de la Tardanza Total entre cada una de las soluciones candidatas y la solución actual. La solución candidata se acepta como la nueva solución actual si se cumple alguna de las siguientes condiciones:

if $\delta \leq 0$
 if $\omega < e^{-(\delta/T)}$

donde ω es un número generado aleatoriamente distribuido uniformemente entre 0 y 1.

Reducción de temperatura: Una vez que una solución candidata ha sido aceptada o rechazada, se reduce la temperatura según la Ecuación 2 y se repite el proceso desde la Búsqueda local hasta que la temperatura T alcanza el valor final, en este caso 0.001. En la Fig. 3 se puede ver el pseudocódigo del Algoritmo Recocido Simulado.

```

Require:
  L : Número de iteraciones por valor de T
  Tf : Temperatura final
  a : Coeficiente de decremento
1: Generar una Solucion inicial
2: TTinicial =  $\sum_{j=1}^n W_j \max(0, C_{j,Solucion} - d_j)$            ▷ Evaluación de la solución inicial
3: T = 0.5 * TTinicial                                       ▷ Temperatura inicial de la solución
4: while T >= Tf do
5:   for ind = 1 . . . L do
6:     Candidato ← MovimientoBusquedaLocal(Solucion)           ▷ Modificación
7:     Δ = TT(Candidato) – TT(Solucion)                       ▷ Diferencia candidato y solución
8:     if rand < e-Δ/T || Δ <= 0 then
9:       Solucion = Candidato
10:    end if
11:   end for
12:   T = a * T
13: end while
14: Resultado = Solucion
  
```

Figura 3: Algoritmo Recocido Simulado

D. Colonia de Hormigas

Las hormigas se comunican principalmente por feromonas. Cada vez que una hormiga sale en busca de alimento deja un rastro de feromonas, éste rastro sirve de guía a la colonia indicando que encontró una fuente de alimento. Las demás hormigas huelen las feromonas y siguen el mismo camino de la hormiga inicial para traer más alimento a la colonia. En este proceso, las hormigas continúan excretando feromonas, que otras hormigas vuelven a oler y seguir, de esta manera el camino hacia la fuente de alimento se refuerza con el aumento de la cantidad feromona. Es entonces cuando, a través del tiempo, el camino más corto hacia la fuente de alimento se vuelve más atractivo, ya que está siendo reforzado por una retroalimentación positiva. Este sistema de comunicación social inspiró varios trabajos con enfoque en la optimización industrial, donde originalmente se desarrolló para encontrar rutas óptimas, pero, dada su versatilidad, fue rápidamente modificado para atender diversos problemas combinatorios como el problema de la Tardanza Total.

El algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas, parte del análisis del comportamiento de las hormigas cuando depositan sus feromonas. Este algoritmo fue desarrollado por Martin Dorigo y publicado en 1991 en su artículo Distributed Optimization by Ant Colonies. Originalmente se desarrolló para encontrar rutas óptimas, pero, dada su versatilidad, fue rápidamente modificado para atender diversos problemas de optimización combinatoria. La presente implementación se basa en la implementación realizada por Bauer et al en su artículo “An Ant Colony Optimization Approach for the Single Machine Total Tardiness Problem” [4]. Donde presenta tres fases fundamentales:

1. Generación de soluciones
2. Búsqueda Local
3. Actualización del rastro de feromonas

1. Generación de soluciones

La primera fase, la generación de soluciones, implica la creación de un número n de hormigas que irán formando, cada una, un conjunto de secuencias factibles. Cada hormiga decidirá qué tarea estará en cada una de las posiciones de la secuencia de acuerdo con la distribución de probabilidades dada por la Ecuación 3:

$$(3) \quad p_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in S} [\tau_{ih}]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta}$$

donde p_{ij} se refiere a la probabilidad de escoger un trabajo j en la posición i de la secuencia, τ_{ij} a la intensidad de la feromona del trabajo j en la posición i , η_{ij} a la información heurística del problema, y α y β como las constantes de importancia de los parámetros de feromonas e información heurística respectivamente. El subíndice h representa a los

trabajos que no han sido seleccionados y estén actualmente en la secuencia formada por la hormiga.

La intensidad de la feromona se calcula tomando en cuenta la tardanza total y el tamaño de la secuencia, como se observa en la Ecuación 4:

$$(4) \tau_0 = \frac{1}{n * T_{EDD}}$$

donde τ_0 es la intensidad inicial de feromona, n es el tamaño de la secuencia, y T_{EDD} al valor de tardanza total de la secuencia según la regla de ordenamiento EDD.

La información heurística η_{ij} se calcula, en este caso, utilizando la regla de ordenamiento EDD como heurística principal, como se observa en la Ecuación 5.

$$(5) \eta_{ij} = \frac{1}{d_j}$$

donde d_j se refiere a la fecha de entrega del trabajo j

Es posible utilizar otros métodos heurísticos como información heurística como se describe en [4] y [5] pero al utilizarlos se tiene un mayor costo computacional. Para las constantes de importancia α y β se utilizaron los valores sugeridos en [4] de $\alpha = 1$ y $\beta = 2$.

Cada que una hormiga seleccione un trabajo j en la posición i se realiza una actualización local en la matriz de feromona que representa al trabajo y posición seleccionados de acuerdo con la Ecuación 6.

$$(6) \tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \rho * \tau_0$$

donde $\tau_{ij}(t+1)$ se refiere al valor siguiente de la feromona y ρ a la constante de evaporación de la feromona, en este caso, con valor de 0.1.

2. Búsqueda Local

Una vez que las hormigas hayan terminado de generar las soluciones se aplica una búsqueda local de la solución con el mejor valor de la población de hormigas. El tipo de búsqueda local elegida fue el intercambio de pares adyacentes, el cual realiza un intercambio en las posiciones de manera escalonada a lo largo de toda la secuencia seleccionada.

Cada vez que se efectúa un intercambio, se vuelve a calcular la tardanza total de la secuencia y, si ésta es menor, se mantiene el intercambio, en caso contrario, se vuelve al estado anterior. Así se intercambian todas las posiciones y se mantiene la que contenga la mejor solución.

3. Actualización de feromona

El paso final es realizar una actualización global de la matriz de feromona. La actualización, en este caso, solo toma en cuenta la mejor solución obtenida y se calcula mediante la Ecuación 7.

$$(7) \tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) * \tau_{ij}(t) + \rho * \Delta\tau_{ij}(t)$$

donde $\Delta\tau_{ij}(t)$ es la cantidad de feromona agregada y es igual a $\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{T^*}$, donde T^* es el valor de tardanza total de esa mejor solución.

Tabla 4. Ejemplo de actualización de feromona

	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					

En la Tabla 4 se puede observar un ejemplo de una matriz de feromona de cinco trabajos, donde las filas significan los trabajos y las columnas las posiciones de la secuencia. Los espacios sombreados son las posiciones de la matriz cuyos valores deben ser actualizados en caso de que la mejor secuencia fuese 2 4 3 5 1.

Require:

- n : Tamaño del problema
- α : Coeficiente de información heurística
- β : Coeficiente de importancia de feromona
- Gen : Número de generaciones
- τ : Valor de feromona
- H : Número de hormigas
- q_0 : Constante de aleatoriedad
- ρ : Coeficiente de evaporación

```

1:  $TT_{EDD} = \sum_{j=1}^n W_j \max(0, C_{j,EDD} - d_j)$ 
2:  $\tau_0 \leftarrow 1/n * T_{EDD}$                                 ▷ feromona inicial
3: for 1 to  $Gen$  do
4:   for cada hormiga  $i = 1$  to  $H$  do
5:     for cada trabajo  $j = 1$  to  $n$  do
6:        $\eta_j = \frac{1}{d_j}$                                 ▷ información heurística
7:        $p_j = \frac{[\tau_j]^\alpha [\eta_j]^\beta}{\sum_{h \in S} [\tau_h]^\alpha [\eta_h]^\beta}$     ▷ probabilidad de elección de trabajo en posición  $j$ 
8:       if  $Rand \geq q_0$  then                        ▷ Probabilidad de aleatoriedad
9:         Escoger un trabajo para la  $Hormiga_i$  en posición  $j$  de acuerdo a la
           distribución  $p_j$ 
10:      else
11:        Escoger un trabajo para la  $Hormiga_i$  en posición  $j$  según el aparente
           siguiente mejor trabajo
12:      end if
13:    end for
14:     $Hormiga_i \leftarrow BusquedaLocal(Hormiga_i)$  ▷ Operación de búsqueda local en
           la solución
15:  end for
16:   $\tau(t+1) = (1 - \rho) * \tau(t) + \rho * \tau_0$           ▷ Actualización de la matriz de feromona
17: end for
18:  $Resultado = \min(TT_i(Hormiga_i))$ 

```

Figura 4. Algoritmo Colonia de Hormigas

A partir de este punto el algoritmo vuelve a liberar a las hormigas, se vuelve a calcular la probabilidad de selección de los trabajos, se realiza una búsqueda local en la mejor hormiga y se actualiza el rastro de feromona de acuerdo con la mejor solución obtenida. Esto se repite hasta que las hormigas converjan a las mejores soluciones, hasta que la mejor solución no haya mejorado después de ciertas generaciones, o hasta que se alcance el límite de iteraciones. En la Fig. 4 se puede ver el seudocódigo del Algoritmo Colonia de Hormigas.

E. Algoritmo Genético LCS

El Algoritmo Genético estándar es definido por Goldber [11] y adaptado al problema de calendarización por Iyer [12], el cual emplea es conocido como el Algoritmo Genético LCS por su operador de cruce. En este algoritmo se genera una población inicial completamente aleatoria de soluciones (en este, caso secuencias de trabajos), se utiliza el método de ruleta ponderada para la selección de los padres, se generan dos hijos por par de padres, se hace uso de la cruce LCS (Longest Common Subsequence) en la que se hereda la subsecuencia común más larga de los padres con una probabilidad de 0.95, y una mutación aleatoria con probabilidad de 0.05. Finalmente, los hijos reemplazan completamente a la población inicial y se repite el proceso cierto número de generaciones. Generación de la población inicial: El primer paso consiste en generar una población

inicial aleatoria de individuos o secuencias factibles. Cada número, elemento de una solución; señala un trabajo en particular formando la una secuencia de trabajos una posible solución o individuo. En este caso, se generaron 50 individuos aleatorios como población inicial. A manera de ejemplo, se presenta la Fig. 5 donde se encuentran 5 secuencias de 5 trabajos que fueron generadas aleatoriamente.

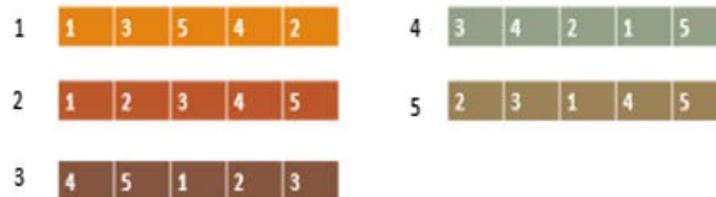


Figura 5: Población inicial

Adaptación: A cada individuo de la población se le calcula el nivel de adaptación acorde a la función objetivo. La adaptación, en este caso, corresponde al tiempo de Tardanza Total, definido en la Ecuación 1. La Fig. 6 muestra la Tardanza Total de cada individuo.



Figura 6: Tardanza Total de la población

Adaptación revisada: Debido a que es un problema que consiste en minimizar el valor de la tardanza, para realizar la correcta selección de los padres se deben ponderar las soluciones en relación con su nivel de adaptación. Una mejor solución al problema debe tener un mayor índice de adaptación. Para ello se hace uso de la adaptación revisada sugerida por Serna y Cervigón [17], la cual se muestra en la Ecuación 8:

$$(8) AR = C_{max} * 1.05 - TT_S$$

donde C_{max} es igual al mayor valor de tardanza total de la población y TT_S el tiempo de Tardanza Total de la secuencia. La adaptación revisada es necesaria cuando las mejores soluciones se encuentran en los mínimos de la función de adaptación.

Índice de adaptación: Después de calcular los valores de adaptación revisados se calcula el índice de adaptación utilizando la Ecuación 9. Este índice será usado para seleccionar

los padres en un procedimiento posterior.

$$(9) \text{IndAdapt} = \frac{AR}{\sum_{i=1}^n AR_i}$$

donde *IndAdapt* es el índice de adaptación y *AR* es el valor de adaptación revisada. El subíndice *i* relaciona el valor al individuo *i* de la población.

Selección de los padres: El Algoritmo Genético Estándar utiliza la selección por ruleta aleatoria para escoger a cada pareja de padres. La ruleta está ponderada de acuerdo con los índices de adaptación de la población. Después de realizar la selección se obtienen las parejas que se cruzarán. Cada una generará dos descendientes hasta que el número de hijos sea el mismo que el de padres.

Reproducción: La operación de cruce consiste en la cruce LCS. En la cruce LCS se debe identificar la subsecuencia común más larga en los padres. Esta subsecuencia es heredada a ambos descendientes respetando la posición y valor de sus elementos. En la Fig. 7 se observa que ésta la cual se encuentra formada por los elementos 4,2 (en color azul). Ambos hijos mantienen las posiciones de la subsecuencia del primer y segundo padre respectivamente. El resto de las posiciones que no son ocupadas por la LCS son obtenidas desde el padre que no es usado para obtener las posiciones de la LCS respetando el orden.

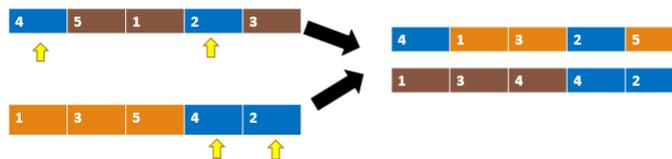


Figura 7. Tardanza Total de la población

Finalmente, los padres e hijos de los demás individuos de la población estarían representados en la Fig. 8.

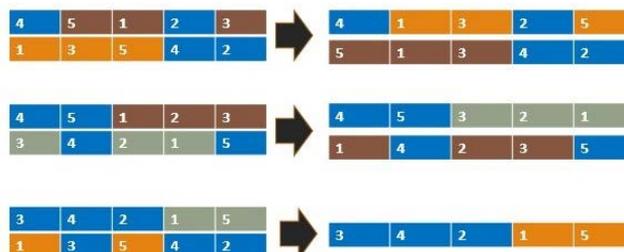


Figura 8. Padres y descendencia

Mutación: Todos los individuos tienen una probabilidad de mutación denotada al comienzo del algoritmo, el propósito de esta es brindar una mejor diversidad en las soluciones

y evitar óptimos locales. En este caso, se realiza una mutación por intercambio aleatorio de trabajos como se muestra en la Fig. 9. Cada elemento (trabajo) de cada individuo tiene la misma probabilidad de mutación. Finalmente, los descendientes generados por los operadores de cruce y mutación son ahora la población.

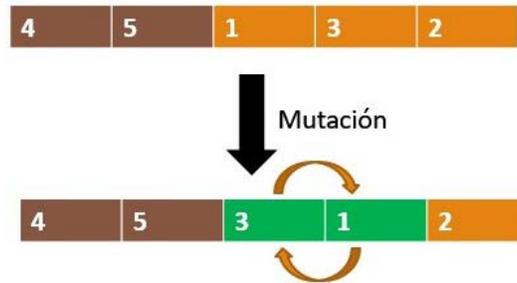


Figura 9. Mutación aleatoria por intercambio

Adaptación de la nueva población: Para finalizar, se calcula el nivel de adaptación de la nueva población y se da por terminada la primera generación. En la Fig. 10 se puede observar que los niveles de tardanza de la nueva población son ligeramente menores a la de la población anterior.



Figura 10. Tardanza de la nueva generación

En la Figura 11 se puede ver el pseudocódigo del Algoritmo Genético LCS.

Figura 11. Algoritmo Genético LCS

Require:

n : Número de individuos
 Gen : Número de generaciones
 P_C : Probabilidad de cruce
 P_M : Probabilidad de mutación

- 1: Inicializar población aleatoria (S_1, S_2, \dots, S_n)
- 2: **for** $i = 1$ to n **do** ▷ Evaluación de generación cero
- 3: $TT_i = \sum_{j=1}^n W_j \max(0, C_{j,S} - d_j)$
- 4: $AR_i = C_{max} * 1.05 - TT_i$
- 5: $IndAdapt_i = AR_i / \sum_{i=1}^n AR$
- 6: **end for**
- 7: **for** $g = 1$ to Gen **do**
- 8: **for** $j = 1$ to n , $j = j + 2$ **do**
- 9: Elige pares de padres S ponderados de acuerdo al vector $IndAdapt$
- 10: **if** $Rand \leq P_C$ **then** ▷ Operación de cruce
- 11: $Hijo_j \leftarrow Cruza(PadreAleatorio1, PadreAleatorio2)$
- 12: $Hijo_{j+1} \leftarrow Cruza(PadreAleatorio2, PadreAleatorio1)$
- 13: **end if** ▷ Generación de 2 hijos por cada par de padres
- 14: **if** $rand \leq P_M$ **then** ▷ Mutación
- 15: $Hijo_j \leftarrow Mutacion(Hijo_j)$
- 16: $Hijo_{j+1} \leftarrow Mutacion(Hijo_{j+1})$
- 17: **end if**
- 18: **end for**
- 19: $S \leftarrow Hijo$ ▷ Reemplazo de la población
- 20: **for** $i = 1, \dots, n$ **do** ▷ Evaluación de descendencia
- 21: $TT_i = \sum_{j=1}^n W_j \max(0, C_{j,S} - d_j)$
- 22: $AR_i = C_{max} * 1.05 - TT_i$
- 23: $IndAdapt_i = AR_i / \sum_{i=1}^n AR$
- 24: **end for**
- 25: **end for**
- 26: $Resultado \leftarrow \min(TT_i(S_i))$

Resultados experimentales

Para analizar el desempeño del método Earliest Due Date (EDD) contra los algoritmos Búsqueda Tabú, Recocido Simulado, Colonia de Hormigas y el Algoritmo Genético LCS; los algoritmos fueron implementados en Matlab y probados con grupos de 125 instancias con 40, 50 y 100 trabajos a procesarse. En todos los casos la función objetivo fue calculada utilizando la Ecuación 1. La Tabla 5 muestra los resultados de la suma de la tardanza total para 125 instancias de 40, 50 y 100 trabajos, para el método EDD y los algoritmos Tabú, Recocido Simulado y Algoritmo Genético LCS. Las columnas hacen referencia a la longitud del problema y las filas al método probado. Se puede observar en el Tabla 5 que el algoritmo que obtiene mejores resultados en todos los casos es el Recocido Simulado.

Tabla 5. Sumatoria de la tardanza total obtenida

Método	Tamaño		
	40	50	100
Regla EDD	9,844,923	14,546,441	55,526,076
Búsqueda Tabú	4,713,481	6,626,704	27,378,610
Recocido Simulado	4,707,229	6,618,225	27,255,816
Colonia de Hormigas	6,988,720	10,289,187	46,813,343
Algoritmo Genético LCS	5,321,432	8,250,700	49,231,803

La Tabla 6 muestra el tiempo promedio de ejecución en segundos de cada uno de los métodos para cada tamaño de problema. Las columnas hacen referencia a la longitud del problema para los conjuntos de datos, 40, 50 y 100 trabajos y las filas al método probado. En la Tabla 6 se puede observar que el Algoritmo Genético LCS es el que obtiene los tiempos de ejecución más altos, y EDD los más bajos. No obstante, el tiempo de ejecución de Recocido Simulado es intermedio y la calidad de los resultados lo justifican.

Tabla 6. Tiempo de ejecución promedio en segundos

Método	Tamaño		
	40	50	100
EDD	0.000101	0.0000318	0.0000311
Búsqueda Tabú	1.27	1.43	2.40
Recocido Simulado	3.90	4.85	7.87
Colonia de Hormigas	0.09	0.32	6.99
Algoritmo Genético LCS	30.50	34.61	123.99

Conclusiones

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 5 se puede concluir que el mejor resultado respecto a la menor Tardanza Total lo tiene el algoritmo Recocido Simulado para los tres grupos de conjuntos de datos, seguido del algoritmo Búsqueda Tabú. Ambos algoritmos metaheurísticos ofrecen resultados similares. También se puede observar que los algoritmos metaheurísticos han logrado reducir en más de un 50% la Tardanza Total respecto al valor alcanzado por la regla EDD. Respecto a los resultados mostrados en la Tabla 6 se puede ver que la regla de ordenamiento EDD tiene un tiempo de ejecución menor con respecto a los algoritmos metaheurísticos. Sin embargo, ambos algoritmos

metaheurísticos tienen tiempos de ejecución muy pequeños los cuales son prácticamente imperceptibles y si logran una gran reducción de la Tardanza Total lo cual se traduce en un gran beneficio en el entorno industrial. Por lo anterior se puede decir que los algoritmos metaheurísticos son una opción viable para dar buenas soluciones al problema de calendarización de trabajos evaluado mediante la reducción de Tardanza Total en un entorno industrial proporcionando grandes ventajas respecto a las reglas de ordenamiento. Tomando en cuenta lo anterior podemos percibir que teniendo información básica de los trabajos como lo es el tiempo de procesamiento y la fecha de entrega; y por supuesto un equipo informático con los algoritmos para optimizar la Tardanza Total podemos encontrar buenos ordenamientos en una línea de producción manufacturera.

Referencias

- [1] Amine, K. (2019). Multiobjective simulated annealing: Principles and algorithm variants. *Advances in Operations Research*, 2019.
- [2] Amiri, M., Olfat, L., & Keshavarz Ghorabae, M. (2014). Simultaneous minimization of total tardiness and waiting time variance on a single machine by genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(1), 439-446.
- [3] Amurrio, A., Azketa, E., Gutiérrez García, J. J., Aldea Rivas, M., & Parra, J. (2019). Una revisión de técnicas para la optimización del despliegue y planificación de sistemas de tiempo real distribuidos.
- [4] Bauer, A., Bullnheimer, B., Hartl, R. F., & Strauss, C. (1999). An ant colony optimization approach for the single machine total tardiness problem. In *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406) (Vol. 2, pp. 1445-1450)*. IEEE.
- [5] Bauer, A., Bullnheimer, B., Hartl, R. F., & Strauss, C. (2000). Minimizing total tardiness on a single machine using ant colony optimization. *Central European Journal of Operations Research*, 8(2), 125-141.
- [6] Beasley, J. E. (2010). Or-library. <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>.
- [7] Chou, F. D. (2009). An experienced learning genetic algorithm to solve the single machine total weighted tardiness scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3857-3865.
- [8] Du, J., & Leung, J. Y. T. (1990). Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard. *Mathematics of operations research*, 15(3), 483-495.
- [9] Erden, C., Demir, H. I., & Kökçam, A. H. (2019). Solving Integrated Process Planning, Dynamic Scheduling, and Due Date Assignment Using Metaheuristic Algorithms. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. H Nazif. A genetic algorithm for solving scheduling problem. *The journal of mathematics and computer scienc*, 5(2):91–96, 2012.
- [10] Fuentes, G. A., Gress, E. H., Mora, J. S. T., & Marín, J. M. (2016). Solución al Problema de Secuenciación de Trabajos mediante el Problema del Agente Viajero. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 13(4), 430-437.
- [11] Golberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Addion wesley*, 1989(102), 36.

- [12] Iyer, S. K., & Saxena, B. (2004). Improved genetic algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 31(4), 593-606.
- [13] Nazif, H. (2012). A genetic algorithm for solving scheduling problem. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 5(2), 91-96.
- [14] Pérez, R., Jöns, S., & Hernández, A. (2015). Solución de un problema de secuenciamiento en configuración jobshop flexible utilizando un Algoritmo de Estimación de Distribuciones. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 12(1), 49-57.
- [15] Rubio, F., & Rodríguez, I. (2019). Water-based metaheuristics: how water dynamics can help us to solve NP-hard problems. *Complexity*, 2019.
- [16] Schaller, J., & Valente, J. M. (2013). A comparison of metaheuristic procedures to schedule jobs in a permutation flow shop to minimise total earliness and tardiness. *International Journal of Production Research*, 51(3), 772-779.
- [17] Serna, L. A., & Cervigón, C. (2009). *Algoritmos evolutivos: un enfoque práctico*. Rama.
- [18] Swamidass, P. M. (2000). Priority scheduling rules. *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Springer US, Boston, MA, 527-528.
- [19] Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S., & Fu, J. (2019). Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(4), 1809-1830.

Comparative study of different dispatch rules applied to a case study

Yolincce Mireille Leal Gomez

María Magdalena Reyes Gallegos

Iván Garza Greaves

Pedro Henoc Ireta Sánchez

Héctor Coronado Reyes

Tecnológico Nacional de México/
Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Abstract — *This article discusses a case study of a Batch Processing Problem in a simple machine in a food service company where each order (job) is characterized by having different processing times as units, but the dimension is the same and the sequencing method is First Input First Output (FIFO) which results in the maximum waste of the machine capacity. To solve this problem, a comparison was made between four dispatch rules: FIFO, First Fit, Longest Processing Time with First Fit, Best Fit and Best Fit with Longest Processing Time and as the best solution metric the time it takes the last order to be processed (makespan) was applied. Finally, the results showed that the Best Fit with Longest Processing Time rule performed better than the rest of the rules.*

Keywords - batch processing problem, dispatch rules, makespan

Introduction

Manufacturing is a critical part of a country's development, the transformation of activities by companies into final products for consumers. MIPyME's (micro, small and medium enterprises) are the foundation of the Mexican economy. According to (Mendoza, 2020), 95% of the Mexican restaurant industry had to close during the quarantine of COVID -19. Sánchez & Nava, 2020, pointed out that this difficult economic situation forces companies to rethink internal processes and forecast market changes at an accelerated pace. Among the many challenges facing these restaurant companies are the optimization of resources and processes.

These processes involve the use of machinery, different types of tools, energy sources, and the use of labor, all of which are divided into a series of operations. In order for these

operations to be carried out effectively, there are production systems that allow them to be carried out efficiently. These systems are divided into production support systems, whose activities are not in direct contact with the product, but through which the planning and control of these activities is made possible, and production systems that come into direct contact with the product (Groveer, 2007).

According to (Pinedo, 2016), planning is a decision-making process regularly applied in the manufacturing and service industries, which involves the allocation of resources to tasks in specific time periods, with the objective of optimizing one or more objectives. (Ávalos Rosales, 2014) explains that among the objectives, the optimization of the makespan (time needed to leave the system with the last order), lateness (difference between completion time and delivery deadline), tardiness (maximum time to deliver the work) and earliness (time in which a certain operation ends before the estimated time and there is a penalty).

Among the existing phases in manufacturing processes is production scheduling, also known as job shop scheduling. In this scheduling phase, different elements are found such as the jobs to be processed according to the parameters to be optimized, the impact of the variables on the total cost of executing the jobs, the completion time, etc., trying to optimize the parameters by establishing an appropriate sequence (Márquez Delgado, 2012). (Pezzella, Morganti, & Ciaschetti, 2008) explained the job shop scheduling problem (JSSP) and stated that this is one of the most difficult areas. (Chaudhry & Khan, 2015) said that this type of problem is a classic problem in operations research and has been considered the hard type of combinatorial optimization with computational complexity since the 1950s, because it is a NP-Hard type problem where its solution cannot be guaranteed to be optimal.

Within scheduling there are the single-machine models; the results that can be obtained for these models not only provide information about the single-machine environment, but also form the basis for heuristics (help in solving complex problems using advanced methods) applicable to more complicated machine environments; the first to propose this type of problem were (Ikura & Gimple, 1986), who for the first time included the batch scheduling problem and proposed a model of a simple machine where all jobs are of the same size, have a constant processing time per batch, and the capacity of the machine is defined by the number of jobs processed simultaneously with different completion times.

The form of processing where the batch is considered as a group of jobs processed by the same machine at the same time is called Batch Processing Machine (BPM), (Li, 2017) also mentions that this type of production is faster. According to (Majumber, Laha, & Suganthan, 2018), depending on the capacity of the machine, each BPM can accommodate

a group of batches, and when the machine is in processing, it cannot be interrupted, and each of these batches can be identified by the following characteristics: processing time, arbitrary setup time and arbitrary batch size. The purpose of batch processing is to reduce the setup time (Niroomand, Mahmoodirad, & Molla-Alizadeh-Zavardehi, 2016).

(Li & Wang, 2018) presented the Max-Min Ant System algorithm for minimizing the processing time on a batch machine using a local method (Multiple Jobs Exchange) to improve the performance of the algorithm by adjusting the jobs between batches. The performance of the proposed MMAS algorithm is compared using a numerical experiment with CPLEX as well as with other algorithms, including the Ant Cycle Algorithm (AC), the Genetic Algorithm (GA), and two heuristics, First Fit Longest Processing Time (FFLPT) and Best Fit Longest Processing Time (BFLPT). The results show that the AC algorithm is second best compared to GA and the other two heuristics. BFLPT and FFLPT are effective in solving the problem, especially when the population size is small.

(Damodaran & Chang, 2007) proposed several heuristics and combinations of heuristics, and then compared them with the Simulated Annealing metaheuristic and a commercial solver to minimize runtime on parallel batch processing machines. The results were compared with those of (Chang, Damodaran, & Melouk, 2004). The proposed heuristic outperformed the solver in all cases. When using the simulated annealing approach, the quality of the solution improved in most of the problem cases.

(Rui, Huaping, & Xueping, 2012), proposed an ant colony optimization (ACO) heuristic and algorithm based on the presented theorems to minimize the production time at a single batching machine. The results showed that the proposed ACO algorithm could achieve better solutions with more reasonable computation time compared to the two heuristics: GA and CPLEX, especially for large job instances.

Derived from this, the main objective of this article is to optimize the resources using different dispatch rules that allow to obtain the optimal solution to the BPM (Batch Processing Machine) problem with inhomogeneous orders, which is a not known, to determine which of them can be better adapted to the case study, also, to calculate the daily demand will be performed using time series.

Finally, this article is divided into the following sections: 2) Batch processing model, 3) Heuristics, 4) Case study, 5) Methodology, 6) Results and 7) Conclusions

Batch processing machine

The problem addressed in this paper is to schedule a (simple) batch processing machine (BPM) to reduce the waiting time C_{max} . The batch processing machine can run different

jobs as a single batch with the same start and end time. At the time the batch processing cycle starts, all jobs must be ready to start, and the end time is determined by the job with the longest tardiness. Once the process has started, it cannot be interrupted to add or remove jobs until the machine has completed its work cycle. The mathematical model used by (Li & Wang, 2018) is based on the assumptions and notations they presented:

Notation:

C_{max} = makespan

j = job

J = set of jobs

C = machine capacity

b = batch

B = set of batches

$|B|$ = number of batches in B

P_j = job processing time

P^b = batch processing time

S_j = job size

$X_{jb} = \begin{cases} 1 & \text{If job } j \text{ is assigned to batch } b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

The assumptions are as follows:

We have n jobs $J = \{1, 2, \dots, n\}$ to be processed, and each (j) has a variable processing time (P_j) and size (S_j).

The capacity of the machine is represented by C .

The size of the jobs (S_j) contained in a batch must be equal to or less than C , i.e., each job j has $S_j \leq C$. Therefore, it is assumed that S_j no exceeds C and all jobs in a batch can be processed.

Before the jobs are processed, they are scheduled into batches $b \in B$ and once the batch starts its processing cycle, it cannot be interrupted to add or remove a job.

The processing time (P^b) is equal to $P^b = \max \{P_j \mid j \in b\}$.

A batch is considered open if it has at least one job assigned to it and closed if it has no job assigned to it, which is expressed as $P^b = 0$.

•The objective is to reduce the waiting time C_{max} , which is equal to the total processing time of the batches in a solution B .

Based on the above, the following mathematical model can be constructed.

$$\text{Min } C_{\max} = \sum_{b \in B} P^b \quad 1$$

Such that

$$\sum_{b \in B} X_{jb} = 1 \quad \forall j \in J \quad 2$$

$$\sum_{j=1}^n S_j \cdot X_{jb} \leq C \quad \forall b \in B \quad 3$$

$$P^b \geq P_j X_{jb} \quad \forall j \in J, b \in B \quad 4$$

$$X_{jb} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, b \in B \quad 5$$

$$\left\lfloor \frac{\sum_{j=1}^n S_j}{c} \right\rfloor \leq |B| \leq n \quad |B| \in \mathbb{Z}^+ \quad 6$$

The objective is to (1) minimize the makespan. Considering only a single processing machine. The total processing time is equal to the total time taken by the batches created. The first condition (2) states that each of the jobs can be assigned to a batch. The second condition (3) states that the total size of the jobs in a batch is not greater than the capacity of the C machine. The third condition (4) states that the processing time of each batch is determined by the job with the longest time in the batch. The fourth condition (5) explains the binary variable X_{jb} , which is equal to 1 if the job is assigned to batch B and 0 otherwise. The fifth condition (6) assigns both an upper bound (when each batch accommodates only one job) and a lower bound (assuming that jobs are partially processed in batches) to the number of batches B.

Heuristics

Dispatching rules allow a priority order or sequence to be set for a set of jobs; this allows these jobs to be grouped into batches to create a schedule for them to reduce waiting time. Previous studies on the use of dispatching rules (Coffman Jr., Garey, & Johnson, 1984), (Falkenauer & Delchambre, 1992), (Falkenauer, 1996), (Fleszar & Hindi, 2002) and (Fleszar & Charalambous, 2011) and those that have specifically addressed the case of a single machine (Ghazvini & Dupont, 1998), (Melouk, , Damodaran, & Chang, 2004), (Damodaran, Kumar Manjeshwar, & Srihari, 2006) and (Damodaran & Chang, Heuristics to minimize makespan of parallel batch processing machines, 2007) have shown satisfactory results for BPM.

(Simichi-Levi D, 1998): created the First Fit heuristic for batch grouping by performing the following steps:

1. Run a random sequence of all jobs
2. Select the job that is first in the list and place it in the first batch (which must have enough space to perform the fit).

- a. If the job does not fit in the current batch, a new batch is created.
 3. Repeat step 2 until all jobs are assigned to a batch.
- (Simichi-Levi D, 1998): also developed the Best Fit heuristic for batch clustering by performing the following steps:
1. Perform a random sequence of all jobs.
 2. Select the first job in the list and place it in the batch with the least busy (or fullest).
 - a. If the job does not fit in any existing batch, a new batch will be created.

3. Repeat step 2 until all jobs are assigned to a batch.

Among the rules mentioned by (Kaban, Othman, & Rohmah, 2012), we can find the Longest Processing Time, which is usually used to minimize the makespan for parallel machines. (Uzsoy, 1994): proposed the First Fit Longest Processing Time heuristic by specifying the following steps:

1. Sort the jobs in descending order by processing time.
2. Select the job that is first in the list and place it in the first batch (which must have enough space to perform the fit).
 - a. If the job does not fit in the current batch, a new batch is created.

3. Repeat step 2 until all jobs are assigned to a batch.

(Ghazvini & Dupont, , 1998): used the Best Fit Longest Processing Time heuristic by specifying the following steps:

1. Sort the jobs in descending order by processing time.
2. Select the job at the top of the list and place it in a batch that is feasible with the smallest remaining capacity (without favoring the batch with the lowest rate).
 - a. If the job does not fit into an existing batch, a new batch is created.

3. Repeat step 2 until all jobs are assigned to a batch.

Damodaran et al, explained that the order of order scheduling must be done carefully if we want to minimize waiting time, i.e., the order and scheduling of batches is important. In batch creation, each batch can be treated as a job and heuristics can be applied for scheduling

Study case and methodology

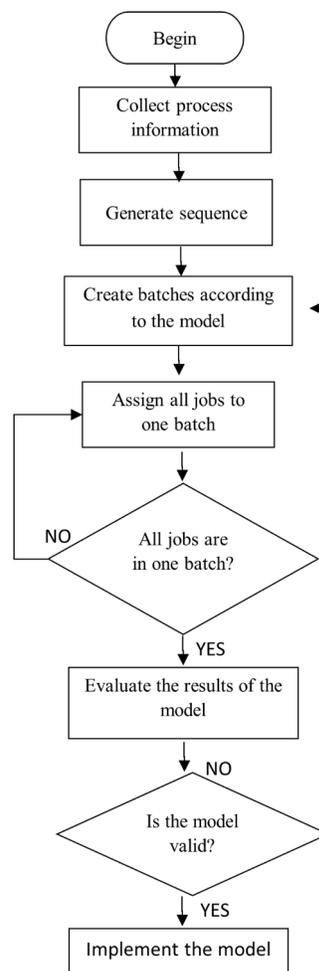
Micro, small and medium enterprises (MIPyMES) are the foundation of the Mexican economy, as shown by data from recent years, and have an impact on job creation and national production. For this reason, the case study was conducted in a microenterprise of food production. The problem arises in the production area because there is only one oven with limited capacity and the restriction that once started cannot be interrupted to add or remo-

ve a product. These products have different processing times, and the dispatch method is First In First Out (FIFO), which leads to a waste of the maximum capacity of the machine and long waiting times.

The following methodology was used to solve the problem presented in the case study:

1. Collect the information about the production process, focusing on the size of each job and the total processing time.
2. Generate the sequence (according to the heuristics we work with).
3. Create the batches using the implemented model.
4. Assign all the jobs to a batch.
5. Check if all jobs are assigned to a batch.
6. Evaluate the results of the implemented model by comparing them.
7. Select the best option.
8. Implement the model with the best solution.

Figure 1. Methodology applied to solve the case study problem



Information Collected

Information was collected randomly in different months, using as main data the days when demand exceeded the capacity of the facility. There are 7 inhomogeneous jobs with a stochastic demand and a maximum machine capacity of 21 jobs. In Table 1, we can see that row one contains the assigned job number, row two contains the processing time required for each job, and rows three through eleven show the size of production demand for each hour of a work shift.

Table 1. Production Scheduling

J	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7
Pj	25	23	27	25	25	23	23
sj	3	10	6	7	5	6	9
	4	13	10	9	5	6	10
	5	16	8	9	10	13	15
	10	10	9	13	11	14	15
	8	14	11	10	7	10	14
	4	12	13	11	8	13	12
	8	15	10	7	5	12	9
	6	12	8	7	5	2	9
	4	8	6	5	4	4	7

In the table 1 the row six shows the highest production time of the day used to develop the models of the heuristics presented.

Table 2. Selection of the highest demand

J	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7
Pj	25	23	27	26	25	22	23
sj	10	10	9	13	11	14	15

To elaborate this type of demand, the First In First Out method (FIFO) was applied, and the batch model was created as follows):

Table 3. First In First Out methodology

FIFO	jobs in the machine	Processing time	Machine capacity
1	4	26	13
2	3	27	9
3	5	25	11
4	7	23	15
5	6	22	14
6	1	25	10
7	2	23	10

Heuristic model implementation (dispatching rules)

First Fit (FF). This heuristic keeps all batches open in the order they were started. It tries to fit each new element into the first batch in which it fits. If there is a partially filled batch and the element does not fit in, it is moved to the next immediate batch. After the steps explained earlier, the following table emerges:

Step 1: Create a random sequence using a random number generator platform that produced the following results:

Table 4. Random numbers generated by a platform

1	7	5	4	6	3	2
---	---	---	---	---	---	---

Step 2: Select the job that is first in the list and enter it into the first batch and do this with each job until they are all assigned to a batch.

Table 5. First Fit Model

Batch #	jobs in the batch	Pb	Machine capacity
1	1	25	10
2	7	23	15
3	5	25	11
4	4	26	13
5	6	22	14
6	3,2	27	19

Best Fit (BF). All lots are kept open, but an attempt is made to place each new element in the location where the maximum capacity of the lot can be reached. Following the steps explained earlier resulted in the following:

Step 1. Create a random sequence using a random number generator platform that produced the following results:

Table 6. Random numbers generated by a platform

2	7	3	1	5	6	4
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Step 2. Select the job that is first in the list and enter it into the immediate batch with the lowest capacity. Do this with each job until they are all assigned to one batch.

Table 7. Best Fit model

Batch #	jobs in the batch	Pb	Machine capacity
1	2	23	10
2	7	23	15
3	3, 1	27	19
4	5	25	11
5	6	22	14
6	4	26	13

First Fit Longest Processing Time (FFLPT). This heuristic is like the one explained in Table 4, with the difference that in the first step the sequence is created descending by the longest processing time (LPT) of each job. After the previously explained steps, the following table emerges:

Step 1. Create a sequence in descending order by processing time, resulting in the following:

Table 8. Sequence in descending order

3	4	1	5	2	7	6
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Step 2. Select the job that is first in the list and enter it into the first batch. Proceed in the same way with each additional job until they are all assigned to a batch.

Table 9. First Fit Longest Processing Time model

Batch #	jobs in the batch	Pb	Machine capacity
1	3	27	9
2	4	26	13
3	1,5	25	21
4	2	23	10
5	7	23	15
6	6	22	14

Best Fit Longest Processing Time - Best Fit Longest Processing Time (BFLPT). This heuristic is like the one explained in Table 6, except that in step one, the sequence is created in descending order of the Longest Processing Time (LPT) of each job. After the previously explained steps, the following table emerges:

Step 1. Create a sequence in descending order by processing time, resulting in the following:

Table 10. Sequence in descending order

3	4	1	5	2	7	6
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Step 2. Select the job at the top of the list and place it in a feasible batch with the smallest remaining capacity and do this with each job until all are assigned to one batch.

Table 11. Best Fit Longest Processing Time model

Batch #	jobs in the batch	Pb	Machine capacity
1	3,1	27	19
2	4	26	13
3	5,2	25	21
4	7	23	15
5	6	22	14

The comparison of these dispatch rules was performed in a spreadsheet belonging to Microsoft Office 365 software on an HP Pavilion laptop with AMD Ryzen 3 processor and 64-bit operating system running Windows 10 Home Single Language.

Results

According to the results of the four models performed, when are compared, it can be stated that the Best Fit Longest Processing Time (BFLPT) heuristic gives the best results. It has the lowest number of batches and the lowest total processing time.

Table 12. Total Processing Time of the individual model

Disp. Rule	FIFO	FF	BF	FFLPT	BFLPT
Number of lots	7	6	6	6	5
Total Processing Time for each model	171 minutes	148 minutes	146 minutes	146 minutes	123 minutes

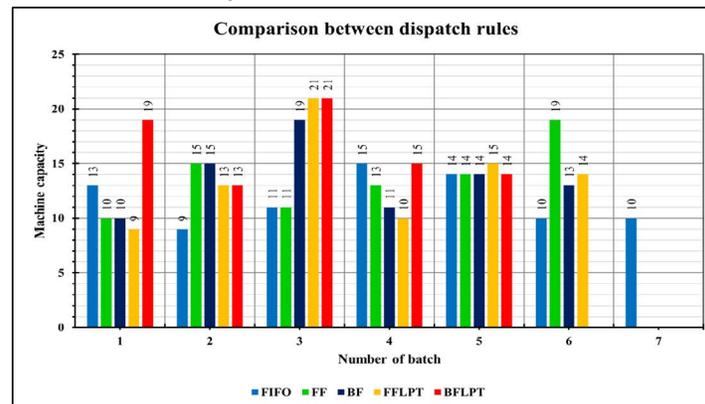
In Table 13, we see that the simple implementation of heuristic models (dispatching rules) alone is a significant improvement over FIFO.

Table 13. Comparison of the models

Improving over FIFO	FF	BF	FFLPT	BFLPT
	-23 minutes (13.45%)	-25 minutes (14.62%)	-25 minutes (14.62%)	-48 minutes (28.07%)

In Fig. 2 we can observe the behavior of the different models in terms of the machine capacity they have in the batches created. We can see that the heuristic Best Fit Longest Processing Time (BFLPT) has better moments of maximum capacity.

Figure 3. Comparison between dispatch rules



Conclusions and future work

The use of heuristics provides a simple and accessible solution to cases such as the one presented, showing favorable results for the microenterprise. When using these dispatch heuristics and comparing them to FIFO, a significant improvement can be observed, even for the heuristic that did not achieve the best result compared to FIFO, a minimal improvement can be observed. Best Fit Longest Processing Time (BFLPT) showed The best optimization of resources compared with the other heuristics and with the traditional method FIFO.

For future work, it is suggested to compare these dispatch heuristics with metaheuristic models such as Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Ant Colony, Tabu Search, and others to explore the whole solution space and find a solution that is close to the optimum.

Acknowledge

We would like to thank to Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria for providing its facilities and to CONACYT for the scholarship received

References

- Ávalos Rosales, O. (2014). Tesis doctoral: "Secuenciación en máquinas paralelas no relacionadas con tiempos de preparación y tareas de mantenimiento preventivo".
- Chang, P.-Y., Damodaran, P., & Melouk, S. (2004). Minimizing makespan on parallel batch processing machines. *International Journal of Production Research*, 42.
- Chaudhry , I. A., & Khan, A. A. (2015). A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques. 23(3).

- Coffman Jr., E. G., Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1984). Approximation Algorithms for Bin-Packing — An Updated Survey. *Algorithm Design for Computer System Design*, 284, 49-106.
- Damodaran, P., & Chang, P.-Y. (2007). Heuristics to minimize makespan of parallel batch processing machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 1005–1013.
- Damodaran, P., & Chang, P.-Y. (2008). Heuristic to minimize makespan of parallel batch processing machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 1005-1013.
- Damodaran, P., Kumar Manjeshwar, P., & Srihari, K. (2006). Minimizing makespan on a batch-processing machine with non-identical job sizes using genetic algorithms. *International Journal of Production Economics*, 103, 882–891. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.02.010>.
- Falkenauer, E. (1996). A hybrid grouping genetic algorithm for bin packing . *Journal of Heuristics*, 5-30.
- Falkenauer, E., & Delchambre, A. (1992). A genetic algorithm for bin packing problem and line balancing. *IEEE International Conference*, 1186-1192.
- Fleszar, K., & Hindi, K. (2002). New heuristics for one-dimensional bin-packing . *Computers and Operations Research*, 821-839.
- Fleszar, K., & Charalambous, C. (2011). Average-weight-controlled bin oriented heuristics for one-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research*, 176-184.
- Ghazvini, F. J., & Dupont, L. (1998). Minimizing mean flow times criteria on a single batch processing machine with non-identical jobs sizes. *International Journal of Production Economics*, 55, 273-280.
- Ghazvini, F. J., & Dupont, L. (1998). Minimizing the makespan on a batch machine with non-identical job sizes. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 273-280. doi:10.1016/S0305-0548(00)00078-2
- Groveer, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. CDMX: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.
- Ikura, Y., & Gimple, M. (1986). Efficient scheduling algorithms for a single batch processing machine. *Operations Research Letters*, 5(2), 61-65.
- Kaban, A. K., Othman, Z., & Rohmah, D. S. (2012). Comparison of dispatching rules in job-shop scheduling problem using simulation: case of study. *International Journal of Simulation Modelling*, 3, 129-140. doi:10.2507/IJSIMM11(3)2.201
- Li, S. (2017). Parallel batch scheduling with nested processing set restrictions.
- Li, X., & Wang, Y. (2018). Scheduling Batch Processing Machine Using MAX-MIN Ant System Algorithm Improved by Local Search Method. *Hindawi-Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-10. doi:10.1155/2018/3124182
- Majumber, A., Laha, D., & Suganthan, P. (2018). A hybrid cuckoo search algorithm in parallel batch processing machines with unequal job ready times. (124).
- Márquez Delgado, J. E. (2012). *Optimización de la Producción (scheduling) en Talleres de Mecanizado (Doctorado)*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Melouk, S., Damodaran, P., & Chang, P.-Y. (2004). Minimizing makespan for single machine batch processing with non-identical job sizes using simulated annealing. *International Journal of Production Economics*, 141-147.

- Mendoza, V. (6 de mayo de 2020). 95% de restaurantes han cerrado por Covid-19; sector pierde 50,000 mdp. Forbes México.
- Niroomand, S., Mahmoodirad, A., & Molla-Alizadeh-Zavardehi, S. (2016). Single Batch-Processing Machine Scheduling Problem with Fuzzy Due-Dates: Mathematical Model and Metaheuristic Approaches.
- Pezzella, F., Morganti, G., & Ciaschetti, G. (2008). A genetic algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem.
- Pinedo, M. L. (2016). Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Fifth Edition. New York: Springer.
- Rui, X., Huaping, C., & Xueping, L. (2012). Makespan minimization on single batch-processing machine via ant colony optimization. Computers & Operations Research, 39(3), 582-593.
- Sánchez, A., & Nava, R. M. (2020). Perspectiva de las PYMES Restauranteras en el escenario actual de la crisis del COVID 19. 3C Empresa. Investigación y pensamiento crítico. Edición especial COVID-19: Empresa Chine y Geopolítica., págs. 129-147.
- Simichi-Levi D, B. J. (1998). The logic of logistic: theory, algorithms, and aplicaciones for logistic managment. Berlin: Series in operations research, Springer.
- Uzsoy, R. (1994). Scheduling a single batch processing machine with non identical job sizes. International Journal of Production Research, 32, 1615-1635.

5S como estrategia de gestión logística en las micro y pequeñas empresas del sur de Sinaloa

María Guadalupe Velarde Rodríguez
Universidad Politécnica de Sinaloa

Resumen— *Lean manufacturing es una filosofía japonesa, cuyo propósito es eliminar o reducir las actividades que no agregan valor y que impiden un aprovechamiento máximo de los recursos empresariales. Generalmente, es empleada con gran éxito en empresas de tamaño mediano a grande y en el giro industrial. El objetivo de la investigación fue demostrar los beneficios de la metodología 5S como parte de las herramientas lean en la gestión logística de las micro y pequeñas empresas en el sur de Sinaloa. Para ello, se recopiló y analizó información científica para proporcionar argumentos válidos que promuevan la incorporación de la metodología 5S en la gestión de este tipo de negocios, a nivel nacional e internacional. Al no encontrarse casos locales divulgados, se realizó una investigación de campo mediante la habilitación de estudiantes de la licenciatura en Administración y Gestión Empresarial de PYMEs, como semilleros de la implementación en 30 negocios. Mediante un muestreo por conveniencia se aplicaron los pasos de la metodología alineados al estándar de la red Conocer EC0491. Dentro de las ventajas encontradas están: mejora en el control de los procesos administrativos, planeación y organización; optimización de los recursos, mejora en los tiempos de atención e imagen con el cliente, así como la oportunidad de vincularse con los grupos de interés con los que tiene relación, tal como gobierno, quien a través de convocatorias incentiva la mejora continua y el desarrollo económico. Para el sostenimiento de las mejoras es necesario: capacitar a todo el personal, integrar un equipo de mejora continua y buscar la vinculación con las universidades para recibir apoyos de gestoría. Como trabajo futuro, se desarrollará una propuesta de programa estatal que pueda incentivar con mayor velocidad la implementación de la metodología 5S en este tipo de negocios.*

Palabras Clave— Herramientas lean manufacturing, 5'S, estrategia logística, micros y pequeñas empresas.

Introducción

322

Las micro empresas son establecimientos que realizan actividades de manufactura, comercio y servicios privados no financieros, con personal ocupado de 1 a 10 personas y

las pequeñas empresas cuentan con personal ocupado mayor de 10 y menor a 100 personas INEGI (2021). De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el censo del año 2020, relacionado al Estudio sobre la Demografía de los Negocios (EDN), 3.9 millones de establecimientos sobrevivieron del tipo micro, pequeño y mediano (MIPYMEs). En relación a ello, Sinaloa es la tercera entidad federativa con mayor proporción de muertes de establecimientos formales e informales con respecto al total de establecimientos del año 2019. De acuerdo al Secretario de Economía Estatal, Javier Gaxiola, afirma que poco menos del 50% de las actividades económicas del Estado son informales (Torres, 2022). Por lo que, considera importante la formalización para que las pequeñas empresas puedan recibir créditos, apoyos fiscales y asesorías en distintos ámbitos, con ello, tengan mayor probabilidad de sobrevivir, ante la presión que representa el competir con las grandes empresas. En este contexto, es vital incentivar la mejora continua que pueda brindar una ventaja competitiva, ya que, sin importar el tamaño, las micro, pequeñas y medianas empresas, en su mayoría no cuentan con conocimientos administrativos básicos, lo que representa un riesgo en su sostenimiento a largo plazo (Cruz et al, 2016).

De acuerdo a Cruz et al (2016), las PYMEs presentan las siguientes limitantes: les cuesta trabajo conseguir proveedores comprometidos, les cuesta trabajo conseguir clientes, se inclinan por contratar personal no calificado, no realizan estudios previos de mercado, carecen de estrategias de gestión de clientes, mala o falta de planeación, problemas de ineficiencia en producción e inventarios.

Por otra parte, las micro y pequeñas empresas (MIPEs), enfrentan alta complejidad para poder crecer y ser generadoras de empleos, la mayoría son operadas por familiares, el 30% de estas empresas enfrentan problemas por remunerar de acuerdo al parentesco y no por las funciones realizadas (Vargas, 2012). Incurriendo en grandes problemas, en orden de importancia: excesivos gastos personales, falta de toma de decisiones y mala delegación de responsabilidades, falta de planeación estratégica, problemas de ineficiencia de producción e inventarios, entre otros (Cruz et al, 2016)

Asimismo, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), hace referencia que las MIPe's enfrentan un problema común, la falta de innovación, ocasionado por el desconocimiento del mercado, del producto, de los insumos, de los clientes, proveedores y competidores, y de habilidades para relacionarse con el mercado. La innovación puede aportar una ventaja competitiva a las empresas, puesto que, la competitividad se asocia con la capacidad que tienen las empresas para colocarse en una posición superior a sus competidores, es el resultado de un conjunto de estrategias alineadas en todos los niveles de decisión y del esfuerzo continuo de los actores clave de la empresa (OCDE, 2018).

Por otro lado, la gestión logística se encarga de planificar, ejecutar y coordinar de manera integral el flujo de materiales o insumos, de productos y de información (Ballou, 2004); de forma eficaz, eficiente y efectiva. Dentro de esta gestión se encuentran aspectos clave para brindar competitividad a las empresas micros y pequeñas; tales como: la relación con los proveedores, con los clientes y la relación interna (Chopra y Meindl, 2008).

La gestión logística en las MIPES puede impactar en una mejor distribución de los recursos y en una profesionalización de los tomadores de decisiones. Un camino, es a través del uso de herramientas que fortalezcan el pensamiento lean; es decir, la reducción o eliminación de las actividades que no agregan valor. En este sentido, la implementación de la metodología 5´S, considerada como pilar del lean manufacturing, puede aportar grandes beneficios a la gestión, entre los que destacan: un conocimiento profundo de su proceso y del tipo de servicio que ofrecen, la clasificación y eliminación de innecesarios, la estandarización de procesos, la detección de las variables de control y, el incremento de la productividad.

Objetivo

El presente trabajo persigue como objetivo principal el demostrar los beneficios de la metodología 5S como parte de las herramientas lean en la gestión logística de las micro y pequeñas empresas en el sur de Sinaloa. Para ello, se recopiló, organizó y analizó información científica para proporcionar argumentos válidos que promuevan la incorporación de la metodología 5S en la gestión de este tipo de negocios. De igual forma presentar casos de éxito en la región inmersa, que puedan servir como antecedentes para la elaboración de un Programa de Desarrollo Económico Estatal, basado en la implementación de la metodología 5´S.

Revisión de literatura

Las PYMEs son un componente esencial en las regiones porque impactan fuertemente en el aspecto social y económico, puesto que, a través de ellas, se generan empleos, ingresos, bienes y servicios a millones de familias. Un desafío que enfrentan es el incremento de la productividad, que les permita ser más competitivas y cerrar la brecha con ciertas regiones dinámicas como Asia. Se dice que: “América Latina tiene muchas PYMEs pero de baja productividad” (OCDE, 2019).

En México, de acuerdo a la definición oficial, basada en el empleo y en el volumen de negocios anuales, las PYMEs representan el 76% del total de empleo generado, donde las empresas del tipo micro y pequeñas aportan el 67%, sin embargo, contribuyen al 32% del valor agregado. El valor agregado por trabajador en las microempresas es 7% y de las pequeñas empresas el 21 % del valor generado en las grandes empresas. En cuanto

al tipo de actividad que realizan las empresas, se tiene que, para las micro, domina el sector servicio, especialmente alojamiento, comida y servicios sociales. Las pequeñas empresas destacan en el área de salud y educación. Las medianas empresas abarcan el sector de la construcción y las grandes empresas sobresalen en la manufactura, el sector inmobiliario y los servicios empresariales (OCDE, 2019).

Asimismo, en México, la relación entre productividad y habilidades empresariales es alta. De acuerdo al último censo, las microempresas son 2.3 veces menos productivas que las empresas pequeñas, 2.8 menos que las medianas y 3.5 veces menos que las empresas grandes. Por ello, la urgencia de implementar estrategias empresariales, enfocadas en combatir la falta de habilidades empresariales, capacitaciones y otros factores que afectan la productividad (DOF, 2020).

En la actualidad, el común denominador para todo tipo de empresas es la maximización de los recursos conjugando la satisfacción total del cliente. Ya que, el cliente se inclina hacia los productos o servicios que superan su función básica, es decir, aquel valor agregado que puedan aportarle, sin necesidad de pagar más.

De acuerdo a Ríos et al (2012), las PYMEs, cada vez más, adoptan sistemas logísticos eficientes orientados a satisfacer las necesidades de sus clientes, con la intención de ganar su fidelidad. Sin embargo, el factor costo se convierte en un gran problema, al tener que buscar un equilibrio entre la satisfacción de los clientes y la utilidad que genere la venta del producto o del servicio.

Diversos autores hablan sobre las propuestas de modelos de gestión logística para aumentar la competitividad de las empresas; sin embargo, dado a la falta de una estructura estable administrativa y operativa para una MIPE resultan muy ambiciosos e inalcanzables (Cano et al, 2015). Tal como, González et al (2012), quienes presentan una metodología de gestión logística para la mejora de pequeñas empresas y señalan cinco áreas de oportunidad: abastecimiento, almacenamiento, distribución, costos y servicio al cliente. Se proponen herramientas para mitigar las áreas de oportunidad, con impacto positivo en los costos logísticos, sin embargo, se realiza de manera aislada, no integrada (González et al, 2012).

La gestión logística conjuga variables e indicadores de control en toda la cadena y en todas las actividades administrativas, desde la planeación hasta la post venta del bien o del servicio. Asimismo, la incorporación de herramientas de mejora continua que permitan detectar oportunamente áreas de oportunidad, sobre todo en: rendimiento, productividad y satisfacción de los clientes.

Sin duda, una filosofía de trabajo de clase mundial que aporta herramientas de mejora continua es el lean manufacturing. De forma incluyente, porque pueden ser adoptada por cualquier tipo de empresas y sencilla porque puede implementarse gradualmente. Dicha metodología de origen japonesa, se fundamenta en el sistema de producción Toyota, cuyos objetivos principales se centran en la eliminación del desperdicio y la creación de valor, es decir, un pensamiento esbelto (Mantilla y Sánchez, 2012; Sanz y Gisbert, 2017). Para ello, es necesario conocer a detalle las actividades de transformación y las de flujo, con la intención de ser objetivos en el análisis de valor. Dentro de las múltiples ventajas que el pensamiento esbelto aporta, se encuentran: la reducción en los tiempos de entrega, con ello, un impacto directo en el servicio al cliente; la optimización de los niveles de inventario, la reducción de desperdicios, la reducción de costos, de mermas y reprocesos (Velarde et al, 2020).

De acuerdo a Velarde et al (2020), la metodología 5´S está fundamentada en el pensamiento esbelto, ampliamente aplicada para el control logístico de las operaciones de cualquier tipo de empresa. Se le conoce como 5´S por sus siglas en japonés, Seiri, Seiton, Seison Seiketsu y Shitsuke, que al español se traducen como: separar innecesarios, organizar, limpiar, estandarizar y mantener las mejoras. La metodología es reconocida por impactar positivamente en la productividad laboral (Ortiz et al, 2017).

Para el desarrollo de esta metodología es necesario definir el alcance y objetivo de implementarla. La mayoría de las empresas la implementan para mejorar la organización y control de los necesarios, para identificar los innecesarios y eliminarlos de los procesos, así como una forma de estandarizar métodos de trabajos. Otras empresas, más maduras, su enfoque se extiende hacia la proactividad laboral, es decir, el deseo del personal de aportar ideas de mejora.

Por tanto, el siguiente paso será, formar un equipo de trabajo, ya que se debe involucrar al personal quienes son los responsables de los procesos, los que conocen lo necesario y no para desempeñar una labor. Una vez formado el equipo, se debe realizar un mapeo del proceso a mejorar.

Simultáneamente, se debe capacitar al personal sobre las bondades de la metodología 5´S. La capacitación es un factor que influye directamente en la mejora de los procesos y en el desempeño laboral. Lo que significa que mientras más formado esté el personal que integra las empresas, mayores posibilidades tendrá para adaptarse a los cambios que el mercado demanda (Cotera et al, 2019).

Seguido a ello, se debe realizar un inventario de todos los artículos y bienes que se encuentren en el área, después, definir la política de la empresa para la discriminación de

innecesarios. Un innecesario es todo artículo, equipo, producto o máquina que no es indispensable para realizar una labor. Posterior a ello, se identifican los innecesarios a través de la técnica de la tarjeta roja. Esta actividad define la implementación de la primera S.

La segunda S se enfoca en el orden y organización, partiendo del hecho que debe existir un lugar para artículo y que cada artículo debe estar en su lugar, esto contribuye a la administración visual y control de inventarios. En este apartado se recomienda utilizar la técnica de clasificación de inventarios A, B, C, basada en el principio de Pareto. El criterio que se siguió fue la rotación de los artículos (Velarde et al, 2020; Mora, 2012).

La tercera S se enfoca en definir un método de control que garantice la limpieza del área o establecimiento, en este sentido se definen roles, programas de limpieza y bitácoras de análisis causa raíz sobre la recurrencia de la suciedad. La cuarta S se encarga de la estandarización, donde se elaboran formalmente los procedimientos para que las tareas sean consistentes, además, se emplean controles visuales para facilitar la ejecución de las mismas. La quinta S se encarga de mantener las mejoras logradas. En este sentido se establece un programa de indicadores de control y un programa de auditorías periódicas. Tal como se mencionó, una de las áreas de oportunidad en la MIPYMEs, es la falta de conocimientos administrativos básicos, en este sentido, las 5'S abraza la oportunidad de que dichas empresas puedan planear y organizar inventarios, a través de la segunda S enfocada en la organización de los artículos y bienes del área de mejora, también, la necesidad de cuidar la imagen de la marca ante el cliente con ayuda de hábitos de limpieza y bitácoras de recurrencia de la suciedad. De igual forma, las MIPYMEs, en su mayoría, carecen de métodos de trabajo estandarizados. En este sentido, las 5'S puede aportar un método de control visual que facilite la dirección y control de las operaciones. Un aspecto relevante de mencionar es que la metodología 5'S, a través de su etapa de disciplina, obliga a que las empresas implementen programas de auditorías de revisión. Las auditorías son consideradas un medio eficaz para detectar áreas de oportunidad, de forma integral, no solo lo relacionado a los criterios de organización y limpieza. Los eventos kaizen, conocidos como pequeños cambios para mejorar, también, son indispensables para mantener las mejoras, a través de las iniciativas del personal (Ortiz et al, 2017).

A nivel internacional se describen casos exitosos; por ejemplo: el estudio en Cundinamarca, Colombia, aplicado al sector textil. Donde el 23% de las PYMEs afirmaron haber implementado 5'S en sus procesos (Sarmiento et al, 2019). Aunque es un porcentaje bajo, el estudio afirma que las pymes encuestadas tienen claro la necesidad de controlar las variables de sus procesos productivos, de administrar de forma óptima sus recursos y generar valor.

En México la información es muy limitada, se puede mencionar el caso de aplicación de lean manufacturing en una microempresa dedicada a la producción de obleas. Donde, a través de las 5'S, lograron detallar los elementos necesarios para la producción de obleas, la organización específica de los utensilios, el establecimiento de roles de limpieza operativa, la definición formal del proceso de elaboración de obleas, uso de controles visuales para disminuir las distancias, reducción de mermas, entre otras. Todas ellas, impactaron en un aumento de la productividad del 53% (Ortiz et al, 2017). Cabe mencionar que, la capacitación del personal y el compromiso de los propietarios fue crucial para lograr las mejoras.

Contrariamente, Bermúdez (citado por Cotera et al, 2019), menciona en su estudio que el 48 % del personal que labora en las PYMEs nunca recibe algún tipo de capacitación, debido a que los empresarios consideran que los empleados pueden aprender a través de la práctica cotidiana.

Por otra parte, analizando el potencial de las PYMEs, este es reconocido y apoyado con distintos programas específicos. De acuerdo a Castillo et al (2021), algunas organizaciones que trabajan en ello son: El Banco Mundial (BM), la Oficina Internacional del Trabajo (OIT) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Asimismo, en México, diversos programas han incentivado la productividad y competitividad de las PYME's, el Plan Nacional de Desarrollo (PND, 2013-2018), a través del Programa de Desarrollo Innovador (PRODEINN), responsable de guiar las acciones de la Secretaría de Economía. De igual forma, el PND (2019-2024), vigente, a través del Programa Especial Para la Productividad y Competitividad (PEPC) "Establece los objetivos y estrategias para incrementar la productividad y competitividad del país, atendiendo las principales barreras y el crecimiento económico" (Castillo et al, 2021).

En Sinaloa, la Secretaría de Economía (SE, 2012), estableció el Programa de Competitividad en Logística y Centrales de Abasto (Prologyca), que tuvo como objetivo generar y promover el desarrollo en el sector abasto, a través del otorgamiento de apoyos a las empresas. El objetivo fue modernizar los mercados públicos, con el fin de mejorar tiempos, calidad y accesibilidad a los productos en Sinaloa, para lo cual se asignaron, 24 millones 360 mil pesos.

Recientemente, el PED de Sinaloa (2021-2027), informa que las MIPYMEs sinaloenses enfrentan grandes problemas para su sobrevivencia y para su desarrollo, una de las razones es la falta de capacitación, estructuras débiles, dificultades para acceso al financiamiento y alta inseguridad. En este sentido, la metodología 5'S puede fortalecerlas a través de capacitación integral, centrada en la eliminación de innecesarios, en la organi-

zación, orden, limpieza y estandarización de procesos, que impacten positivamente en el control de los recursos y en la imagen con el cliente. Lo anterior, se alinea al marco estratégico 3. Política de impulso al desarrollo comercial y competitivo de las MIPYMEs y los emprendedores, objetivo 3.1 Impulsar el desarrollo inclusivo y sostenible a través de mecanismos y herramientas que permitan elevar la competitividad y productividad de las MIPYMEs. Estrategia 3.1 Fortalecer y mejorar la eficiencia productiva de las MIPYMEs del estado, con línea de acción 3.1.1.1 Ofrecer capacitaciones y talleres que fomenten la cultura empresarial y el desarrollo competitivo (PED Sinaloa, 2022).

Metodología

De acuerdo a Hernández et al (2014), se utilizó un enfoque cualitativo, con diseño del tipo descriptivo y exploratorio, mediante la revisión documental y la técnica de análisis de caso. El objetivo fue demostrar las ventajas de la metodología 5'S en la gestión logística de las micro y pequeñas empresas. Para ello, se realizó una búsqueda en fuentes digitales como scopus, Dialnet y scielo. La información disponible, en su mayoría, está referenciada a casos internacionales y poca a casos nacionales. Al no encontrarse casos divulgados en el sur de Sinaloa, surgió la necesidad de realizar trabajo de campo. Con la intención de que el estudio tuviera validez, la metodología 5S seguida, se alineó al estándar de competencia EC0491 (Red Conocer, 2022), por contar con personal certificado en la Universidad.

De acuerdo a DENU (2021), en Mazatlán, Sinaloa, se tienen registrados 21,605 negocios del tipo micro y pequeño. Sin embargo, debido a que la investigación se realizó en período limitado por la pandemia de Covid-19 durante los años 2020 y 2021, se siguió un muestreo no probabilístico. Atendiendo las medidas de seguridad sanitarias por la Secretaría de Salud del Estado de Sinaloa.

Para ello, se capacitó a los alumnos de la Licenciatura en Administración y Gestión Empresarial, como semilleros en la implementación de las 5'S en las MIPEs del sur de Sinaloa. Posteriormente, los alumnos buscaron una empresa y formalizaron con los propietarios la implementación de manera presencial; después, capacitaron al propietario en la metodología 5S y los acompañaron en la implementación de cada fase. Simultáneamente, con un check list se validó cada elemento de las fases y se elaboró una base de datos para procesar la información y las ventajas aportadas a los negocios (Ver figura 1).

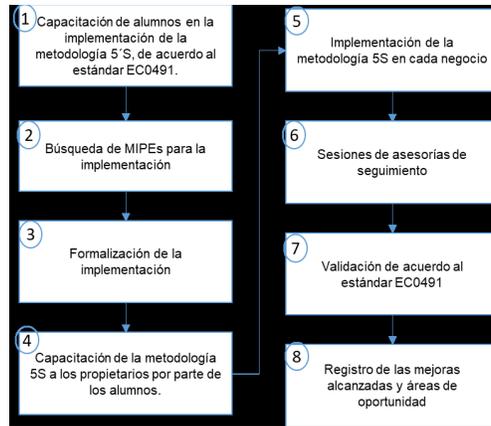


Figura 1. Proceso de implementación 5´S en MIPES
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2, se muestran las variables registradas de cada empresa, las cuales están basadas en los puntos del estándar EC0491. La primera S se cubre a través de las variables 1 a la 5, la segunda S, con las variables 6 y 7, la tercera S con las variables 8, 9 y 10, la cuarta S con las variables 11 y 12 y la quinta S con las variables 13 a la 16.

Check list para validación de la implementación de 5´S								
Variable 1		Variable 2						
Área susceptible de mejora y organigrama: 1-SI 2-NO		Objetivo de implementación: 1-Organizar y controlar artículos o productos 2-Optimizar tiempos 3-Mejora en la satisfacción de cliente interno o externo 4-Diminuir mermas 5-Aumento de productividad 6-Más de un objetivo.						
		1	2	1	2	3	4	5
Variable 3		Variable 4		Variable 5		Variable 6		
Implementación de la tarjeta roja para innecesarios: 1-SI 2-NO		Evidencia fotográfica de innecesarios: 1-SI 2-NO		Inventario inicial de artículos, equipos o		Organización correcta basada en ABC: 1-SI 2-NO		
1	2	1	2	1	2	1	2	
Variable 7		Variable 8		Variable 9		Variable 10		
Lay out inicial: 1-SI 2-NO		Auditoría de diagnóstico: 1-SI 2-NO		Rol de limpieza: 1-SI 2-NO		recurrencia de suciedad: 1-SI 2-NO		
1	2	1	2	1	2	1	2	
Variable 11		Variable 12		Variable 13		Variable 14		
Uso de técnica de colores para estandarizar: 1-SI 2-NO		Evidencia fotográfica de rediseño de layout: 1-SI 2-NO		Evidencia de auditoría de implementación: 1-SI 2-NO		Evidencia de administración visual: 1-SI 2-NO		
1	2	1	2	1	2	1	2	
Variable 15		Variable 16						
Evidencia fotográfica de las mejoras alcanzadas: 1-SI 2-NO		Mejoras alcanzadas: 1-Organización y control 2-Optimización de tiempos 3-Mejora de satisfacción de cliente 4-Disminución de mermas 5-Aumento de productividad 6-Reducción de costos 7- Más de un beneficio.						
1	2	1	2	3	4	5	6	7

Folio de control: Empresa 1

Figura 2. Check list para validación de implementación 5´S

Fuente: Elaboración basada en el estándar EC0491 de Conocer. Disponible en: <https://conocer.gob.mx/renece-registro-nacional-estandares-competencia/>

Resultados

La investigación de campo se realizó en el período de estancias, en el ciclo septiembre-diciembre de los años 2020 y 2021, ya que los estudiantes fungieron como gestores en la implementación de la metodología 5'S en los negocios. Los resultados arrojaron que el 70% de los negocios que implementaron la metodología fueron del tipo micro, el 27% pequeña y el 3% mediana. La naturaleza de los negocios estuvo distribuida por: 60% en servicios, 33 en comercio y 7% manufactura. La actividad lucrativa que predomina en estos negocios es la venta de alimentos, los servicios de capacitación y la venta detallista o de abarrotes (Ver Figura 3).



Figura 3. Actividad lucrativa de los negocios

Fuente: Elaboración propia

El 100 % de los negocios describen el área susceptible de mejora y el organigrama (variable 1). Respecto al objetivo de la implementación de la metodología (variable 2), el 53% de los propietarios se inclinaron por organizar y controlar, alineado a la revisión de literatura sobre los casos internacionales (Sarmiento et al, 2019; Senent y Gisbert, 2017) y nacionales (Ortiz et al, 2017). Ya que, al ser pilar del lean manufacturing, los procesos administrativos deben atenderse de manera prioritaria, para después reforzar con otra herramienta que requiera mayor madurez organizacional, como Jidoka, just in time o el estudio de tiempos y movimientos, que inciden directamente en la optimización. El 22 % de los propietarios se enfocaron en la optimización tiempos y un porcentaje menor al 10% en aumentar la productividad como la satisfacción del cliente interno o externo (Ver Figura 4).

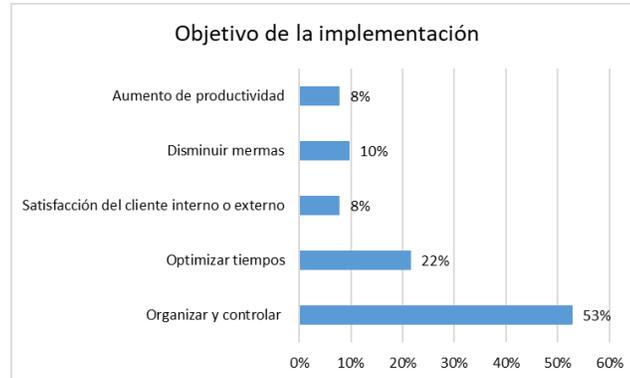


Figura 4. Objetivo de la implementación
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se muestra que el 100% de los negocios implementaron el uso de la tarjeta roja (variable 3), tomaron evidencia fotográfica de innecesarios (variable 4) y el inventario inicial de los bienes o artículos (variable 5). Además, el 93% realizó correctamente la técnica de clasificación de inventarios por costeo ABC (variable 6), los principales errores fueron: falta de asignación de códigos por producto para organizarlos y falta de estimación de la demanda anual de los productos por cada categoría.

El método ABC es un modelo de consumo de recursos, centrado en la gestión empresarial para facilitar la toma de decisiones (Ripoll, 2011). Al respecto, se detectó la necesidad de intensificar las capacitaciones sobre cómo realizar la técnica, bajo el contexto real de una PYME, situación descrita por Senent y Gisbert (2017), ya que los propietarios afirmaron conocer el concepto de inventario, pero no conocían la técnica de control ABC.

De igual forma, el 100% de los negocios realizó correctamente el layout inicial (variable 7), la auditoría de diagnóstico (variable 8) y el rol de limpieza (variable 9). En cuanto al análisis de recurrencia de suciedad (variable 10), el 93% lo realizó de forma correcta, los principales errores cometidos fue la falta de firma del validador de la limpieza y la definición concreta de un método de análisis causa raíz de la suciedad (Ver Figura 5).

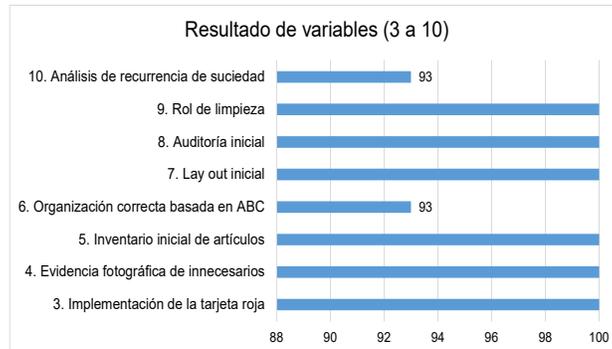


Figura 5. Resultados de variables 3 a 10

Fuente: Elaboración propia

Continuando con el análisis de las variables, en la figura 6 se muestra que el 100% de los negocios presentaron de forma correcta: la evidencia de rediseño de layout (variable 12), evidencia de auditoría final de implementación (variable 13) y la evidencia fotográfica de las mejoras realizadas (variable 15). El 93% de los negocios utilizaron la técnica de colores para estandarizar sus procesos y el 80% presentó evidencia de administración visual. Siendo estos últimos puntos sumamente importantes, ya que son parte de los desafíos que enfrentan las micros y pequeñas empresas para permanecer en el mercado (Cruz et al, 2016).

Las principales razones por las que no implementaron correctamente la técnica de colores y la administración visual fue por la falta de interés de los propietarios al invertir en algún método de administración visual, como tableros de control, semáforos, impresiones de señalización, entre otras.

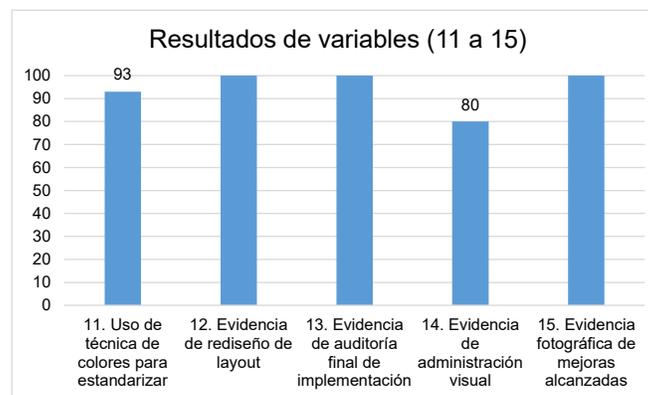


Figura 6. Resultados de variables 11 a 15

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, las mejoras alcanzadas en la implementación de la metodología (variable 16), reflejan que el 50% están orientadas hacia las bondades de organización y control, tanto de las actividades operacionales como las administrativas y la gestión de los

insumos o productos terminados en los espacios de almacenamiento, el 22% en la optimización de tiempos, tanto en los procesos logísticos internos, como los de atención al cliente y menos del 10% obtuvieron mejoras en la satisfacción del cliente interna y externa, reducción de mermas, reducción de costos y aumento de productividad. Por otra parte, los propietarios de los negocios afirmaron que la gestión logística en general de las empresas se impactó de forma positiva, en la planeación, organización y control de las actividades, así como el flujo de los insumos. (Ver Figura 7).

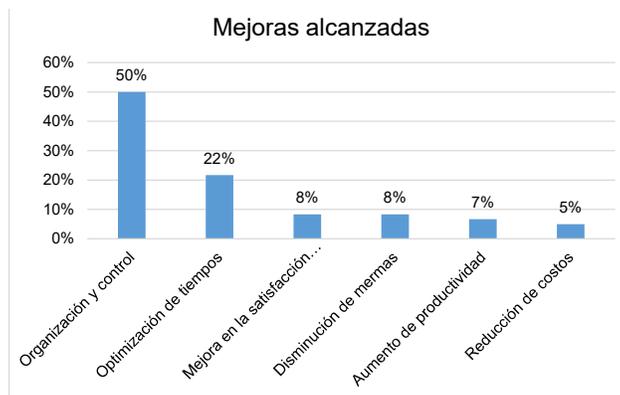


Figura 7. Resultados de variable 16

Fuente: Elaboración propia

Agradecimientos

Un especial reconocimiento por el esfuerzo y profesionalismo de los alumnos, de la Lic. En Administración y Gestión Empresarial de PYMEs, en la implementación de la metodología 5'S en las MIPes del sur de Sinaloa. Asimismo, un profundo agradecimiento por el apoyo constante que brindó la Directora de la Unidad Académica, la MA. Valeria Guadalupe Osuna Osuna para el desarrollo de este proyecto. De igual forma, se reconoce el impulso que las autoridades académicas y administrativas de la Universidad Politécnica de Sinaloa brindan para generar investigación significativa en el Estado.

Conclusiones y recomendaciones

Se encontró semejanzas entre los problemas que enfrentan las MIPes del sur de Sinaloa y las analizadas del territorio nacional e internacional. Los más frecuentes son: la falta de orden, limpieza y el control de la operación. Así como falta de estructura en los procesos administrativos.

Se puede inferir, de acuerdo a los resultados obtenidos que, las MIPes estudiadas reconocen la importancia de implementar la metodología 5'S como oportunidad de mantener limpios, organizados y óptimos sus negocios, principalmente la eficiencia para adminis-

trar de manera adecuada los tiempos de sus procesos, ya que, esta metodología es pilar de lean manufacturing; sin embargo, requieren capacitación constante para que los beneficios se mantengan, debido a la rotación de su personal.

De igual forma, el trabajo colaborativo incide positivamente en la gestión logística de las empresas, por más pequeñas que estas sean; a través de una comunicación efectiva, una planeación de los procesos y una medición constante de los indicadores. Aspectos que carecen de forma muy amplia las MIPES. Sin embargo, esto no quiere decir que no se encuentren trabajando y luchando día a día por mejorar su situación. Al respecto, se detecta la necesidad de gestoría especializada y situada por tipo de actividad lucrativa. La vinculación con las universidades puede ser un mecanismo de colaboración efectiva, para incidir en la mejora continua, con impacto positivo en el Desarrollo Económico de la Región.

Finalmente, los propietarios de los negocios reconocen la importancia de contar con una estrategia para ser más competitivas y alcanzar incentivos que el gobierno pueda proporcionarles, a través de las convocatorias. En este sentido, la mejora continua es una de ellas y la metodología 5S puede ser una herramienta práctica y funcional para las MIPES.

Referencias

- Ballou, R. H. (2004). *Business logistics/Supply chain management: planning, organizing, and controlling the supply chain* (5a ed.). N.J.: Pearson.
- Cano, P., Orue, F., Martínez, J., Moreno, Y. y López G. (2015). Modelo de gestión logística para pequeñas y medianas empresas en México. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0186104215721510>
- Castillo, O., García, M. y Valderrama, A. (2021). Habilidades de Innovación en los colaboradores de las MIPES Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-76782021000100008&lang=es
- Chopra, S. y Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro: estrategia, planeación y operación* (3a ed.). México: Pearson.
- Cotera, E., Sobereanes, A y Martínez, M. (2019). Análisis de indicadores de calidad de las pymes en el municipio de Valle de Chalco. *Dialnet-AnalisisDeIndicadoresDeCalidad DeLasPymesEnElMunici-8119883.pdf*
- Cruz, M., López, E., Cruz, R., Meneses, G. (2016) ¿Por qué no crecen las Micro y Pequeñas empresas en México? ECORFAN. https://www.ecorfan.org/actas/A_1/29.pdf
- DENUE (2021). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Recuperado de www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx
- Diario Oficial de la Federación (2020, 31 de diciembre). Programa Especial para la Productividad y la Competitividad (2020-2024). www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609267&fecha=31/12/2020

- González, C.A., Martínez, J.L., Malcón, C., y Cavazos, J. (2012). Metodología de gestión logística para el mejoramiento de pequeñas empresas. Global Conference on Business and Finance Proceedings.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación. México: Mc Graw Hill.
- INEGI (2021). Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/OtrTemEcon/EDN2020.pdf>
- Mantilla C., O., & Sánchez G., J. (2012). Modelo tecnológico para el desarrollo de proyectos logísticos usando lean six sigma. Estudios gerenciales. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0123592312702140>
- Mora, L.A. (2012). Gestión logística integral, las mejores prácticas en la cadena de abastecimiento. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- OCDE (2018). Reunión Ministerial de la OCDE sobre el fortalecimiento de las Pequeñas y Medianas Empresas (PyME) y el emprendimiento para la productividad y crecimiento incluyente. Recuperado de: <https://www.oecd.org/centrodemexico/medios/reunion-ministerial-de-la-ocde-sobre-el-fortalecimiento-de-las-pequeas-y-medianas-empresas-pyme-y-el-emprendimiento-para-la-productividad-y-el-crecimiento-incluyente.htm>
- OCDE (2019). América Latina y el Caribe. Políticas para pymes competitivas en la alianza del Pacífico y países participantes de América del sur. Recuperado de: <https://www.oecd.org/latin-america/Indice-Politicas-PYME-LAC-Mensajes-Principales.pdf>
- Ortiz, Vázquez y Roldan (2017). Aplicación de lean manufacturing en el diseño de una mejora tecnológica en una microempresa. Gestión de la innovación para la competitividad. ALTEC 2017. Recuperado de: http://www.uam.mx/altec2017/pdfs/ALTEC_2017_paper_345.pdf
- PED Sinaloa (2022). Plan Estatal de Desarrollo (2021-2027). Recuperación de: <https://ped.sinaloa.gob.mx/wp-content/uploads/2022/04/PED27-compressed.pdf>
- Red Conocer (2022). Estándar de Competencia EC0491. Implementación de la metodología 5S para la mejora continua. Recuperado de: <https://www.uttt.edu.mx//Conocer/ECO491%20IMPLEMENTACION%20DE%20LA%20METODOLOGIA%20DE%20LAS%205%20PARA%20LA%20MEJORA%20CONTINUA.pdf>
- Ríos, M. Rodríguez, M. y Ferrer, J. (2012). Los costos basados en actividades como herramienta de gestión en las pymes. El caso las empresas de servicios en México. Recuperado de: http://www.observatorio-iberoamericano.org/RICG/N%C2%BA_19/Martha_Rios;_M%C2%AA_Lourdes_Rodriguez-Vilari%C3%B1o_y_Juli%C3%A1n_Ferrer.pdf
- Ripoll, V. Tamarit, C. y Barber, Y. (2011). Aproximación al modelo de costes y gestión basado en las actividades: Estudio de un caso en una Pyme. Recuperado de: http://www.observatorio-iberoamericano.org/RICG/N%C2%BA_17/Vicente_Ripoll,_Carmen_Tamarit_y_Yolanda_Barber.pdf
- Sanz, J. y Gisbert, V. (2017). Lean manufacturing en Pymes. Recuperado de: https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2018/01/art_12.pdf
- Sarmiento, W. J., Villamil Sandoval, D. C., & González, A. J. (2019). Caracterización de los procesos productivos de las pymes textiles de Cundinamarca. Revista Logos Ciencia & Tecnología, 11(2), 60-77. <http://dx.doi.org/10.22335/rict.v11i2.839>

- SE (2012). La Secretaría de Economía en Conjunto con el Estado de Sinaloa anuncian apoyos por más de 24MDP del programa Prologyca. Recuperado de: <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/delegaciones-de-la-se/estatales/sinaloa/167-delegaciones-de-la-se/estatales/sinaloa/8507-sinaloa18>
- Senent, F. y Gisbert, V. (2017). Hacer bien las cosas cuando se necesitan, sin prisas, pero sin pausas, una versión española de lean six sigma. Recuperado de: [file:///C:/Users/Guadalupe/Downloads/Dialnet-HacerBienLasCosasCuandoSeNecesitanSinPrisasPeroSin-6020417%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Guadalupe/Downloads/Dialnet-HacerBienLasCosasCuandoSeNecesitanSinPrisasPeroSin-6020417%20(1).pdf)
- Torres, R. (2022). En Sinaloa, menos del 50% de las actividades económicas son informales. El Noroeste. Recuperado de: <https://www.noroeste.com.mx/culiacan/en-sinaloa-menos-del-50-de-las-actividades-economicas-son-informales-asegura-javier-gaxiola-GG2118811>
- Vargas, I. (2012). Contrata como los grandes para tu pyme. Expansión. Recuperado de: <https://expansion.mx/mi-carrera/2012/03/05/pyme-contrata-como-los-grandes>
- Velarde, M. G, Rodríguez, A. y Ontiveros, M. I (2020). Logística humanitaria: Elementos clave y propuesta del uso de herramientas lean para facilitar la gestión de almacenamiento de insumos. Inteligencia colectiva en logística. Investigación, Innovación y tecnología para un mundo sostenible. Asociación Mexicana de Logística y Cadena de Suministro, A.C. www.itson.mx/publicaciones/Documents/ingytec/Libro-%20Inteligencia%20colectiva%20en%20log%C3%ADstica_compressed.pdf

Semblanza de los coordinadores

María Paz Guadalupe Acosta Quintana

Profesor investigador del Departamento de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Sonora. Es miembro del Cuerpo Académico Consolidado de Cadenas Productivas, así como del núcleo académico de la Maestría en Ingeniería en Logística y Calidad y del programa de Licenciatura en Ingeniería Industrial y de Sistemas. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (Candidata) CONACYT. En el 2001 recibió el reconocimiento al Mérito Estudiantil otorgado por la Universidad Autónoma de Baja California por la titulación oportuna y el promedio obtenido durante sus estudios de Posgrado. En 2012, recibió la Mención Honorífica por el Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministros (UPAEP). Es miembro del comité editorial del Instituto Tecnológico de Sonora y forma parte del comité técnico del Congreso Internacional en Logística y Cadena de Suministro. Además, colabora en proyectos del Laboratorio Nacional de Sistemas de Transporte y Logística-ITSON como miembro del equipo de proyectos. Es miembro de la Asociación Mexicana de Logística. Ha asesorado trabajos de tesis tanto a nivel licenciatura como maestría en temas relacionados con Cadena de Suministro y Logística, aplicando herramientas de Lean Logistics, modelación matemática, programación de la producción, entre otras, cuyos proyectos han permitido generar desarrollos tecnológicos y artículos que se han presentado en congresos y trabajos publicados en revistas indexadas. Cuenta con el reconocimiento al perfil deseable de PRODEP y ha sido reconocida desde 2002 a la fecha dentro del programa de desempeño académico que maneja el Instituto Tecnológico de Sonora. Sus principales contribuciones han sido soluciones para el sector industrial y de servicios a través de la solución de problemas que han impactado en la reducción de costos como en la mejora de sus procesos y servicio.

Miguel Gastón Cedillo Campos

Responsable Técnico del Laboratorio Nacional CONACYT en “Sistemas de Transporte y Logística” (SiT-LOG) con sede en el Instituto Mexicano del Transporte [IMT]. En 2004, recibió con Mención de Honor el Doctorado en Transporte-Sistemas Logísticos por la

Universidad de París. Es representante para México de la Sociedad Mundial de Investigación en Transporte (WCTRS), Investigador Nacional del CONACYT y Premio Nacional de Logística (2012).

Entre sus principales contribuciones están: i) SiT-LOG Lab, Laboratorio Nacional con múltiples sedes y que ha contribuido al desarrollo del conocimiento y aplicación logística en México; ii) LogistiX-Lab, el cual es el primer laboratorio de logística urbana en tiempo real de América Latina, un laboratorio para medir prácticas logísticas, emisiones contaminantes y consumo de energía en entregas de “Últimos Metros”, para su primera fase (diseño de bahías de carga/descarga) participaron empresas como: Bimbo, Heineken, Bonafont y Jumex, así como con autoridades de Querétaro, y expertos nacionales e internacionales. Este proyecto recibió el Premio InterTraffic Lationamerica (2019); iii) eraclituX, mapa digital interactivo que utiliza millones de datos GPS para medir la confiabilidad en los tiempos de viaje de vehículos de carga circulando por corredores de transporte de carga; iv) IMT-X, vehículo aéreo no tripulado (“Drone”) autónomo con múltiples aplicaciones en logística y vigilancia; v) LogisTECHS Lab, laboratorio en tiempo real con base en tecnologías 4.0 aplicadas a mejorar la fluidez, resiliencia y sostenibilidad de las cadenas de suministro transfronterizas de la región T-MEC.

Además, ideó y co-fundó el primer centro de investigación en cadenas de suministro de México, el CiDECS (Centro de Investigación y Desarrollo de Cadenas de Suministro) del Tec de Monterrey, la Asociación Mexicana de Logística y Cadena de Suministro, A.C. (AML), el Clúster para la Innovación Logística de Querétaro (CiLQRO) y la Alianza de Clústeres Logísticos de América del Norte (ALCAN). El Dr. Cedillo-Campos publica regularmente los resultados de investigación en las revistas de mayor prestigio a nivel global en su área.

Ernesto Alonso Lagarda Leyva

Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) desde 1996. Cuenta con estudios de Ingeniería Industrial, Maestría en Ingeniería en Optimización de Sistemas Productivos y Doctorado en Planeación Estratégica para la Mejora del Desempeño. Ha sido profesor invitado por la

Universidad del Rosario, en Bogotá, Colombia y miembro del Grupo Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Desde 2015 a la fecha es Responsable Operativo del Laboratorio Nacional de Sistemas de Transporte y Logística-ITSON, desde 2017 forma parte del Sistema Nacional de Investigadores; forma parte de la Asociación Mexicana de Logística y Cadena de Suministro, A.C. y es socio fundador del Consorcio Sur Sonora Connect. En 2019 realiza una estancia en la Universidad de Laval Canadá para el desarrollo de un proyecto conjunto con la Facultad de Administración, con aplicaciones de dinámica de sistemas para la provincia de Quebec Canadá. Premio Nacional de Logística 2019 “Galardon Tameme”, Categoría Académico, por parte de la Secretaría de Economía, #soylogístico asociación y la Sociedad de Comunicaciones y Transporte, ese mismo año recibe por parte del Grupo de Vinculación de la ANUIES región Noroeste, el 1er Lugar a la mejor Vinculación de la Región Noroeste. En 2021, se le asignó la Dirección del Capítulo de la Megaregión de Sonora-Arizona por parte de la Performance Improvement Institute-Global Network, para promover temas de logística y cadenas de suministro entre ambos estados. Actualmente en 2023, dirige tres proyectos de logística en el campo de agroalimentario (producción de cerveza artesanal a partir de higo), del turismo (proyecto Isla Masocarit), así como humanitaria (Laval University).

ALLY SHORING: Negocios Internacionales 4.0

Se terminó de editar en Ciudad Obregón, Sonora; el 13 de julio de 2023,
por la Oficina de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Sonora.

Fue puesto en línea para su disposición en el sitio
www.itson.mx
en la sección de Publicaciones.

RESUMEN

Los negocios internacionales permiten la importación y exportación de productos que requiere cada país, apoyándose en estrategias y procesos para insumos, productos, recursos y servicios que demanda el ser humano, pero también para la prestación de servicios. Lo anterior, es a través de la conformación de cadenas de suministro flexibles y dinámicas para garantizar el logro de objetivos y metas. La estrategia del Allyshoring ha permitido a las empresas tener éxito en la producción, comercialización, seguridad y gobernabilidad de sus mercancías hacia nuevos mercados apoyándose en cadena de suministro donde se destaca la colaboración entre proveedores, socios, aliados confiables que han hecho posible invertir en relaciones a corto y largo plazo. Para México, el Allyshoring le ha permitido avanzar poco a poco en terrenos del comercio internacional, a través de la instalación en el país de empresas del extranjero y de relaciones de confianza basadas en la producción y el comercio orientadas a producción con carácter de innovación, fronteras inteligentes y habilidades de la fuerza laboral de la cual es su mayor fortaleza. Esta obra integra 19 trabajos relacionados con temáticas de negocios internacionales, cadena de suministro inversa, procesos de fabricación avanzados, desarrollo de sistemas y tecnología, cadena de suministro robustas y optimización de sistemas logísticos, considerando una sección para cada una dentro de la misma, en las cuales se hace un compendio de las obras relacionadas con cada temática. Las temáticas que conforman el libro son temas que fortalecen las operaciones dentro de una cadena de suministro hacia el nearshoring, favoreciendo el área de conocimiento en estas líneas de investigación y para la generación de soluciones que contribuyen a la mejora de las operaciones contemplándose en diferentes flujos. Los negocios internacionales juegan un rol importante en la estrategia de nearshoring, debido a que es aquí donde se analizan las transacciones para hacer posible la comercialización de los productos y lograr así los objetivos y las metas de la cadena de suministro. La cadena de suministro evoluciona para dar apertura a nuevas tecnologías, enfoques y principios, esta estructura ha permitido a diferentes entidades mejorar procesos, tecnologías, costos y servicios que impactan en la economía de un país, razón por la cual la cadena de suministro cada día toma más auge, no solo como un concepto sino como una manera de organizarse, razón por la cual debe buscarse la innovación y la mejora de sus elementos. México requiere de organizaciones que cuentan con una cadena de suministro flexible, abierta, dinámica, y eficiente que les permita incidir en nuevos mercados con productos reconocidos por su calidad y por la satisfacción a sus clientes, todo es posible, sólo es necesario empezar hacer el cambio y tener una visión de largo plazo.