



AVANCES EN TRANSPORTE Y LOGÍSTICA: DIGITALIZACIÓN, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD

Dra. Maria Paz Guadalupe Acosta Quintana
Dr. Gastón Miguel Cedillo Campos
Dr. Ernesto Alonso Lagarda Leyva
Coordinadores



AVANCES EN TRANSPORTE Y LOGÍSTICA: DIGITALIZACIÓN, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD

Dra. Maria Paz Guadalupe Acosta Quintana

Dr. Gastón Miguel Cedillo Campos

Dr. 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
Septiembre, 2024

ISBN para ebook:

Gestión editorial y maquetación
Marisol Cota Reyes
Oficina de publicaciones ITSON
marisol.cota@itson.edu.mx

Cubierta diseñada en Freepik

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



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.

Contenido

PRÓLOGO	8
---------------	---

Miguel Gastón Cedillo Campos, María Paz Guadalupe Acosta Quintana

Sección 1:

Transformación digital y tecnológica

Capítulo 1

Implementación de Arquitectura Tecnológica para el Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística	11
---	----

Cesar J. Montiel Moctezuma, Gastón Cedillo-Campos, Marisol Barrón Bastida, Bernardo Hernández-Sánchez

Capítulo 2

Tecnología e innovación hacia la ciudad inteligente. Aplicación para la gestión de bahías de carga/descarga.....	31
--	----

M.GTI Bernardo Hernández Sánchez, Dr. Cesar J. Montiel Moctezuma, Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos, M.TW Marisol Barrón Bastida

Capítulo 3

Uso de bandas inteligentes para monitoreo de la salud en los conductores del autotransporte de carga	51
--	----

Martha Elizabeth de la Torre Romero, Jared Piña Barcenas, Marisol Barrón Bastida y Cesar Montiel Moctezuma

Capítulo 4

Metaheurísticas para la planificación de demanda y optimización de rutas de vehículos en problema de reabastecimiento de combustible de estaciones de servicio: un caso de estudio	76
--	----

Danisa Romero-Ocaño, Víctor M. Valenzuela – Alcaraz, Kevin Alejandro Galaviz Gámez, Miguel Alejandro Siqueiros Parra

Capítulo 5

Algoritmo metaheurístico para resolver un caso del problema de rutas de vehículos: Un caso de estudio en el sistema de distribución de leche 105

Víctor M. Valenzuela-Alcaraz, A. Danisa Romero-Ocaño, Kevin Alejandro Galaviz Gámez, Miguel Alejandro Siqueiros Parra

Sección 2:

Diseño de la eficiencia

Capítulo 6

Diseño y evaluación de layout de una empresa dedicada a la fabricación de cerámica con simulación y SLP 126

Marlenne Cruz Romero, Carlos Alonso López Marcelo, José Luis López Cervantes, Javier García Gutiérrez

Capítulo 8

Modelos para ubicar un centro de distribución en caso de contingencia por el volcán Popocatepetl en Morelos 144

Carolina Sacarlett Chávez Marchan, Maria del Carmen Torres Salazar, Jesús del Carmen Peralta Abarca

Capítulo 8

Simulación de políticas de inventario de una empresa textil 159

Samuel Domínguez Rosales, Lourdes Loza-Hernández, Agustín Bustos Rosales, Sergio Vázquez Aranda

Capítulo 9

Comparación de modelos de programación para localización de instalaciones logísticas: P-mediana y modelos de cobertura 175

Agustín Bustos Rosales, José Alejandro Ascencio Laguna, Alma Rosa Zamora Domínguez, José Alfonso Balbuena Cruz, Lourdes Loza Hernández

Capítulo 10

Diseño de modelos de inventario para una empresa productora de arneses en la región sur de Sonora, México 190

Ernesto Alonso Vega Telles, Alfredo Bueno Solano, María del Pilar Lizardi Duarte, Berenice Patrón Arayo

Capítulo 11

Modelación de la cadena de suministro agrícola del limón persa basada en eventos discretos con Simio®210

Mildred Virginia López Segura, Constantino Gerardo Moras Sánchez , Magno Ángel González Huerta, Sergio Javier Acosta Beltrán, Gregorio Fernández Lámbert, Alberto A. Aguilar Lasserre

Sección 3:

Movilidad y desarrollo sostenible

Capítulo 13

Hacia un Transporte 5.0: una propuesta de cambio en la matriz energética incorporando hidrógeno verde para los remolcadores de alta mar232

Lorena Bearzotti, María Isabel Vega, Javier M. Ross, Luciano Nuñez, Mario Contreras

Capítulo 14

Estudio de preferencia declarada del servicio BRS del tramo CETRAM Téllez al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles247

Héctor Armando Figueroa Urrea, Rafael Ordoñez Gutiérrez, Ahsure Tatiana Flores Pérez, Eduardo Cruz Aldana, Myrna Hortencia Lezama León

Capítulo 16

Accesibilidad espacial del nuevo aeropuerto de Tulum. Una cuantificación espacial de los beneficios potenciales del nuevo aeropuerto261

Alfonso Herrera García, Abraham Cortés Ronquillo

Capítulo 17

Alternativa de solución para reducir emisiones contaminantes en una intersección semaforizada utilizando microsimulación	276
--	-----

María del Carmen Escobar Castor; Dasiel Díaz Sanchidrian; José Alfredo Jiménez García; Salvador Hernández González, Vicente Figueroa Fernández, Luis Ángel Toledo Aguilar

Acerca de los coordinadores

María Paz Guadalupe Acosta Quintana	291
Gastón Cedillo	291
Estertor Alonso Lagarda Leyva	292

PRÓLOGO

La administración de la cadena de suministro es actualmente un complejo laberinto que está presentando desafíos y oportunidades en cambio constante. Numerosas fuentes de incertidumbre requieren están provocando la necesidad de análisis actualizados y bien fundamentados, para una hábil toma de decisiones. Desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos finales, las interrupciones a las cadenas de suministro y los impactos ecológicos están aumentando. Ya sea a causa del cambio climático, factores ambientales, sociales y de gobernanza, hasta tensiones geopolíticas, problemas de cumplimiento normativo, ataques cibernéticos y la salud de los proveedores. Para mitigar estos riesgos, se requieren estrategias innovadoras apoyadas por procesos digitalizados, que permitan alcanzar la eficiencia y sostenibilidad que el imperativo de proteger al medio ambiente se nos exige como humanidad. En la era del “Nearshoring” requerimos desarrollar soluciones creativas y para ello, es necesaria la integración de diversos enfoques.

En todo el mundo, las cadenas de suministro son el elemento vital del comercio, facilitando el flujo continuo de bienes y servicios a través de grandes distancias. Sin embargo, esta intrincada red de interconectividad no es inmune a las disrupciones. Los desastres causados por la naturaleza o por los seres humanos dan lugar a fallas en la comunicación y la visibilidad, escasez de proveedores, interrupciones en el transporte y la logística, desequilibrios de inventario, tiempos de entrega cada vez más largos y costos que acechan siniestramente en el horizonte. En este panorama de incertidumbre, el presente libro aborda desde aspectos tan importantes sobre la implementación de la arquitectura tecnología de un centro de investigación para estar a la altura de las necesidades de investigación actuales, hasta la tecnología requerida para reducir las emisiones contaminantes en intersecciones semaforizadas.

La tendencia de “Nearshoring” en México y América Latina, atrae a empresas internacionales que están consolidando lo que se identificó como tendencia desde mediados de la década de los 2010, el “Agrupamiento de la Cadenas de Suministro” (o “Supply Chain Clustering” en idioma inglés). Centrándose en el papel floreciente de México como polo de cadenas de suministro para América del Norte, las inversiones industriales recién llegadas están amplificando las oportunidades y los riesgos a una escala sin precedentes. Dado que la construcción de la próxima generación de cadenas de suministro del T-MEC está motivada por una mayor resiliencia con menos contaminación, la importancia de la digitalización y la tecnología para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones no se puede subestimar. El aumento de los riesgos puede ser un obstáculo significativo para lograr cadenas de suministro integradas a nivel continental, lo que se ha dado en llamar, productos: “Hecho en las Américas”.

Los avances en transporte y logística han transformado significativamente la forma en que se mueve mercancía y personas en todo el mundo, los cuales están impulsando una mayor eficiencia, sostenibilidad y capacidad de respuesta en el sector logístico, lo que permite a las empresas adaptarse mejor a las demandas cambiantes del mercado y a los desafíos globales como el cambio climático.

Ante ello, el presente libro está dividido en tres capítulos. El primer capítulo titulado: “Transformación Digital Y Tecnológica”, conformado por contribuciones que marcan la importancia de la tecnología tanto para el desarrollo de la investigación en transporte y logística, como para el desarrollo de ciudades inteligentes, el monitoreo de la salud de conductores del autotransporte de carga o incluso, el uso de técnicas meta-heurísticas para la planificación de demanda y optimización de rutas de vehículos. El segundo capítulo titulado: “Diseño de la Eficiencia”, integra contribuciones que van desde aspectos como el diseño de el “Layout” en una empresa a través del uso de simulación, también la modelación aplicada a la localización de centros de distribución para casos de contingencia, incluso, la simulación de prácticas de inventario, la comparación de modelos de programación para la localización de instalaciones logísticas, hasta la modelación de la cadena de suministro agrícola del limón persa basada en eventos discretos. El tercer capítulo titulado: “Movilidad Y Desarrollo Sostenible”, provee de valiosa información y análisis sobre la base de contribuciones que analizan los aspectos clave del denominado “Transporte 5.0” desde la perspectiva de cambio en la matriz energética, pero también, aspectos sobre las preferencias declaradas de un servicio de BRS para el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles, además de un análisis de accesibilidad espacial de un nuevo aeropuerto y finaliza con el análisis de una alternativa de solución para reducir emisiones contaminantes en una intersección semaforizada utilizando micro-simulación.

Es el esfuerzo por parte de investigadores con adscripción en diversas instituciones y desde diversas perspectivas, lo que consideramos asigna un gran valor a la presente publicación. Desde luego, es el juicio del lector, lo que al final definirá la contribución del presente trabajo. Sin embargo, en un contexto de cambio constante, consideramos que la presente selección de contribuciones es un aporte que permitirá ampliar la reflexión sobre aspectos que son claves en México y América latina para el desarrollo del transporte, la logística y la cadena de suministro.

Miguel Gastón Cedillo Campos

María Paz Guadalupe Acosta Quintana

Sección 1:

Transformación digital y tecnológica

Capítulo 1

Implementación de Arquitectura Tecnológica para el Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística

Cesar J. Montiel Moctezuma, Gastón Cedillo-Campos, Marisol Barrón Bastida, Bernardo Hernández-Sánchez

Resumen—En la actualidad, debido al auge de la industria 4.0 y la aplicación de las tecnologías exponenciales en diferentes sectores, se han redefinido muchos aspectos de la industria y la logística. El Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística (SiTLog Lab), como unidad estratégica de investigación a nivel nacional, ha desarrollado una gran cantidad de proyectos tecnológicos en colaboración con investigadores reconocidos a nivel nacional e internacional, resultados que han sido aprovechados por los tomadores de decisión del sector logístico. Sin embargo, estos proyectos se han desarrollado como productos independientes, y actualmente no tienen la capacidad de compartir información entre sí, ni la capacidad de ampliarse de manera efectiva implementando nuevas tecnologías para optimizar sus resultados. Esta investigación se enfoca en la migración de los proyectos existentes a una nueva arquitectura que libere el crecimiento tecnológico y permita la comunicación con otros sistemas informáticos, con el objetivo de que se convierta en un producto escalable, resiliente, seguro, e incremente la compatibilidad de nuevas tecnologías como inteligencia artificial, internet de las cosas, big data, entre otras.

Palabras Clave—**SiTLOG Lab, Sistemas, Tecnología**

Introducción

El Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística (SiT-LOG Lab) es una unidad estratégica de investigación aplicada dentro del IMT con colaboración de otros centros de investigación a nivel nacional e internacional, que se enfoca en desarrollo

científico y tecnológico en las áreas de transporte, logística y cadena de suministro. La investigación realizada más destacada del SiT-LOG Lab se enfoca en logística urbana y de autotransporte nacional a través de proyectos que implementan nuevas tecnologías como Big Data, Inteligencia Artificial, Drones, Internet de las Cosas, Realidad Aumentada [1] [2].

La importancia de implementar nuevas tecnologías en el sector transporte ha incrementado debido al auge que ha tenido la industria 4.0 y la nueva tendencia de la revolución digital que se encuentra redefiniendo muchos aspectos de la industria y la logística [3]. De acuerdo a esta tendencia, es necesario actualizar los sistemas de información para que puedan acoplarse de manera eficiente con sistemas informáticos existentes en la actualidad que son ofrecidos para incorporar estas tecnologías exponenciales en el desarrollo de proyectos de investigación, es decir, ya no es necesario desarrollar desde cero estas tecnologías para utilizarlas.

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS – Intelligent Transport Systems) consisten en la aplicación de tecnologías de la información y telecomunicaciones en las diversas modalidades de transporte, para mejorar tanto los servicios, así como la operación y seguridad en los mismos [4]. Sin embargo, para acceder a información de las plataformas informáticas de ITS, es necesario de una interacción física de un usuario final, y esto provoca que la toma de decisiones no sea rápida eficiente, y es necesario automatizar ciertas actividades para optimizar el sistema final. Regularmente se accede a dichos sistemas a través de diferentes medios, desde teléfonos hasta computadora portátil o de escritorio, sin embargo, en la mayoría de los casos no tienen la capacidad de comunicarse con otros sistemas inteligentes. Una solución a este problema es desarrollar en cada uno de los proyectos la capacidad de poder interactuar entre sí a través de una comunicación autónoma, flexible y escalable.

Dentro del SiT-LOG Lab se han desarrollado proyectos de investigación enfocados en logística urbana e interurbana con alcance nacional e internacional, entre los más representativos se pueden identificar: IMT-x: Vehículos Aéreos Autónomos no Tripulados [5], EraclituX: Mapa Digital de Autotransporte [6] y LogistiX Lab: Laboratorio de Logística Urbana [7]. Sin embargo, estos proyectos se desarrollaron de manera independiente, y los sistemas que los controlan no tienen la capacidad de intercambiar información entre sí.

De esta situación surge la idea de implementar una arquitectura tecnológica capaz de cubrir las necesidades del laboratorio, y después de un análisis exhaustivo y comparación entre las nuevas arquitecturas para desarrollo de software, la seleccionada fue con un enfoque a microservicios. Los microservicios nacieron como una base para la construcción e implementación de aplicaciones de manera rápida y efectiva en empresas desde el año 2005, donde empresas como Amazon y Netflix empezaron a apostar en la transición de sus sistemas a esta arquitectura. En ese entonces se desarrollaban sistemas monolíticos que representaban módulos o componentes de un sistema mucho más grande, los

cuales estaba estrechamente relacionados entre sí, y provocaba, que cambios importantes en el código, quedaran atascados en el proceso de implementación durante largo tiempo antes de que pudieran ser utilizados por sus clientes finales, Figura 1.

La arquitectura de microservicios resolvió estos problemas ofreciendo mayor flexibilidad en el desarrollo de aplicaciones, sistemas escalables y con costos operativos más bajos, además de reducir la complejidad del proceso de desarrollo de software.

Actualmente, el mercado de los microservicios en la nube, se espera que tenga un incremento de 683.2 millones de dólares registrados en el 2018 a 1880 millones de dólares para el año 2023, a una tasa de crecimiento anual compuesto del 22.4% [8]. Los principales factores que impulsan dicho mercado son las transformaciones digitales, la proliferación de esta arquitectura y la ideología de negocios orientados al cliente. Existe una gran cantidad de empresas a nivel mundial que utilizan y ofrecen ecosistemas basados en microservicios. Grandes empresas que han migrado sus sistemas a esta arquitectura son Amazon, BestBuy, Coca Cola, eBay, Netflix, Spotify, Uber, entre otros. Entre algunos de los sistemas actuales utilizados en logística, que son factibles para su migración a este nuevo paradigma, aquellos dedicados para la gestión de la cadena de suministro (Supply Chain Management-SCM), de relaciones con los clientes (Customer Relationship Management-CRM), para la planeación de recursos (Enterprise Resource Planning ERP), los sistemas de planificación (Advanced Planning and Scheduling-APS), los cuales podrían compartir información relevante entre sí, y mejorarían las decisiones tanto en niveles estratégicos y operativos.

Microservicios

El término de microservicio comenzó a principios del 2005, con la presentación del Dr. Peter Rodgers en su conferencia “Web Services Edge” donde utilizó el término “Micro-Web-Services”, en la cual demostró su pensamiento en contra del pensamiento convencional de ese entonces, cuando la arquitectura SOAP (Simple Object Access Protocol)-SOA (Service Oriented Architecture) [9], [10] estaba en un su auge, entonces abogó por los servicios REST (Representational Transfer Protocol) [11], donde analizó y definió a los componentes de software como microservicios web [12].

El término se utilizó de una manera más formal en un taller para arquitectos de desarrollo de software en Venecia [13], y se definió como un estilo de arquitectura en común para muchas aplicaciones, pero hasta mayo del 2012 se definió el nombre apropiado como microservicios. Por otro lado, este término también fue utilizado en otras presentaciones tales como: de la 33va Conferencia para Java Masters elaborada por James Lewis [14], y la conferencia impartida por Adrian Cockcroft representando a Netflix [15].

En los últimos años, la implementación de los microservicios y su arquitectura ha incrementado considerablemente en todo el mundo debido a la fácil integración y desarrollo de los sistemas informáticos así como la reducción de los problemas que el escalado de estos implica. De acuerdo a Google y las búsquedas a nivel global del tema se puede observar el incremento del interés en este tema en la Figura 2.

La arquitectura de microservicios ha mejorado de una manera efectiva el desarrollo de los sistemas computacionales, apoyado con DevOps para la construcción y despliegue continuo. Los microservicios se pueden visualizar como una evolución de SOA en la cual se guía para la creación de aplicaciones modulares, funcionales y autónomas, con una alta capacidad de reutilización de forma eficaz, en el cual, se despliega solo lo realmente necesario, en lugar de desplegar todo un sistema por completo sin necesidad.

Los microservicios tienen dos características principales, son autónomos debido a que cada componente en esta arquitectura se puede desarrollar, implementar, operar y escalar sin afectar el funcionamiento de otros servicios, y cualquier comunicación entre dichos componentes individuales ocurre a través del consumo de las API's. Son especializados ya que cada microservicio está diseñado para un conjunto de capacidades y se enfoca en resolver un problema específico. Para aquellos servicios que empiezan a escalar a través del tiempo por la cantidad de requerimientos solicitados, si el servicio comienza a ser complejo se puede dividir en servicios más pequeños, Figura 3. Algunas ventajas que se pueden identificar en la implementación de esta arquitectura son:

Agilidad. Los microservicios fomentan el agrupamiento de equipos de personas pequeños e independientes que se apropian de las funcionalidades.

Escalamiento. Los microservicios permiten que cada servicio se escale de forma independiente para satisfacer las necesidades del sistema, esto permite a los equipos adecuarse a las necesidades de la infraestructura, medir con precisión el costo de nuevas funcionalidades y mantener la disponibilidad de los servicios en cualquier momento sin importar la cantidad de peticiones realizadas a este.

Implementación sencilla. Los microservicios permiten la integración y entrega continua, es decir, los cambios desarrollados y actualizaciones de software en los sistemas se deben realizar de manera ágil y fiable, facilitando la prueba de nuevas características y permite revertir cualquier cambio en caso de que estos no funcionen.

Libertad tecnológica. Esta arquitectura no tiene un diseño único, es decir, cada uno de los equipos que integran nuevas funcionalidades tienen la libertad de elegir la mejor herramienta para resolver los problemas que surjan, esto les da la libertad de trabajar con diferentes lenguajes, bibliotecas, administradores de bases de datos, y otros frameworks que sean compatibles con la comunicación de las API's a consumir.

Reutilización de Código. Facilita a utilizar el mismo código para diferentes propósitos, ya que se desarrollan módulos pequeños y bien definidos.

Resiliencia. La resiliencia en los sistemas desarrollados con esta arquitectura es un punto clave, debido a que permite al sistema resistir mejor los errores en las aplicaciones. Por ejemplo, en un sistema monolítico, un error en un solo componente provoca que toda la aplicación falle, por otro lado, en los microservicios, si existe un error en algún servicio, las aplicaciones continúan trabajando y degradan la funcionalidad sin bloquear la aplicación completa.

Soporte. En los últimos años, ha incrementado la popularidad de los microservicios, por lo tanto, ha provocado que el soporte a los mismos también se haya incrementado, dando la oportunidad de ser implementados y soportados por diferentes tecnológicas y proveedores en la nube.

Comunicación entre microservicios

En una aplicación monolítica, los componentes se invocan directamente mediante llamadas a funciones; por otro lado, en una arquitectura de microservicios se encuentran un conjunto de servicios que interactúan entre sí a través de la red [16]. Cuando se diseña la comunicación entre los servicios, antes que todo es necesario definir como serán las interacciones entre estos, una solicitud puede ser procesada por un microservicio o varios a la vez, debido a que pueden existir microservicios repetidos que reparten la carga de trabajo. Para estas comunicaciones se pueden identificar dos tipos de interacciones: a) síncrona cuando un servicio hace la petición a otro servicio en la red, este se bloquea hasta recibir la respuesta solicitada; b) asíncrona cuando un servicio realiza una petición a cualquier otro servicio, este no necesita esperar la respuesta, y puede continuar realizando operaciones hasta que llegue la información solicitada.

Para implementar la comunicación entre servicios, se pueden elegir diferentes tecnologías de comunicación entre procesos. Algunos de estos pueden ser mecanismos síncronos basados en solicitudes y respuestas, como lo es REST basado en HTTP (Hypertext Transfer Protocol) [17], gRPC (Remote Procedure Call) [18] o Thrift [19]. Por otro lado, también pueden utilizarse tecnologías para comunicación asíncrona basadas en mensajes, tales como AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) [20] o STOMP (Streaming Text Oriented Messaging Protocol) [21]. Para el formato de transferencia de información pueden utilizarse varios formatos, algunos de estos pueden ser JSON (JavaScript Object Notation) [22], XML (eXtensible Markup Language) [23], y formatos binarios como Avro [24].

En la configuración de la comunicación de los microservicios, se identifican la mensajería y la comunicación basada en eventos, que están relacionadas a la interacción asíncrona:

a) Mensajería. - Esta configuración quita la necesidad de que los servicios se comuniquen entre sí, y para resolver las peticiones, se implementa un agente de mensajes que administra y gestiona las peticiones y respuestas de todos los servicios; b) Basada en Eventos. – La comunicación entre los servicios se realiza a través de eventos que producen los servicios de manera individual, también se utiliza un agente de mensajes que registra los servicios y sus eventos asociados, posteriormente, cada servicio necesita registrarse en los eventos que quiere escuchar, y el agente responde a estos servicios cuando se ejecuta dicho evento.

Frameworks

Existen muchos frameworks que pueden ser utilizados para el desarrollo de microservicios, y en los últimos años han aparecido aún más, debido a la gran relevancia que han tomado; cada uno de estos frameworks se pueden clasificar de acuerdo a la tecnología o lenguaje de programación que tienen como base para su desarrollo, tal como se muestra en la Figura 4. Algunos de estos, ya existían desde antes que el término de microservicios apareciera, y a través del tiempo se fueron ajustando para adaptarse al paradigma.

Cada uno de estos frameworks tiene sus propias características, ventajas y desventajas, pero eso no quiere decir que uno sea mejor que otro, al contrario, debido a las características de los microservicios, pueden trabajar en conjunto para compartir la información de diferentes proyectos (servicios), y cada uno de estos puede ser utilizado dependiendo de los requerimientos o funcionalidades que se deseen desarrollar.

Framework seleccionado para la migración

Para el desarrollo de la arquitectura propuesta para el Laboratorio, se utilizó Spring Boot: es el framework más popular del lenguaje Java para el desarrollo de microservicios [25], [26], está basado en Spring el cual proporciona un conjunto de proyectos para el desarrollo full-stack, y permite la construcción de sistemas a gran escala iniciando con una arquitectura simple a partir de los componentes que lo conforman, y puede ser fácilmente integrado con otros frameworks debido al paradigma Inversión de Control. Spring Boot configura de manera ágil cualquiera de los módulos de Spring para cualquiera de las siguientes funcionalidades: gestión de datos, manejo de fallas, herramientas de integración, nube nativa, seguridad, gestión de configuración distribuida, descubrimiento de servicios, desempeño y pruebas.

Arquitectura tecnológica base

El framework de Spring [27] es una plataforma desarrollada en Java OpenSource que

provee toda la infraestructura de soporte para el desarrollo de aplicaciones Java, desde aplicaciones integradas, aplicaciones embebidas, hasta aplicaciones empresariales del lado servidor con n niveles de complejidad. Spring codifica patrones de diseño formales como objetos de primera clase para que puedan ser integrados en la elaboración de nuevas aplicaciones [28], [29]. Cuenta con dos patrones esenciales que lo diferencian:

Inversión de Control (Inversion of Control-IoC). Es un principio de diseño de software donde el flujo de ejecución de un programa se invierte respecto a los métodos de programación tradicionales. En los métodos tradicionales la interacción se expresa de forma imperativa haciendo llamadas a procedimientos o funciones. En IoC se especifican respuestas deseadas a solicitudes de datos concretos, dejando el control a la arquitectura para llevar las acciones necesarias, en el orden deseado y para el conjunto de eventos que vayan a ocurrir. IoC puede ser implementado a través de eventos o Inyección de Dependencias [30].

Inyección de Dependencias (Dependency Injection-DI). Es un patrón de diseño orientado a objetos, en el que se suministran objetos a una clase en lugar de ser la propia clase la que cree dichos objetos. Esos objetos cumplen contratos que necesitan las clases para poder funcionar, estos objetos son suministrados a través de una clase contenedora que inyectará la implementación directamente al contrato. En otras palabras, se encarga de extraer la responsabilidad de creación de instancias de un componente para delegarla a otro [31].

Spring consiste en funciones organizadas en cerca de 20 módulos, de los cuales son agrupados de acuerdo a sus funcionalidades en Contenedor Central, Acceso e Integración de Datos, Web, Programación Orientada a Aspectos (Aspect Oriented Programming-AOP), Instrumentación, Mensajería, y Pruebas, tal como se muestra en la Figura 5.

Para el proyecto no se utilizaron todos los módulos descritos anteriormente, los principales seleccionados para ser implementados en el nuevo sistema del Laboratorio fueron los siguientes módulos:

Contenedor Central

Este módulo provee la funcionalidad esencial del framework, está compuesto de los siguientes módulos: spring-core, spring-beans, spring-context. Este módulo se utilizó para desarrollar los elementos base que tendrán toda la información de los sistemas actuales, es decir las entidades que representan los objetos reales en cada proyecto.

Spring-Core/Spring-Beans. Estos módulos proveen las partes fundamentales, las cuales incluyen IoC y DI. Su núcleo principal es el uso de BeanFactory, componente que define la implementación del patrón Factory [32], y que se encarga de manejar las relaciones de los objetos a través de Beans. Se pueden soportar dos tipos de objetos: Singleton. Exis-

te únicamente una instancia compartida de un objeto con un nombre en particular, que puede ser llamado cada vez que se necesite. Es el más utilizado y se basa en un patrón del mismo nombre; Prototype. Este método define como se crea un objeto independiente cada vez que se realiza una llamada, también es conocido como non-singleton.

Spring-Context. Se encarga de definir el cómo se accederán a los objetos dentro del framework, el cual es muy similar al registro JNDI (Java Naming and Directory Interface) [33]. Este módulo hereda las características del módulo de Beans y soporta la internacionalización, propagación de eventos, carga de recursos, y una creación transparente de contextos para contenedores de servlets. También proporciona soporte para EJB (Enterprise Java Bean), JMX (Java Management Extensions), y control remoto básico.

AOP e Instrumentación

El módulo spring-aop provee la implementación de la programación orientada a aspectos [34], lo que permite definir interceptores de métodos y puntos de corte para desacoplar el código que implementa diferentes funcionalidades. Las actividades principales de las que se encarga este módulo son: persistencia, manejo de transacciones, seguridad, logging, debugging. Funciona tanto para servidores web como contenedores EJB. Este módulo fue utilizado para implementar un agente de servidor Tomcat, el cual ejecutará los micro-servicios en el servidor local del Laboratorio.

Integración/Acceso a Datos

Es la capa o grupo que se encarga de gestionar la comunicación con la información de las bases de datos y manipular de manera correcta el mapeo de la información relacional o no relacional con los objetos respectivos que los representan. Consiste en la conectividad con JDBC (Java Database Connectivity) [35], ORM (Object-Relational Mapping) [36], OXM (Object/XML or O/X Mapping) [37], JMS (Java Message Service) [38] y las operaciones de transacción respectivas. Algunas de las operaciones que se pueden realizar a través de los módulos de este grupo son: el manejo de sesiones, manejo de recursos, gestión de transacciones integradas, tratamiento de excepciones, facilidad de migración entre ORM's, y la facilidad de pruebas aisladas en diferentes fuentes de datos. El sub-módulo principal utilizado fue Spring-JDBC. Módulo encargado de proporcionar una capa de abstracción para evitar la necesidad de realizar codificación de bases de datos y el análisis de errores específicos tal como lo hacen los DBMS (DataBase Management System). También fue utilizado Spring-TX el cual admite la gestión de transacciones programáticas y declarativas para clases que implementan interfaces especiales y sus respectivos POJO's (Plain Old Java Objects); y Spring-ORM que integra una capa para el mapeo objeto-relacional de las API's con JPA e Hibernate.

Web

El módulo spring-web se encuentra en la parte superior del grupo de contexto, y se encarga de gestionar e integrar las aplicaciones web y el framework de Struts del proyecto Yakarta [39]. Algunas de las actividades que realiza son: la gestión de las peticiones multipart que pueden ocurrir al realizar cargas de archivos, y la relación de los parámetros de estas peticiones con los objetos correspondientes, también llamados objetos de dominio y objetos de negocio. También contiene un cliente HTTP y las partes relacionadas del sistema web para soporte remoto.

Por otro lado, el módulo spring-webmvc, también conocido como web-servlet, contiene la configuración necesaria para el desarrollo de aplicaciones web con una estructura MVC (Model-View-Controller) [40] o Servicios Web REST. Define una separación clara entre el dominio, los modelos y los formularios web.

Spring Boot

Spring Boot es un proyecto para simplificar y optimizar el proceso de configuración inicial y preparación de las aplicaciones para producción desarrolladas con Spring [41]. Este framework utiliza dos mecanismos principales para realizar esta tarea:

Contenedor de Aplicaciones Integrado. Permite compilar aplicaciones Web como archivos .jar las cuales pueden ser ejecutadas como aplicaciones normales de Java, siendo una alternativa a los archivos .war que son aquellas que se despliegan en los servidores de aplicaciones tales como Tomcat. Este mecanismo incorpora un servidor de aplicaciones propio que se levanta automáticamente al ejecutar la aplicación, ahorrando el tiempo de configuración de un servidor externo a la aplicación; esta característica es muy útil en la arquitectura de microservicios ya que permite distribuir las aplicaciones como imágenes para contenedores que se pueden escalar horizontalmente.

Starters. Spring Boot proporciona un conjunto de dependencias llamadas Starters que pueden ser añadidas a cualquier proyecto de manera sencilla considerando las necesidades de la aplicación. Este mecanismo tiene configuraciones por defecto que minimizan la necesidad de configuración al desarrollar nuevos sistemas. Al igual que el mecanismo anterior, no impone las dependencias y configuraciones, es decir, se pueden realizar cambios de acuerdo a las necesidades, desde el puerto en que la aplicación escuchará las peticiones, hasta la información que se mostrará al arrancar inicialmente la aplicación.

Por la facilidad de desarrollo de nuevos sistemas que ofrece Spring Boot, y la compatibilidad que tiene para la implementación de microservicios, es la razón principal por la cual se seleccionó este framework para la migración de los proyectos del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística.

Comunicación entre microservicios

Para el desarrollo de la arquitectura de esta investigación se utilizó la comunicación a través de API's RESTful. Como primera fase se decidió este método de comunicación, debido a que no existe una separación clara entre las funcionalidades de cada proyecto del Laboratorio, y antes de implementar una comunicación asíncrona, primero fue necesario enfocarse en la lógica de negocio de todo el sistema y en el desarrollo de los microservicios.

La selección del estándar RESTful API (también conocido como REST API) fue debido a la facilidad de implementación, y a que es uno de los protocolos más utilizados y populares entre los desarrolladores, se basa en el uso de comandos HTTP para realizar la mayoría de sus operaciones, sus características principales son: la definición del modelo REST para la definición de las API's, utiliza encriptación SSL (Secure Sockets Layer) [42], el lenguaje de comunicación es independiente al lenguaje de desarrollo de los microservicios, este tipo de API's permiten crear una aplicación web con operaciones CRUD (Create, Retrieve, Update, Delete).

Para entender mejor como se trabaja con este tipo de API's es necesario conocer tres términos importantes:

Recursos. Son objetos que representan algo en el sistema, los cuales en la mayoría de los casos están relacionados con información de la base de datos, los cuales pueden ser manipulados a través de métodos que operan con estos.

Colecciones. Representan un conjunto de objetos, por ejemplo, si en la base de datos se maneja información de diferentes personas, el objeto "Usuario" representaría la información de una sola persona, y la colección sería "Usuarios" representando un conjunto de personas.

URL (Uniform Resource Locator). Representa una ruta por el cual se puede ubicar a los recursos, además, también pueden indicar las operaciones a realizar con dichos recursos.

El formato de las API's desarrolladas sigue el mismo patrón y formato de las URL [43], tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Formato de las api's en la arquitectura

<i>esquema://host.dominio:puerto/directorio/recurso</i>		
<i>esquema</i>	Es el protocolo utilizado para la solicitud y recepción de datos entre los microservicios	HTTP HTTPS
<i>host</i>	Es donde se alberga el recurso a solicitar	WWW
<i>dominio</i>	El nombre del lugar donde se encuentra el contenido	Dominio-IMT
<i>puerto</i>	Número de puerto que será usado como punto de conexión	8001 8002 9000 ...
<i>directorio</i>	Define que en parte del dominio se encuentra el material solicitado	/Proyecto/Subdirectorio
<i>recurso</i>	Identifica el recurso al que se desea acceder	/Recurso

Los endpoints son los puntos de acceso o de comunicación con las API's de cada uno de los microservicios. Cada endpoint sirve como un canal de comunicación y define la ubicación desde la cual la API puede acceder a los recursos solicitados o realizar las funciones necesarias. Los endpoints desarrollados para los microservicios de esta investigación están conformados por un conjunto de URL's que definen los recursos y operaciones que se pueden realizar en cada servicio. Las operaciones implementadas en el sistema se basaron en los comandos básicos utilizados para HTTP y HTTPS: PUT, POST, DELETE, GET y PATCH. Aunque para la arquitectura de los proyectos solo fueron utilizados GET y POST; para este último se realizaron algunas modificaciones para que pudieran realizar las operaciones de Inserción, Actualización y Borrado a la vez.

Existen diferentes tipos de parámetros [44] que se pueden enviar a los endpoints: Path, Header-Form, Body y Query.

Los parámetros Path se encuentran en el URI tal como si fuera una dirección web, y en la mayoría de los casos son utilizados para reducir el alcance de la petición a un recurso individual, o para definir una operación específica dentro del servicio. Un ejemplo claro se puede observar cómo `.../{a}/{b}` donde `a` define el nombre del recurso que se desea acceder y `b` es el parámetro que se envía en la petición, tal como el nombre de un usuario o un identificador en la información.

El parámetro Body indica cuando se crea un conjunto de datos dentro de la petición, pero no se muestra directamente en la URI, también se le denomina como carga útil. Esta información debe tener un formato específico tal como JSON o XML, aunque existen algunas API's que también manejan YAML, información binaria o hexadecimal. Para el caso de esta investigación se utilizó el formato JSON.

Los parámetros Query son un caso especial de parámetros que permiten cambiar el alcance de las peticiones realizadas a un subconjunto del total de la información solicitada. Por ejemplo, al solicitar la información de usuarios en el sistema y limitar la respuesta a usuarios con un nombre o apellido en específico. ¿Estos parámetros se encuentran al final de la URI y se identifican como todas las variables que siguen después de un símbolo ?, en el siguiente caso `.../{a}/{b}?c=x` la *c* indica el nombre del parámetro y la *x* indica el valor de dicho parámetro. Estos parámetros siempre se identificarán con un formato de clave-valor.

Los parámetros Header-Form son aquellos datos que describen la carga útil de la petición, el tipo de contenido que se manejará en la solicitud, el lenguaje, información de autenticación y autorización, entre otros datos. También son definidos como clave-valor, pero estos no pueden observarse directamente en la URI de la solicitud.

En la Tabla 2 se puede observar la estructura base de las peticiones a la arquitectura de microservicios desarrollada. Debido a que son varios servicios por proyecto, se generalizan las operaciones y no se explica a detalle ninguno de estos.

Para el desarrollo de las API's de cada microservicio, es necesario seguir algunas normativas dependiendo del estado de respuesta de las peticiones. En este sentido, el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (Internet Engineering Task Force IETF) [45], organismo internacional encargado de desarrollar los estándares de Internet, definieron un conjunto de códigos que explican la respuesta que los sistemas web deberían devolver en caso de ciertas situaciones.

Tabla 2. Formato de las api's en la arquitectura

Operación	Método	URI	Parámetro	Resultado
Consulta	GET	<code>.../{recurso}/{id}</code>	<i>Query</i>	Recurso con el identificador solicitado
Creación		<code>.../{recurso}</code>	<i>Body</i>	Creación del recurso con la información enviada en el Body
Actualización	POST	<code>.../{recurso}/{id}</code>	<i>Body</i>	Cuando el recurso exista, sobrescribirá la información enviada en el Body
Eliminación		<code>.../{recurso}/{id}</code>	<i>Path</i>	Eliminación del recurso

Dentro de cada clasificación existe un gran número de códigos, pero inicialmente para esta investigación, solo fueron implementados algunos de estos, y así, como se vayan desarrollando nuevas versiones del sistema, se irán implementando los códigos restantes. Los códigos seleccionados a partir del estándar “RFC9110 HTTP Semantics” fueron:

Tabla 3. Códigos de estado recibos en peticiones

Código del Estado	Descripción	Explicación
200	Ok	La solicitud se realizó con éxito.
201	Created	La solicitud se realizó con éxito y se ha creado un nuevo recurso.
400	Bad Request	El servidor no puede interpretar la solicitud.
401	Unauthorized	Es necesaria la autenticación para obtener la respuesta de la solicitud.
403	Forbidden	El cliente no posee los permisos necesarios para el contenido de esta petición.

Fuente: Elaboración propia con base en el estándar RFC 9110 HTTP Semantics [46]

Arquitectura propuesta

La arquitectura final propuesta y desarrollada en esta investigación fue elaborada a través de la identificación de las funcionalidades de los proyectos del Laboratorio. Debido a que cada proyecto cuenta con muchas secciones, se elaboró un diagrama abstracto que muestra la interacción entre los componentes principales de la arquitectura, el cual se puede observar en la Figura 4.2:

Actualmente, los microservicios son desarrollados con Spring Boot, pero esto no evita que para proyectos futuros sea necesario utilizar este framework, al contrario, pueden ser desarrollados con cualquier plataforma y lenguaje de programación siempre y cuando cumplan los protocolos de comunicación REST, al menos para esta versión de la arquitectura.

Por otro lado, cada proyecto se encuentra configurado en un servidor virtual, y aunque todas cuentan con sistema operativo de Microsoft, las configuraciones técnicas de cada servidor varían.

Tecnologías utilizadas en la implementación

Para la definición y desarrollo de la arquitectura completa, fue necesario utilizar distintas tecnologías para la comunicación, monitoreo, redireccionamiento, bases de datos, gestión de cargas, entre otras tareas necesarias para la arquitectura. Estas tecnologías se describen a continuación:

Tomcat. Servidor que funciona como contenedor de servlets desarrollado bajo el proyecto Jakarta en la Fundación de Apache Software.

Node.JS. Entorno en tiempo de ejecución multiplataforma, OpenSource, para la capa de servidor basado en el lenguaje de programación JavaScript, asíncrono, con una arquitectura orientada a eventos y basado en el motor V8 de Google.

React. Es una biblioteca de Javascript para la creación de interfaces de usuario interactivas de forma sencilla, con la capacidad de actualizar y renderizar de manera eficiente los componentes.

Microsoft IIS. Servidor web que contiene un conjunto de servicios para los sistemas operativos de Microsoft.

Spring Cloud Config Server. Proporciona el soporte para la configuración externalizada de un sistema distribuido del lado servidor y del lado cliente.

Yaml. Es un formato de serialización de datos legible por humanos, inspirado en XML, C, Python, Perl y otros formatos de correos electrónicos.

Maven. Herramienta para la gestión y construcción de proyectos, se basa en el concepto de un modelo de objetos de proyecto (Project Object Model POM), y gestiona la construcción, los informes y la documentación de un proyecto desde una pieza central de información.

GitHub. Es una plataforma de integración de código para desarrolladores que utiliza el sistema de control de versiones Git.

Spring Gateway. Es un proyecto dentro de Spring que se encarga de proporcionar una biblioteca que define el punto de entrada al ecosistema de microservicios, propiciando enrutamiento dinámico, seguridad y monitorización de las llamadas que se realicen.

Spring Load Balancer. Biblioteca dentro de Spring que ofrece la capacidad de distribuir el tráfico de los procesos en un conjunto de instancias diferentes de la misma aplicación.

Spring Eureka Server. Es un servicio REST, ofrecido por Spring, que se comporta como un servidor que registra y localiza microservicios en un ecosistema. Proporciona información de su localización, su estado y datos relevantes de cada uno de estos servicios.

PostgreSQL. Es un sistema de gestión de bases de datos relacional orientado a objetos y de código abierto.

Elastic Stack. Plataforma de búsqueda y análisis compuesto por un conjunto de tres proyectos OpenSource, a) Logstash. Es un motor de búsqueda y analítica distribuido, gratuito y abierto para todos los tipos de datos: textuales, numéricos, geoespaciales, estructurados y no estructurados. b) Elasticsearch. Es un pipeline de procesamiento de datos OpenSource y del lado del servidor que te permite ingresar datos de múltiples fuentes simultáneamente y transformarlos. c) Kibana. Es una herramienta de visualización y gestión de datos para Elasticsearch que brinda histogramas en tiempo real, gráficos circulares y mapas. Kibana también incluye aplicaciones avanzadas, como Canvas, que permite a los usuarios crear infografías dinámicas personalizadas con base en sus datos, y Elastic Maps para visualizar los datos geoespaciales.

Establecimiento de niveles en Gateways

Existen tres puertas de enlace diferentes a lo largo de la infraestructura, y cada una se encarga de gestionar la conexión entre componentes de diferente nivel.

Gateway IMT. Esta puerta de enlace se encuentra configurada por el área de sistemas del IMT, y no tiene una relación directa con la arquitectura, sin embargo, debe ser considerada ya que aquí se definen las direcciones y conexiones a los servidores virtuales donde se encuentran los proyectos.

Gateway Local. Esta puerta de enlace se encarga del redireccionamiento dentro del servidor virtual, dentro de cada servidor virtual existen “N” servidores de aplicaciones con diferentes funciones. Algunos ejemplos de los servidores que se pueden encontrar son Tomcat y Node.js, los cuales principalmente son utilizados para las aplicaciones web que el usuario final utilizará en Internet.

API Gateway. Esta puerta de enlace se encarga de administrar y gestionar las peticiones a las API's de cada uno de los microservicios, además, se encarga de validar la información de autenticación de los usuarios que realizan las peticiones.

Proyectos en migración

En el Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística se han desarrollado e implementado una gran cantidad proyectos de investigación y desarrollo con la industria regional, nacional y a nivel América del Norte[1], de los cuales, se pueden identificar tres proyectos principales: a) LogistiX Lab: Laboratorio de Logística Urbana; b) EraclituX: Mapa Digital de Autotransporte; c) IMT-X: Vehículos Aéreos Autónomos no Tripulados

Dentro de cada uno de estos proyectos [2], se han elaborado un conjunto de sub-proyectos de los cuales se han obtenido artículos científicos publicados en conferencias y revistas internacionales, y en publicaciones técnicas del Instituto Mexicano del Transporte. La idea de esta investigación fue, la definición e implementación de una arquitectura que sirviera como base para la migración de cada uno de los proyectos y sub-proyectos dentro del laboratorio, con el objetivo de desarrollar un sistema que permitiera la compatibilidad para comunicarse entre estos, que fuera escalable, resiliente, seguro, y ofreciera una implementación sencilla para los nuevos proyectos a desarrollar.

Uno de los proyectos es la Arquitectura Tecnológica Integrada para Internet de las Cosas encontrada en la Publicación Técnica No. 664 [47] del IMT y las fases que continúan en desarrollo actualmente; este proyecto define una arquitectura funcional de IoT para la gestión efectiva de bahías de carga y descarga de mercancías, y se encuentra ligado al Primer Laboratorio de Logística Urbana en Tiempo Real de América Latina LogistiX-Lab.

La investigación realizada en este proyecto apoya la definición del sistema backend del proyecto descrito anteriormente, del cual, se generó un manual de usuario para desarrolladores, donde se describe de manera precisa, el uso de la API para este proyecto, las condiciones de uso, el versionamiento y la información detallada de la aplicación de un microservicio desarrollado con esta arquitectura, esto se puede observar en el Anexo 1 de este documento. También, para poder visualizar el código desarrollado, en el Anexo 1, en la sección de “Introducción a la API”, se encuentra la dirección de GitHub del repositorio que contiene el microservicio.

Actualmente, para el uso del endpoint de este microservicio, es necesario solicitar acceso al proyecto, debido a que se encuentra en versión Beta, aún no se encuentra disponible de manera pública, ni el código ni el dominio. Para conocer la liberación de los productos, se puede dar seguimiento al Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística en su cuenta de GitHub.

Conclusiones

Actualmente, la implementación de soluciones digitales para las operaciones ha incrementado debido a los avances tecnológicos, y al auge y aplicación de nuevas tecnologías. Por esta razón, la arquitectura monolítica ha comenzado a ser obsoleta para cubrir las necesidades de la actualización de los sistemas y aplicaciones utilizadas día con día. La arquitectura de microservicios ofrece una solución novedosa para la actualización de sistemas heredados, ofreciendo mayor flexibilidad en el desarrollo de aplicaciones, sistemas escalables y con costos operativos más bajos, además de reducir la complejidad del proceso de desarrollo de software. El Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística, como parte de los Laboratorios Nacionales CONACyT que ofrecen infraestructura interinstitucional distribuida a nivel nacional, también tiene la necesidad de mantener su infraestructura tecnológica actualizada, para desarrollar proyectos nacionales e internacionales de manera eficiente.

Dentro del SiTLog Lab se han desarrollado proyectos representativos, los cuales han sido desarrollados e implementados con una arquitectura monolítica, lo que ha impedido el ágil desarrollo para las nuevas funcionalidades solicitadas de nuevos proyectos. Es por esta razón, que se desarrolló en esta investigación una nueva arquitectura que cubriera estos huecos y problemas, y optimizara las capacidades de cada aplicación dentro de los proyectos.

La arquitectura propuesta e implementada ha sido favorable para cubrir las necesidades antes mencionadas., Actualmente ya se comenzó a utilizar en otros proyectos, como una alternativa eficaz para su planificación, brindando la oportunidad de comunicación con sistemas ya existentes que ofrezcan capacidades que aún no se tengan en el sistema ac-

tual, y con la ventaja de evitar nuevamente el desarrollo de estas funciones, por ejemplo, los sistemas de ruteo de INEGI o de Google Maps.

Por otro lado, los microservicios que se han desarrollado en esta aplicación, se encuentran en desarrollo continuo sin la necesidad de que el sistema este deshabilitado, debido a la independencia de las funcionalidades. Es por eso que a pesar de ya encontrarse la API disponible para acceso dentro del IMT, se continúan desarrollando microservicios con nuevas funciones.

Finalmente, este proyecto continuará en desarrollo, para la implementación de otros protocolos de comunicación, o la migración de los microservicios a un paradigma de contenedores y clústeres. Por esta razón, se recomienda mantenerse actualizado en la página de GitHub del Laboratorio, así como en contacto con los desarrolladores que conocen el versionamiento de las diferentes aplicaciones.

Reconocimientos

Se agradece a CONACyT y al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por apoyar las investigaciones realizadas dentro del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística.

Referencias

- [1] Instituto Mexicano del Transporte [IMT], “Laboratorio Nacional. Sistemas de Transporte y Logística,” 2021. <https://lab-nacional-logistica.imt.mx/>
- [2] Instituto Mexicano del Transporte [IMT], “Folleto LABORATORIO NACIONAL EN SISTEMAS DE TRANSPORTE Y LOGÍSTICA (SiT-LOG),” 2021. <https://imt.mx/images/files/GRAL/documentos/Folleto-SiT-LogLab.pdf>
- [3] D. Ramírez, “Industria 4.0 en México tiene terreno por desarrollar,” t21, 2019. [Online]. Available: <http://t21.com.mx/logistica/2019/09/17/industria-40-mexico-tiene-terreno-desarrollar>
- [4] N. Gómez, E. Abarca, and A. Mendoza, “Uso de nuevas tecnologías y plataformas digitales para la gestión de la seguridad y operación del transporte,” NOTAS núm. 197, MAYO-JUNIO 2022, artículo 2, 2022. [Online]. Available: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=558&IdBoletin=198#:~:text=“Los Sistemas Inteligentes de Transporte,y seguridad en los mismos”>.
- [5] B. Hernández Sánchez, M. G. Cedillo-Campos, and M. Barrón Bastida, “IMTx : RPAS autónomo para transporte y logística,” in INTELIGENCIA COLECTIVA EN LOGÍSTICA, Primera Ed., M. G. Cedillo Campo, M. P. Acosta Quintana, E. A. Lagarda Leyva, J.

Cuevas Ortuño, and A. Bueno Solano, Eds. Asociación Mexicana de Logística y Cadena de Suministro A.C. ; Instituto Tecnológico de Sonora, 2018, p. 362.

[6] Transporte, “El mapa interactivo de logística para transporte de carga,” Transporte.mx, 2018. [Online]. Available: <https://transporte.mx/el-mapa-interactivo-de-logistica-para-transporte-de-carga/>

[7] Instituto Mexicano del Transporte, “Primer Laboratorio en Tiempo Real de Logística Urbana en América Latina,” 2018. <https://www.gob.mx/imt/articulos/primer-laboratorio-en-tiempo-real-de-logistica-urbana-en-america-latina>

[8] MarketsAndMarkets, “Cloud Microservices Market by Component (Platform and Services), Deployment Mode (Public Cloud, Private Cloud, and Hybrid Cloud), Organization Size (Large Enterprises and SMEs), Vertical, and Region - Global Forecast to 2023,” Jun. 2018. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/cloud-microservices-market-60685450.html>

[9] Microsoft, “Chapter 1: Service Oriented Architecture (SOA),” 2014. <https://web.archive.org/web/20140321085658/http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb833022.aspx>

[10] World Wide Web Consortium [W3C], “SOAP Version 1.2 Part 0: Primer (Second Edition),” Apr. 27, 2007. <https://www.w3.org/TR/2007/REC-soap12-part0-20070427/>

[11] R. Fielding and R. N. Taylor, “Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures,” University of California, Irvine, 2000. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/932295>

[12] P. Rodgers, “Service-Oriented Development on NetKernel- Patterns, Processes & Products to Reduce System Complexity,” 2005. <https://web.archive.org/web/20180520124343/http://www.cloudcomputingexpo.com/node/80883>

[13] N. Dragoni et al., “Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow,” in Present and Ulterior Software Engineering, Mazzara Manuel and B. and Meyer, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 195–216. doi: 10.1007/978-3-319-67425-4_12.

[14] J. Lewis, “Micro services - Java, the Unix Way,” Mar. 19, 2012. <http://2012.33degree.org/talk/show/67>

[15] A. Cockcroft, “Architectural Patterns for High Availability,” Apr. 09, 2013. <https://www.infoq.com/presentations/Netflix-Architecture/>

[16] Google, “Refactoring a monolith into microservices,” 2022. https://cloud.google.com/architecture/microservices-architecture-refactoring-monoliths#design_interservice_communication

[17] R. Fielding et al., “Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1,” Jun. 1999. doi: 10.17487/rfc2616.

- [18] gRPC Authors, “gRPC,” 2022. <https://grpc.io/>
- [19] Apache Software Foundation, “Apache Thrift,” 2022. <https://thrift.apache.org/>
- [20] OASIS, “AMQP Advanced Message Queuing Protocol,” 2022. <https://www.amqp.org/>
- [21] Google, “STOMP The Simple Text Oriented Messaging Protocol,” 2022. <https://stomp.github.io/>
- [22] Ecma International, “The JSON data interchange syntax,” 2017. <https://www.ecma-international.org/publications-and-standards/standards/ecma-404/>
- [23] World Wide Web Consortium [W3C], “XML,” 2020. <https://www.w3.org/XML/>
- [24] The Apache Software Foundation, “Apache Avro,” 2021. <https://avro.apache.org/>
- [25] Gradle Enterprise, “Spring Boot Repositorio GitHub,” 2022. <https://github.com/spring-projects/spring-boot> (accessed Jun. 09, 2022).
- [26] I. VMware, “Spring Boot,” 2022. <https://spring.io/projects/spring-boot>
- [27] SpringSource, “Overview of Spring Framework Version 5.0.0.RC2,” 2017. <https://docs.spring.io/spring-framework/docs/5.0.0.RC2/spring-framework-reference/overview.html>
- [28] R. E. Johnson and B. Foote, “Designing Reusable Classes,” J. Object-Oriented Program. , vol. 1, no. 2, pp. 22–35, Jun. 1988.
- [29] M. Mattsson, “Object-Oriented Frameworks,” Jul. 1999.
- [30] M. Fowler, “Inversion of Control Containers and the Dependency Injection pattern,” 2004. <https://www.martinfowler.com/articles/injection.html>
- [31] CDI Repository Contributors, “What is CDI?,” 2022. <https://www.cdi-spec.org/>
- [32] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, and J. Vlissides, Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software, 1st ed. Addison-Wesley Professional, 1994.
- [33] Oracle, “Lesson: Overview of JNDI,” 2022. <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/jndi/overview/index.html>
- [34] J. Clarke, “Platform-Level Defenses,” in SQL Injection Attacks and Defense, Elsevier, 2009, pp. 377–413. doi: 10.1016/B978-1-59749-424-3.00009-8.
- [35] IBM, “What is JDBC?,” 2021. <https://www.ibm.com/docs/es/developer-for-zos/9.5.1?topic=support-what-is-jdbc>
- [36] RedHat, “Hibernate ORM,” 2022. <https://hibernate.org/orm/what-is-an-orm/>
- [37] The Eclipse Foundation, “About Object-XML Mapping,” 2017. <https://www.eclipse>.

org/eclipselink/documentation/2.4/concepts/blocks002.htm

[38] Q. H. Mahmoud, "Getting Started with Java Message Service (JMS)," 2004. <https://www.oracle.com/technical-resources/articles/java/intro-java-message-service.html>

[39] The Apache Software Foundation, "Apache Struts," 2022. <https://struts.apache.org/>

[40] Microsoft, "ASP.NET MVC Overview," 2020. <https://docs.microsoft.com/en-us/asp-net/mvc/overview/older-versions-1/overview/asp-net-mvc-overview>

[41] R. Pahino, "¿Qué son Spring framework y Spring Boot? Tu primer programa Java con este framework," 2020. <https://www.campusmvp.es/recursos/post/que-son-spring-framework-y-spring-boot-tu-primer-programa-java-con-este-framework.aspx>

[42] The OpenSSL Project Authors, "Welcome to OpenSSL!," 2021. <https://www.openssl.org/>

[43] Internet Engineering Task Force [IETF], "Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax," 2022. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3986>

[44] Internet Engineering Task Force [IETF], "Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content," 2014. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7231>

[45] Internet Engineering Task Force [IETF], "Standards process," 2022. <https://www.ietf.org/standards/process/>

[46] R. Fielding, M. Nottingham, and J. Reschke, "RFC 9110 HTTP Semantics," 2022. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9110.html>

[47] B. Hernández Sánchez, M. Barrón, and M. G. Cedillo, "IoT : Arquitectura tecnológica integrada (Fase 1)," 2021. [Online]. Available: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt664.pdf>

[48] Google, "Google Trends," 2022. [https://trends.google.es/trends/explore?date=2010-09-05 2022-06-09&q=Spring Boot,Django REST,%2Fm%2F0_v2srx,%2Fm%2F0dgs72v,%2Fm%2F0505cl](https://trends.google.es/trends/explore?date=2010-09-05%2022-06-09&q=Spring%20Boot,Django%20REST,%2Fm%2F0_v2srx,%2Fm%2F0dgs72v,%2Fm%2F0505cl)

[49] Sumerge, "What is Microservices Architecture?," Nov. 09, 2020. <https://www.sumerge.com/what-is-microservices-architecture/>

[50] R. Kiran and K. Kumar, "Top Microservices Frameworks," May 29, 2021. <https://dzone.com/articles/top-microservices-frameworks>

Capítulo 2

Tecnología e innovación hacia la ciudad inteligente. Aplicación para la gestión de bahías de carga/descarga

M.GTI Bernardo Hernández Sánchez, Dr. Cesar J. Montiel Moctezuma, Dr.
Miguel Gastón Cedillo Campos, M.TW Marisol Barrón Bastida

Resumen— Este artículo presenta los resultados del desarrollo de una plataforma digital llamada “Aplicación para la gestión de bahías de carga y descarga”. El módulo de mejora implementado permite controlar los tiempos de uso de los espacios públicos en zonas urbanas, mediante el registro de empresas y su asignación de horarios. El desarrollo se basa en software libre y el uso de dispositivos electrónicos con tecnología LPWAN (Red de baja potencia y larga distancia) de Internet de las Cosas (IoT). La tecnología también puede ser utilizada para monitorear el tráfico en tiempo real y ajustar las rutas de entrega para evitar congestiones y reducir los tiempos de espera. Esto no solo mejora la eficiencia del transporte, sino que también reduce la contaminación ambiental y el ruido en las áreas urbanas. Los resultados obtenidos de la “Aplicación para la gestión de bahías de carga y descarga” son prometedores. La plataforma tiene el potencial de mejorar la eficiencia del transporte, reducir la contaminación ambiental y el ruido en las áreas urbanas. Además de tener el potencial de ser implementada en otras ciudades y países.}

Palabras Clave— Internet de las Cosas; Sensorizado; Tecnología; Innovación urbana; Transporte; Ciudad Inteligente.

Introducción

En este proyecto, se emplea la tecnología de innovación urbana y el Internet de las Cosas o “*Internet of Things*” (IoT), para el desarrollo de una plataforma web para la gestión de bahías de carga/descarga de mercancías en las zonas urbanas. A través de la implementación de sensores y dispositivos IoT, se obtiene información en tiempo real acerca

de la ocupación y disponibilidad de estas áreas, proporcionando a los conductores la conveniencia de encontrar rápidamente espacios para estacionar y efectuar la descarga de sus mercaderías [8]. La tecnología también puede ser utilizada para monitorear el tráfico en tiempo real y ajustar las rutas de entrega para evitar congestiones y reducir los tiempos de espera. De esta forma, se mejora la eficiencia del transporte y se disminuye la contaminación ambiental y el ruido en las áreas urbanas.

Otro importante concepto es el de “ciudad inteligente”, o también conocido como *Smart City*. Una ciudad inteligente es una ciudad que utiliza tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para aumentar la eficiencia de los servicios públicos, reducir su huella de carbono y mejorar la gestión urbana para mejorar la calidad de vida de sus habitantes. [1]. Estas tecnologías y soluciones incluyen sensores IoT, sistemas de información y comunicación avanzados, análisis de datos en tiempo real y soluciones de automatización.

Las “ciudades inteligentes” son aquellas que aprovechan el potencial de la tecnología para recoger y analizar datos en tiempo real sobre diversos aspectos de la vida urbana. Con esta información, las autoridades y los ciudadanos pueden tomar mejores decisiones, optimizar los recursos y reducir el impacto ambiental [2]. El propósito de las ciudades inteligentes es crear un entorno urbano más sostenible, seguro, saludable y conectado, lo que implica mejorar aspectos como la movilidad y el transporte, la eficiencia energética, la gestión de residuos, el suministro de agua y la calidad del aire [3].

En el contexto internacional, un ejemplo de ciudad inteligente que ha implementado una serie de soluciones tecnológicas para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos, y con ello, reducir su huella de carbono, es Barcelona, España. Barcelona ha introducido sensores IoT en su luminaria para medir la calidad del aire, la temperatura, y la humedad, y ha implementado un sistema de transporte público inteligente que utiliza una aplicación para ayudar a los usuarios a planificar sus viajes.

Otro ejemplo es Singapur cuya visión de ciudad inteligente de, impulsada por la Oficina de la Nación Inteligente y su Gobierno Digital, tienen planes para garantizar que los esfuerzos de innovación emprendidos ayuden a sus ciudadanos a llevar una vida plena gracias a la tecnología [5]. Singapur utiliza cientos de miles de sensores para monitorear el consumo energético, la generación de residuos, el uso del agua potable y residual, así como el tráfico en tiempo real. Estos datos se utilizan para mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad de vida de los habitantes [25]. El uso de sensores para monitorear estos datos ha tenido un impacto positivo en Singapur. El país ha reducido su consumo de energía, su generación de residuos y su uso de agua. También ha reducido las congestiones de tráfico y ha mejorado la calidad de vida de sus habitantes. Singapur es un ejemplo de cómo las ciudades pueden utilizar las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para mejorar su eficiencia, su sostenibilidad y la calidad de vida de sus habitantes.

En América Latina, el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) de México realizó un análisis en 2020 para conocer el desarrollo del mercado mundial de IoT. El análisis utilizó técnicas de Ciencia de Datos, lo que permitió identificar patrones de comercialización en el ecosistema de IoT, tanto de proyectos como de empresas que ofrecen este tipo de servicios. Se logró documentar 2,780 proyectos de IoT a nivel mundial. En promedio, hay 27 proyectos de IoT por país. Los países con más proyectos de IoT son Estados Unidos (959), Reino Unido (423), Canadá (108), Alemania (104), España (98) e Italia (63).

La figura 1 muestra la distribución de los proyectos de IoT por país. Como se puede ver, Estados Unidos es el país con más proyectos de IoT, seguido del Reino Unido, Canadá, Alemania, España e Italia. El análisis del IFT muestra que el mercado de IoT está creciendo rápidamente a nivel mundial. Los Estados Unidos son el país líder en el desarrollo de proyectos de IoT, seguidos del Reino Unido, Canadá, Alemania, España e Italia. Se espera que el mercado de IoT continúe creciendo en los próximos años, impulsado por el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones.

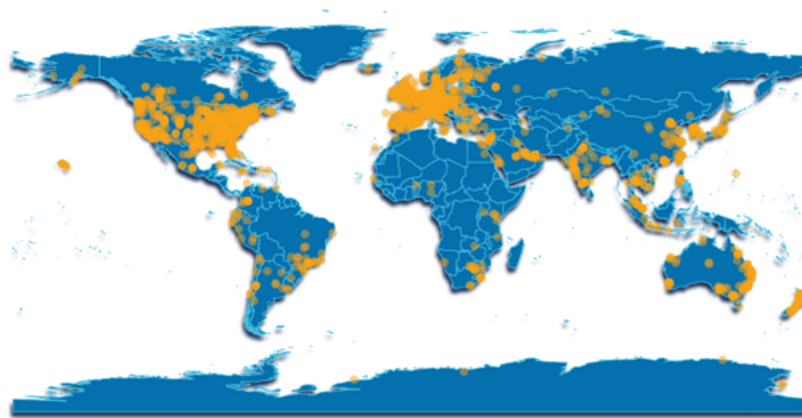


Figura 1. Despliegue IoT en el mundo (cantidad de dispositivos conectados). Fuente: IFT con datos de Global Data (2020).

Por otro lado, a nivel global se observa una asociación notablemente positiva entre proyectos que involucran más de 10,000 dispositivos conectados y las tecnologías de largo alcance y baja potencia (LPWA por sus siglas en inglés). En contraste, las tecnologías celulares (3G, 4G LTE y 5G) muestran una correlación más marcada con proyectos de escala relativamente pequeña (con menos de 100 dispositivos conectados) [7].

En los proyectos de IoT, las tecnologías de conectividad más utilizadas son:

Corto alcance (RFID, NFC, Bluetooth, Zigbee y Z-Wave): 42%

Celular: 30%

Alámbrica (conexión con cables de cobre, fibra óptica, etc.): 15%

LPWA: 9%

Satélites: 3%.

La figura 2 muestra la distribución de las tecnologías de conectividad utilizadas en los proyectos de IoT. Como se puede ver, la tecnología de corto alcance es la más utilizada, seguida de la tecnología celular. Las tecnologías inalámbricas de largo alcance (LPWA) y satelitales son menos utilizadas, pero están creciendo en popularidad.

Las redes 5G son una nueva tecnología de banda ancha móvil que ofrece velocidades de datos mucho más altas que las redes 4G LTE. Esto las hace ideales para aplicaciones de IoT que requieren una gran cantidad de datos, como el seguimiento de activos, la automatización de edificios y la conducción autónoma. Se espera que las redes 5G jueguen un papel importante en el futuro de IoT.

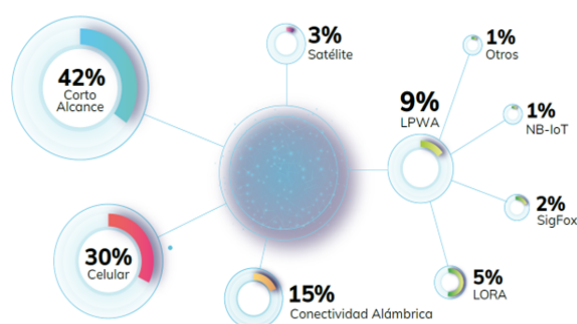


Figura 2. Tecnologías de conectividad más utilizadas en proyectos. Fuente: IFT con base a los datos obtenidos con la técnica *web scraping*.

En el contexto anterior, este artículo presenta los resultados de nuevos módulos que complementan la funcionalidad de una plataforma tecnológica basada en software libre, diseñada para mejorar la fluidez en el movimiento de las mercancías distribuidas en zonas urbanas. Esta herramienta impulsa el desarrollo de nuevas aplicaciones IoT que favorecen la gestión de la infraestructura urbana en México. La originalidad de este trabajo radica en el contexto y la metodología empleados para desarrollar e implementar dichos módulos.

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: En la **Sección II** se describen los antecedentes que dieron origen al desarrollo del proyecto de la aplicación

para la gestión de bahías de carga/descarga. En la **Sección III** se describe el nuevo módulo de gestión de tiempos de uso de las bahías de carga/descarga, que complementa a la funcionalidad de la plataforma existente. En la **Sección IV** se describen los detalles de la implementación del módulo de seguridad en el servidor de la plataforma web. En la **Sección V** se exponen las conclusiones finales.

Antecedentes

De acuerdo con Cedillo-Campos y Fransoo (2019) [9] y Fransoo y Cedillo-Campos (2022) [10], Los hallazgos del proyecto LogistiXLab han puesto de manifiesto que la presencia de zonas de carga y descarga en lugares de alta concentración de puntos de entrega resulta fundamental para potenciar la eficacia de las rutas de transporte. Esto no solo reduce el tiempo de estacionamiento, sino que también minimiza tanto el ruido como la contaminación en las áreas urbanas. Pero no sólo eso, también permite disminuir costos logísticos de las cadenas de suministro interurbanas, 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 multidimensional mejorando la confiabilidad de las cadenas de suministro desde una perspectiva integrada *“puerta a puerta”*.

Teniendo en cuenta la necesidad de una solución tecnológica para automatizar la gestión de las zonas de carga/descarga en áreas urbanas, en 2022 se llevó a cabo un proyecto denominado “Plataforma tecnológica para la gestión de bahías de carga y descarga de mercancías en espacios públicos, etapa 2”. Este proyecto resultó en el desarrollo de un módulo de software para la gestión del tiempo de uso de los espacios de bahías de carga/descarga, que complementa la plataforma informática desarrollada en 2021. Esta propuesta tecnológica tiene como objetivo mejorar la eficiencia y efectividad de las operaciones de carga/descarga en áreas urbanas.

Durante la fase inicial de desarrollo, utilizamos un modelo de referencia de cuatro capas. La figura 3 muestra el diagrama general de conectividad utilizando este modelo. Este enfoque nos permitió organizar y estructurar los distintos componentes del sistema de forma clara y eficaz.

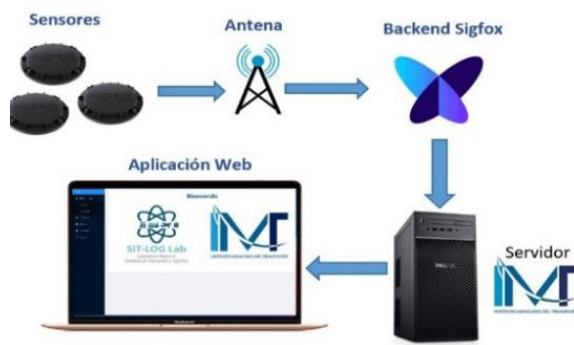


Figura 3. Diagrama de conectividad IoT. Fuente: elaboración propia.

Plataforma gestión de bahías (el inicio)

En la primera fase del desarrollo se implementó una aplicación web, la pantalla principal de la aplicación, como se muestra en la Figura 4, ilustra la vista inicial de la plataforma de gestión. Observamos el menú principal en la sección lateral izquierda de la figura, en este menú se incluyen primeras zonas consideradas en la fase del proyecto. Esta disposición proporciona una visión clara y organizada de las características de la plataforma y permite a los usuarios navegar fácilmente por las distintas secciones.

En la sección principal del sistema, se incluyen las opciones para la operación y gestión de las bahías en las zonas indicadas, así mismo, hay una sección para crear informes y realizar “*analítica*” para la toma de decisiones. Como se puede observar en la figura, la vista principal se diseñó como una pantalla simple para no complicar su uso, pero detrás de la simpleza está la funcionalidad que la soporta con módulos que interactúan con base al modelo de comunicación de cuatro capas descrito en una publicación anterior, Hernández-Sánchez et al. (2021).



Figura 4. Pantalla principal de la plataforma de gestión de bahías de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.

Operación de las bahías de carga/descarga

En la Figura 5 se ilustra la operación general de las bahías de prueba. En la parte superior izquierda de la figura, se encuentra la sección “**Alarmas**”, donde se muestran los eventos que requerirán una atención inmediata, para ello, se lanzará una alarma para los vehículos que hagan uso de alguna de las bahías y que “no sean identificados” como usuarios válidos en el sistema.

Así mismo, en sección identificada como “**Operación**” se muestran los eventos que son considerados como acciones normales, son: eventos “libre” y usuario “validado”. Hacia la parte media de la figura 5, se muestran las bahías disponibles para un usuario válido. Se incluye un mapa con la ubicación geográfica de las bahías con un color que cambia de acuerdo con el evento en tiempo real. También se ilustra la Tabla de “Historial”, la cual, lista los registros por evento de las bahías, la fecha inicio y fin en que sucedió el evento y su tiempo de duración.

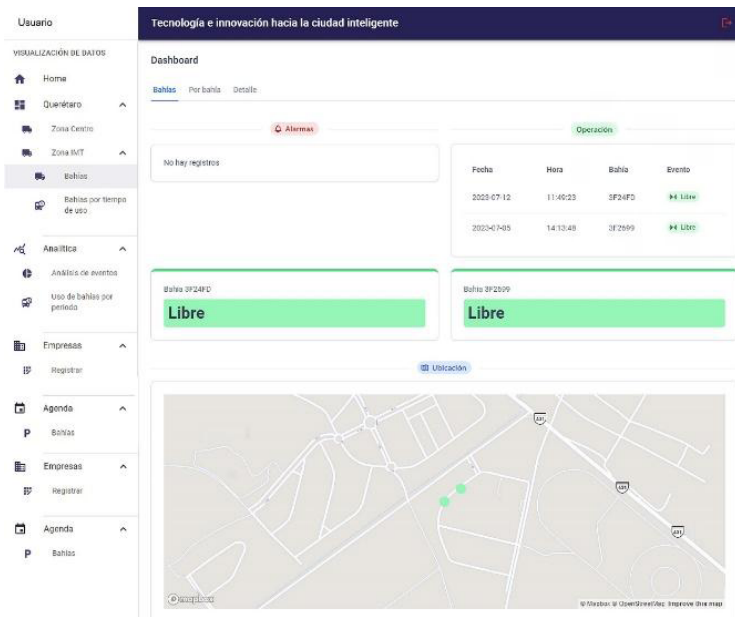


Figura 5. Sección que muestra la operación de bahías de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.

Estados de las bahías

La bahía de estacionamiento tiene varios estados definidos por un color de acuerdo con el evento, cada evento es identificado con un color, por ejemplo, bahía libre en color verde, bahía ocupada en color naranja, usuario validado en color amarillo y usuario no identificado en color rojo. Ver Figura 6.

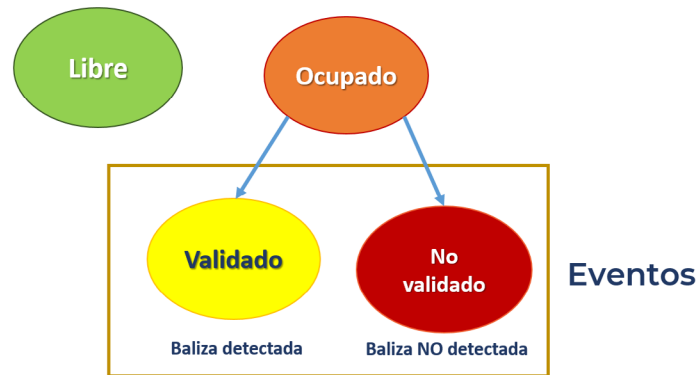


Figura 6. Estados de la ocupación de bahías de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.

Módulo de Gestión de Tiempo de uso de Bahía

En esta sección se presentan los resultados del desarrollo de un nuevo módulo para la plataforma de gestión de tiempos de uso de las bahías de carga/descarga de mercancías en zonas urbanas. En la Figura 7, se observa la pantalla en donde las nuevas empresas se dan de “alta” con sus datos como: nombre, datos generales del conductor de la empresa y los datos del vehículo que se autorizará para el uso de las bahías.

De esta forma, se llevará un control de las empresas dadas de alta para el uso de ciertas bahías, es decir, una vez registrada y validada por el sistema, la empresa podrá gestionar y calendarizar el uso de las bahías por tiempos definidos de acuerdo a su necesidad de entregas en la zona.

Figura 7. Vista para el registro de empresas. Fuente: elaboración propia.

Posterior a ello, tendrá la facultad de agendar tiempos de uso por bahía para los vehículos registrados. En la Figura 8 se muestra el calendario con la disponibilidad de horarios. Para su identificación de manera rápida y fácil, se definieron colores para los estados: disponibles, sin disponibilidad y mis horarios.

Para realizar la programación de una bahía se debe elegir algún día libre y automáticamente se cargarán los horarios que haya disponibles para este.

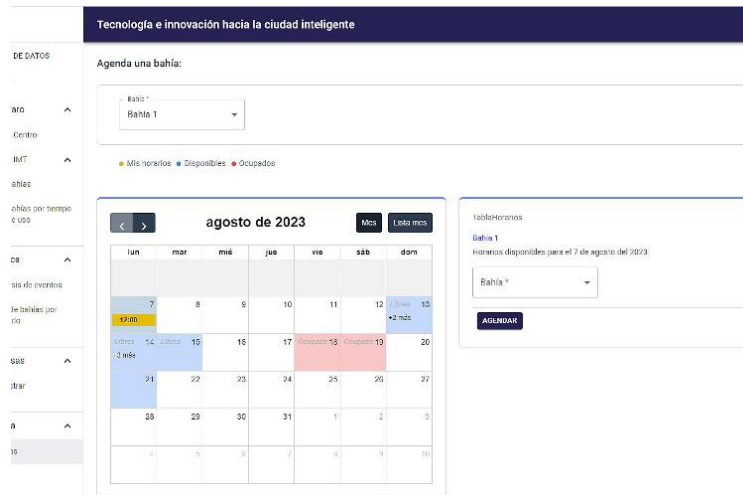


Figura 8. Vista agenda uso de bahías. Fuente: elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 9 se muestra una vista del estado en tiempo real de las bahías. Esta información nos permite conocer las bahías con mayor y menor tiempo de uso y las empresas que las usó. Una gráfica circular muestra las horas de uso (mayor y menor) total por bahía. Cabe señalar que la información se muestra a partir de la creación de las bahías hasta la fecha y hora actual.

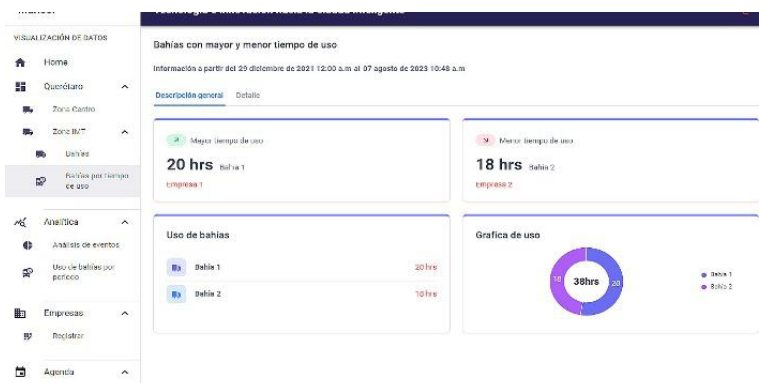


Figura 9. Bahías por tiempos de uso. Fuente: elaboración propia.

En la sección de detalle se muestra un resumen de la información de uso de las bahías. La Figura 10 muestra las bahías, las fechas y horas de llegada y salida, así como el tiempo total de uso, el nombre del repartidor y la empresa.



Figura 10. Detalle de los tiempos de uso. Fuente: elaboración propia.

Para conocer el uso de una bahía o de una empresa (o ambas) entre un periodo de tiempo, la vista de la Figura 11 permite analizar este comportamiento. Al ingresar una fecha de inicio y fin que se quiera analizar, dará como resultado la bahía con mayor y menor tiempo de uso, si añadimos un segundo elemento como una bahía obtendremos el tiempo de uso de esa bahía, y finalmente, si particularizamos aún más, agregando una empresa nos mostrará la actividad de uso de una bahía por empresa en un periodo de tiempo.

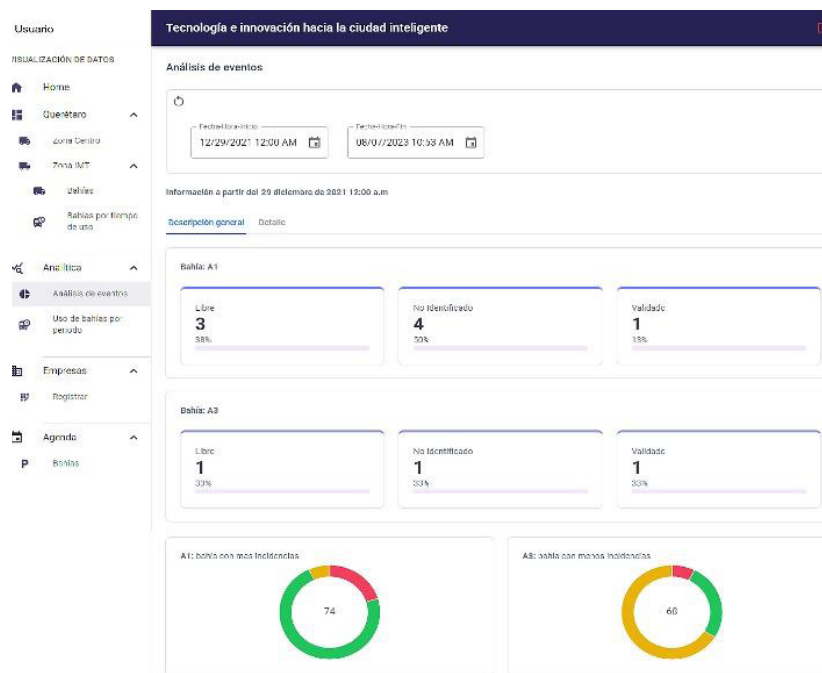


Figura 11. Comportamiento de bahías, detalle. Fuente: elaboración propia.

En la sección de detalle se muestra un resumen de la información de uso por bahía y/o empresa. La Figura 12 muestra las bahías, las fechas y horas de llegada y salida, así como el tiempo total de uso, el nombre del repartidor y la empresa.

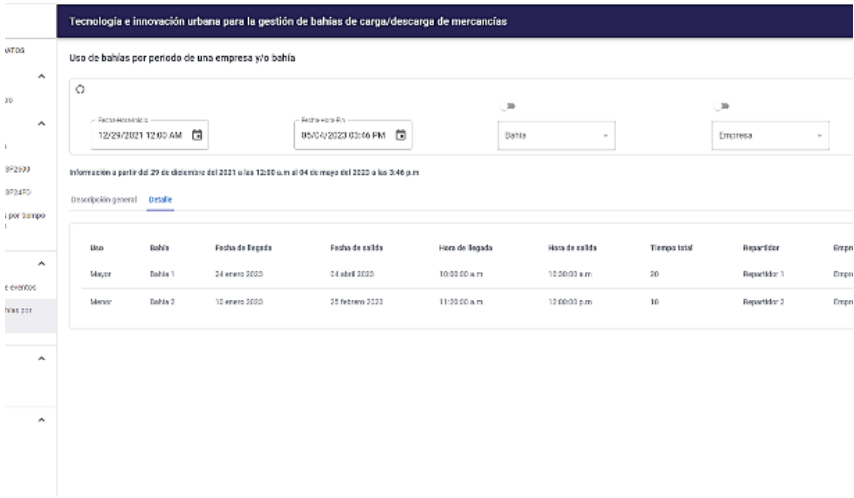


Figura 12. Bahías por tiempos de uso, detalle. Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que la tecnología utilizada fue la de “desarrollo ágil”, logrando un producto final conforme, con las funcionalidades requeridas. En un futuro, se tiene la intención de incorporar nuevas áreas de estudio con el propósito de continuar enriqueciendo el funcionamiento de las bahías. La cantidad de datos recopilados y otras variables que posiblemente no se han tenido en cuenta hasta el momento seguirán contribuyendo al análisis, la interpretación y la presentación más completa de la información disponible.

Implementación de Módulo de Seguridad

Para implementar la seguridad en el sistema, se utilizó el estándar OAuth 2.0 [16], el cual fue diseñado para permitir que un sitio web o una aplicación accedan a recursos alojados por otras aplicaciones web a través de un nombre de usuario. Es una actualización y sustitución del estándar OAuth 1.0 en el 2012, el cual proporciona acceso y restringe las acciones que la aplicación del cliente puede realizar en los recursos de un servidor sin compartir nunca las credenciales del usuario. Aunque fue desarrollado principalmente para la web, la especificación también describe cómo se maneja el acceso delegado a otros tipos de sistemas, como aplicaciones del lado servidor, aplicaciones nativas o de móviles, aplicaciones basadas en el navegador, entre otros.

OAuth es un protocolo de autorización y no un protocolo de autenticación, la diferencia radica en que la autenticación es el proceso de verificar la identidad de un usuario, basado en las credenciales que este provea, por otro lado, la autorización se refiere al pro-

Este protocolo utiliza principalmente tokens de acceso, los cuales pueden identificarse como un dato que representa la autorización para acceder a los recursos del usuario final. OAuth no define un formato específico para los token de acceso, sin embargo, el formato más utilizado es el conocido como JSON Web Token (JWT), ya que permite incluir datos en el propio token, además de que pueden tener una fecha de caducidad.

Es un estándar abierto que define una forma compacta y autónoma de transmitir información de forma segura entre dos entidades, con un formato de JSON, es considerado un mecanismo de autenticación sin estado, ya que el estado del usuario nunca se guarda en la memoria del servidor [17]. Consta de 3 secciones separadas por un punto y que se representan como lo siguiente: “Header.Payload.Signature”.

Payload. Contiene los claims, que representan la información que queremos transferir en el token, estos pueden ser reservados, públicos o privados; los claims reservados son los predefinidos tal como el emisor (“iss”), fecha de emisión (“iat”), la fecha de vencimiento (“exp”), el asunto (“sub”) o la audiencia (“aud”). Sin embargo, se pueden crear claims personalizados tal como los roles asociados a la cuenta.

Las rutas protegidas del servidor deben validar el JWT descrito en el encabezado de Autorización, Figura 13, y si es correcto, el usuario que hace la petición puede acceder a los recursos protegidos.

Figura 13. Encabezado de petición. Fuente: elaboración propia.

42



se utilizan para cambiarse por **Tokens de Acceso** cuando estos caducan. Es importante que los **Token de Actualización** se encuentren almacenados de forma segura por los clientes debido a que sustituyen cualquier tipo de operación de inicio de sesión por los clientes.

Proceso Principal de OAuth 2.0

En el nivel más básico, antes de que OAuth 2.0 funcione internamente en el servidor, es necesario que los clientes cuenten con sus credenciales para identificarse. El flujo general se describe como:

El cliente solicita autorización (Solicitud de Autorización) al servidor de autorización proporcionando un ID y una CLAVE como identificación, también proporciona los ámbitos y un URI de extremo (URI de redireccionamiento) al que enviar el token de acceso o el código de autorización.

El servidor de autorización valida al cliente y verifica que los ámbitos solicitados están permitidos.

El propietario del recurso interactúa con el servidor de autorización para conceder el acceso.

El servidor de autorización redirige de vuelta al cliente con un código de autorización o un token de acceso, según el tipo de concesión (también puede ser devuelto un token de actualización).

Con el token de acceso, el cliente solicita acceso al recurso desde el servidor de recursos.

En el nivel más básico, antes de que OAuth 2.0 funcione internamente en el servidor, es necesario que los clientes cuenten con sus credenciales para identificarse. El flujo general se describe en la Figura 15:

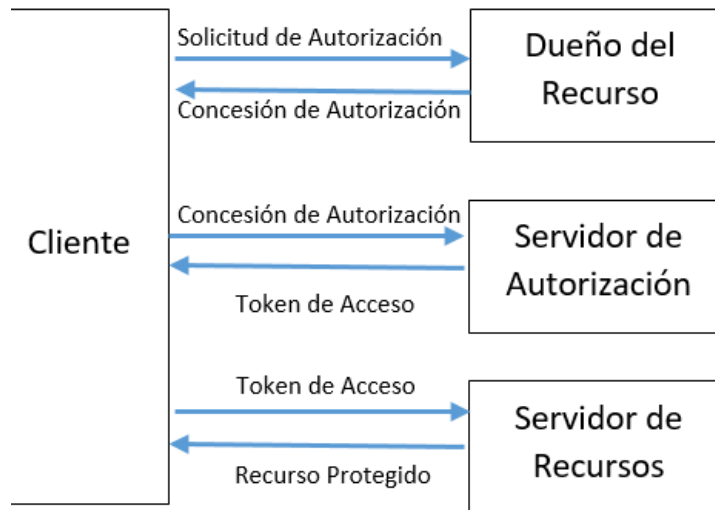


Figura 15. Flujo General OAuth 2.0. Fuente: elaboración propia basado en RFC 6749 [1].

Tipos de Concesión

Las concesiones son el conjunto de pasos que un cliente tiene que realizar para obtener la autorización de acceso a los recursos [19]. El marco base del estándar define varios tipos de concesiones:

Concesión del código de autorización. El servidor de autorización devuelve a un cliente un código de un solo uso, que se intercambia por un token de acceso. Sin embargo, la clave del cliente no puede ser almacenada de forma segura, por lo que la autenticación durante el intercambio se limita al uso del id del cliente únicamente. Una mejor alternativa es el Código de Autorización con concesión de PKCE.

Concesión implícita. En este flujo el token de acceso es devuelto directamente al cliente, como un parámetro en el URI o como una respuesta en Body.

Concesión de credenciales del propietario del recurso. En esta concesión requiere que el cliente primero adquiera primero las credenciales del propietario del recurso, que posteriormente se pasan al servidor de autorización. En este tipo de concesiones no se realizan redireccionamientos al servidor de autorización.

Concesión de credenciales de clientes. Se utiliza para aplicaciones no interactivas como lo son procesos automatizados o microservicios, es decir, la aplicación se autentica por si misma mediante el uso de su id y su clave.

Concesión de token de actualización. El flujo que corresponde al intercambiar un token de actualización por un token de acceso.

Implementación

Para realizar la implementación del framework de seguridad descrito anteriormente, se utilizó como base el ecosistema de Java a través del framework Spring Security, el cual se describe como un framework de autenticación y autorización personalizable, con la particularidad de que puede ser configurador como comunicación sin estado. La arquitectura de Spring Security se compone de varios elementos tal y como se muestra en la Figura 16:

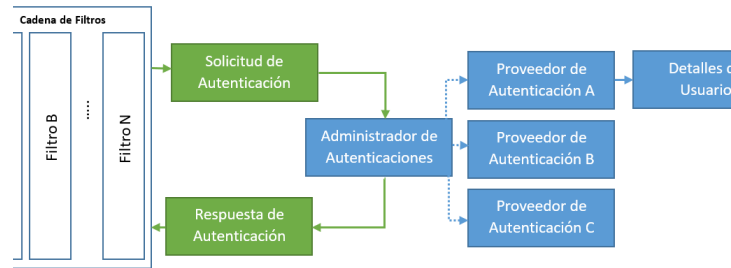
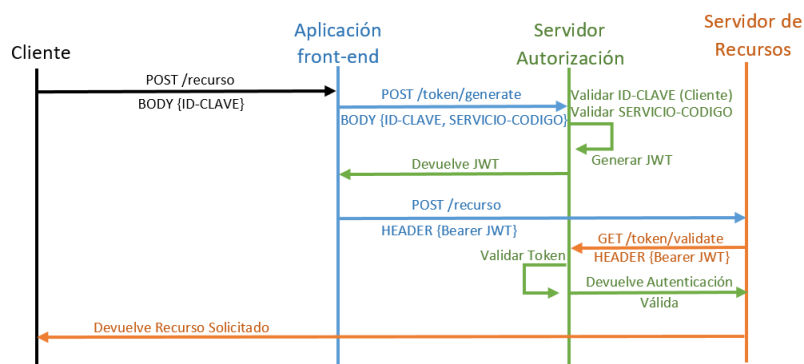


Figura 16. Arquitectura General de Spring Security. Fuente: elaboración propia basado en basado en [20].

Basado en la arquitectura general de Spring Security, se desarrolló un servidor de autenticación y un servidor de recursos, los cuales se encargan de validar, autenticar y autorizar que endpoints pueden ser ejecutados y que permisos tiene cada usuario que desea consultar información.

El servidor de autenticación y autorización se ejecutan en paralelo con cada uno de los servidores de recursos. En la Figura 17 se muestra el Flujo.



Fijura 17. Flujo General Implementado. Fuente: elaboración propia.

En el sistema se implementó el manejo de los Tokens tal como se definen en OAuth 2.0, además se configuro una seguridad interna para cada uno de los servicios en los servi-

dores, con el objetivo de mantener un mayor control para cualquier aplicación que desee conectarse a los recursos principales, con el objetivo de que todos los proyectos ya desarrollados y aquellos que se deseen desarrollar, sigan esta arquitectura de seguridad y sea sencillo de implementar.

Se definieron tres roles para el sistema final:

Rol de administrador del sistema. Serán aquellas personas designadas a gestionar las actividades de las bahías,

Rol de monitoreo. Serán aquellas personas designadas a dar seguimiento a las situaciones que se sitúen en cualquier bahía, también se encargará de generar reportes y análisis de los tiempos ejercidos por los vehículos de distribución.

Rol de representante. Son las personas designadas por una empresa o institución que gestionará los recursos de las mismas. Tendrá la capacidad de modificar la información de la organización a la que represente, y agregar, modificar o eliminar recursos como los vehículos y los conductores registrados en la misma.

Retos a futuro

Un reto importante es el desarrollo de un módulo de software para el monitoreo del tráfico en tiempo real, el cual permita ajustar las rutas de entrega de mercancías y evitar congestiones. De esta forma, se mejora la eficiencia del transporte de mercancías y se contribuye a disminuir la contaminación ambiental y el ruido en las áreas urbanas.

Otro reto es la implementación de una prueba piloto para un conjunto de 10 bahías de carga/descarga dentro de la zona urbana definida previamente por el LogistiX-Lab del IMT.

Conclusiones

La provisión de información en tiempo real sobre la utilización y disponibilidad de las bahías de carga/descarga en áreas urbanas permite mejorar de manera significativa la eficiencia del transporte en las zonas de estudio, al tiempo que se reducen los impactos negativos en el medio ambiente.

Se pudo observar que la implementación de la tecnología IoT brinda numerosas ventajas a la solución planteada en este contexto. Por un lado, se favorece la optimización de la operación logística y la gestión de la infraestructura destinada a la carga y descarga de mercancías. Por otro lado, al programar los tiempos de utilización de las bahías, se logra un aprovechamiento más eficiente de los espacios, lo que contribuye a reducir la congestión innecesaria.

Por otro lado, esta aplicación aprovecha el uso de software libre, reduciendo significativamente los costos de su desarrollo. Si particularmente hablamos de la base datos, el API y la aplicación web, estas se desarrollaron con el esquema de bibliotecas de código abierto, las cuales se mantienen por la gran comunidad de software libre.

Finalmente, se ha demostrado de manera efectiva y confiable la viabilidad de la automatización en la operación de la infraestructura tecnológica. Como resultado, la información suministrada en tiempo real por la aplicación web puede resultar invaluable tanto para la gestión logística de las empresas como para los gobiernos locales. Se anticipa que estos últimos podrán utilizar dicha información para el cumplimiento de los reglamentos de tránsito, una gestión más eficiente de la infraestructura y, en última instancia, la implementación de políticas de movilidad más sostenibles, que también consideren el transporte de carga.

Reconocimientos

Agradecemos al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por su valioso apoyo en las investigaciones llevadas a cabo en las instalaciones del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística. Su colaboración ha sido fundamental para el desarrollo y éxito de este trabajo.

Referencias

Forbes.com, (2022). Smart Cities: The Future Of Urban Development. [En línea]: <https://www.forbes.com/sites/jamesellsmoor/2019/05/19/smart-cities-the-future-of-urban-development/?sh=3a1599db2f90>

Ecologiaverde.com, (2022). Que son las ciudades inteligentes y sus características. [En línea]: <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-ciudades-inteligentes-3863.html>

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), (2023). Ciudades inteligentes y sostenibles. [En línea]: <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/smart-sustainable-cities.aspx>

https://www.sostenibilidad.com/construccion-y-urbanismo/que-es-una-smart-city-top-5-ciudades-inteligentes/?_adin=02021864894

<https://www.sacyr.com/-/las-cinco-ciudades-mas-inteligentes-del-mundo>

Caragliu, A., & Nijkamp, P. (2021). Smart cities in Europe: A ten-year (2007–2017) multi-dimensional analysis. *Land Use Policy*, 104, 105381.

Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), Análisis exploratorio de la comercialización de servicios de conectividad para IoT (Internet of Things), 2020, [En línea]: <http://>

www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/estadisticas/analisisexploratorioiot.pdf, 14-03-2022.

Hernández-Sánchez, B., Barrón-Bastida, M. y Cedillo-Campos, M. (2021). *IoTx Arquitectura Tecnológica integrada (Fase 1)*. Publicación Técnica N° 664: Instituto Mexicano del Transporte. México.

Cedillo-Campos, M. Fransoo, J. (2019). Distribución urbana inteligente de mercancías. *Revista IC*, Julio, Colegio de Ingenieros Civiles de México, México [En línea]: https://issuu.com/cicm_oficial/docs/ic599-final.

Fransoo, J., and Cedillo-Campos, M. (2022). Estimating the benefits of dedicated unloading bays by field experimentation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 160, June 2022, pp. 348-354.

Raj Kamal, (2017). *Internet of Things Architecture and Design Principles*. Mc Graw Hill, India.

Shanzhi Chen, Hui Xu, Dake Liu (2014). A Vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with China perspective.

UN Habitat (2020). *Reporte anual de las Naciones Unidas, programa de asentamientos humanos: Por un mejor futuro urbano*.

Sanchez Ramos, I. (2017). *Las “Smart Cities”: un nuevo paradigma. Aspectos éticos*. Tesis Doctoral, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid España.

Hugh Boyes, Bil Hallaq, Joe Cunningham, Tim Watson, (2018). *The industrial internet of things (IIOT): An analysis framework*. Computer Industry.

Internet Engineering Task Force (IETF), “The OAuth 2.0 Authorization Framework,” RFC 6749, 2012. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6749>

Internet Engineering Task Force (IETF), “JSON Web Token (JWT),” RFC 7519, 2015. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519>

D. Arias and S. Bellen, “What Are Refresh Tokens and How to Use Them Securely,” Okta Blog, 2021. <https://auth0.com/blog/refresh-tokens-what-are-they-and-when-to-use-them/>

Okta Inc., “¿Qué es OAuth 2.0?,” 2023. <https://auth0.com/es/intro-to-iam/what-is-oauth-2>

VMware Inc., “Spring Security,” 2023. <https://spring.io/projects/spring-security>

Nam T., Nguyen y Hyeong-Jong Kim (2021). *Smart cities: Recent developments and future prospects*.

Karel Huybrechts y Cathy Macharis (2020). *Innovations in urban mobility: The potential for smart cities*.

Smart waste management in smart cities: A review of the literature Yashar Pourrahmani et al. (2021)

Fethi Zitouni et al. (2020). An overview of smart grid technologies for sustainable energy management in smart cities”.

TIC Colombias SAS, 2023. <https://www.tic-col.net/web/singapur-un-modelo-de-ciudad-inteligente-a-seguir/>

Capítulo 3

Uso de bandas inteligentes para monitoreo de la salud en los conductores del autotransporte de carga

Martha Elizabeth de la Torre Romero, Jared Piña Barcenas, Marisol Barrón Bastida y Cesar Montiel Moctezuma

Resumen—Cuando se habla de transporte de mercancías, constantemente se habla de los riesgos asociados con dicha actividad. Una de las principales medidas enfocadas en la reducción de riesgos es el seguimiento de la unidad y la carga. Dicho enfoque considera los activos carga y vehículo, como lo más valioso que la empresa desea mantener a salvo, dejando la integridad del conductor en segundo término. Si bien existen tecnologías para dar seguimiento al conductor, éstas son enfocadas principalmente en vigilarlo. En este sentido, se observa que el mayor interés de la gestión de riesgos en el transporte se enfoca en el cuidado a los bienes y vigilancia del individuo. Esto, además de presentar una identificación incompleta de los factores de riesgo, atenta contra la dignidad del operador, pues mientras la unidad y la carga son cuidadas, el operador solo es visto como un probable infractor, no se reconoce al personal como un recurso valioso, por lo tanto, no se le da seguimiento puntual a su estado de salud. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la factibilidad de dar seguimiento al estado de salud del operador a través de “bandas inteligentes”, con la finalidad de proteger a los operadores del autotransporte e identificar de manera temprana futuros riesgos de salud.

Palabras Clave— Bandas inteligentes; Detección de riesgos; Autotransporte de carga.

Introducción

El transporte por carretera es el modo de transporte más relevante en nuestro país, desempeñando un papel crucial en la economía nacional. Los conductores de las unidades de transporte son una pieza fundamental en el funcionamiento eficiente de este sistema. Su importancia ha sido ampliamente demostrada en otros países, donde la escasez de conductores empieza a causar estragos en las cadenas de suministro:

“La oferta de camioneros HA ESCASEADO DESDE HACE AÑOS, pero una ola de jubilaciones, aunada a los que solo renunciaron para aceptar trabajos menos estresantes, está exacerbando la CRISIS EN LA CADENA DE SUMINISTRO de Estados Unidos, la cual ha derivado en estantes vacíos en las tiendas, compradores aterrados en la temporada decembrina y EMBOTELLAMIENTOS EN LOS PUERTOS. Almacenes de todo el país están saturados de productos, y los tiempos de entrega de muchas mercancías ahora demoran meses, en lugar de días o semanas.” [1].

De acuerdo con la Organización Internacional de Transporte por Carretera (IRU) en su estudio realizado en 2021 [2]; en México, el porcentaje de conductores menores de 25 años fue del 19%, el rango de edad de 25 a 55 años representó el 63% y el 18% restante corresponde a conductores de más de 55 años de edad.

El exceso de horas sentado, los altos niveles de estrés y una alimentación basada en comida rápida e hipercalórica ocasionan que un alto porcentaje de los conductores desarrolle enfermedades crónicas que los hace no aptos para conducir vehículos pesados. Peor aún, al no contar con un diagnóstico y tratamiento oportuno, estas enfermedades pueden agravarse y aumentar el riesgo de ocasionar graves accidentes.

Por ello, es importante establecer estrategias que den seguimiento al estado de salud de los conductores y permitan identificar de manera oportuna el desarrollo de enfermedades crónicas para cuidar del escaso personal dedicado a esta labor. Sin ellos, el abasto de productos y servicios es prácticamente imposible.

Importancia de la salud de los operadores de carga

Es indiscutible que tener una mala salud es preocupante por sí mismo, pero aún más cuando se maneja un vehículo de manera cotidiana, ya que sufrir un desvanecimiento puede ser mortal. Además, el riesgo se incrementa considerablemente si el vehículo transporta carga pesada o peligrosa.

Según Chavarría Vega y sus colaboradores [3], 8 de cada 10 accidentes ocurridos en la Red Carretera Federal, tienen como principal causa la conducta o el error del conductor.

De acuerdo con Montoro y Toledo [4] existen diversas causas, relacionadas con la salud, que pueden originar que un conductor cometa un error provocando con ello un accidente, entre ellas se incluyen enfermedades como diabetes, insuficiencia cardíaca, artrosis, entre otras.

También existen causas psicológicas como enfermedades mentales, trastornos de la personalidad, inestabilidad emocional y aquellos trastornos psicofísicos transitorios como son el estrés, la fatiga, el sueño y la depresión, además del consumo de fármacos, alcohol o drogas.

En el sector del transporte de carga en México, es lamentable observar la existencia de malas prácticas, por ejemplo, en muchas ocasiones los embarques salen con retraso y se espera que el conductor recupere el tiempo perdido manejando a altas velocidades y sacrificando sus descansos, lo que puede ocasionar la aparición de trastornos psicofísicos transitorios. Estas prácticas no solo ponen en riesgo la seguridad vial, sino que también incumplen con las normas establecidas por la secretaria de Infraestructura Comunicaciones y Transportes.

Para mejorar a largo plazo de la calidad de la salud de los operadores, se propone evaluar un método para monitorear su frecuencia cardiaca y dar seguimiento al estado de salud de los conductores. A futuro se espera que, a través de la medición de la frecuencia cardiaca, sea posible identificar situaciones en las que el conductor pudiera estar bajo el influjo de sustancias prohibidas, y, por medio de la medición del tiempo de sueño conocer si el operador ha descansado el tiempo suficiente, esencial para asegurar que está en condiciones aptas para continuar conduciendo.

Antecedentes

Enfermedades y accidentes en el transporte de carga

El elevado número de accidentes en carreteras federales es un problema que no presenta una solución fácil. A pesar de los programas de concientización e inversiones en señalamientos e infraestructura de protección, estos eventos solo presentan una leve disminución en un periodo de tiempo. Sin embargo, no se observa un patrón decreciente que se mantenga a través del tiempo.

Como se observa en la Tabla 1, durante el año 2017 se registraron 11 883 colisiones, para el año 2018 se registraron 12 237 y en 2019 se presentó una reducción con 12 056. Para el año 2020 se puede observar nuevamente una disminución con 11 449 eventos, sin embargo, es conveniente mencionar que el año 2020 fue atípico debido a la pandemia.

Tabla 1. Accidentes en carreteras federales (2017-2020)

	2017	2018	2019	2020
Colisiones	11 883	12 237	12 056	11 449
Fallecidos en el lugar	2 921	2 994	3 044	2 722
Lesionados	8 910	8 761	8 501	6 706

Daños materiales	56 165	61 004	61 018	51 808
Vehículos accidentados	19 388	20 045	19 670	18 212

Fuente: Cuevas et al 2022 [5].

De acuerdo con el anuario estadístico de colisiones en carreteras federales 2021 [5] los vehículos articulados y doblemente articulados fueron responsables del 13.6% de accidentes registrados, si a esta cifra le incluimos los camiones unitarios el porcentaje asciende al 19.4%.

La principal preocupación que surge de la participación de vehículos pesados en las colisiones, se debe a que en este tipo de incidentes las afectaciones generalmente son mayores (a consecuencia de factores como el peso de la carga que transporta la unidad). Por ejemplo, el derrame de productos químicos que puedan contaminar el medio ambiente o dañar la salud de los habitantes de la zona, además de las cargas que son inflamables o incluso, explosivas.

En cuanto al número de colisiones registradas en el año 2020, Soria y sus colaboradores [6], señalan que el 76% de éstas, fueron imputables al conductor como único causante, de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2. Colisiones y víctimas anuales atribuibles al factor humano y otras causas. (2011-2020)

Años	Colisiones			Número de víctimas	
	Total	Conductor como único causante	Atribuibles al conductor, al camino y al agente natural	Conductor como único causante	Atribuibles al conductor, al camino y al agente natural
2011	24 818	23 480	1 129	ND	ND
2012	24 068	19 758	1 268	ND	ND
2013	19 758	ND	ND	ND	ND
2014	16 769	13 192	1 082	ND	ND
2015	16 361	12 475	1 311	ND	ND
2016	12 024	9 290	801	ND	ND
2017	11 373	10 338	672	ND	ND
2018	11 613	8 659	724	8 675	665
2019	11 730	9 370	489	9 083	503
2020	11 106	8 450	730	7 150	573

ND= información no disponible en los anuarios estadísticos.Fuente: [6].

En recientes años, la industria automotriz en su segmento de mercado dedicado a la fabricación de vehículos pesados ha adoptado un mayor número de avances tecnológicos en sus unidades, que en gran parte se enfocan en mejorar la seguridad. Si bien, resulta positivo contar con nuevas tecnologías que permita mayor seguridad en la operación, no todo depende de la tecnología. Como se observa en la Tabla 2, el mayor porcentaje de la siniestralidad registrada tiene su origen en el conductor, el cual puede estar sometido a altos niveles de estrés, presentar enfermedades crónicas, cansancio, o estar bajo el influjo de drogas.

Además, Horne y Reyner [7] señalan el excesivo sueño diurno como causa de accidentes de tráfico, representando en su estudio hasta el 30% de los casos, a menudo estos accidentes estaban relacionados con una alta mortalidad y morbilidad. Si bien algunos conductores prefieren conducir de noche, debido a que hay menos vehículos privados durante este lapso de tiempo, la conducción nocturna modifica los ritmos circadianos¹, provocando trastornos del sueño [8].

Tecnologías de seguimiento utilizadas

Más allá del internet y el uso de tecnologías, el crecimiento de la cuarta revolución tecnológica continúa su avance con desarrollos que están modificando actividades y procesos de uso común.

Las nuevas tecnologías están modificando los paradigmas de producción y consumo. Además de los cambios en el sector productivo, existen otros efectos en la salud, la educación, la vivienda, el transporte, etc., que abren un espacio de desafíos y oportunidades para el continuo desarrollo de los países [9].

El concepto de rastreabilidad surge como un término que designa la capacidad de poder rastrear un objeto [10]. En un escenario logístico, si agregamos tecnología e inteligencia, el proceso de rastreabilidad se ejecutará con mayor eficacia. Así, al insertar sensores en cada uno de los elementos físicos que intervienen en los procesos de transporte, se puede comenzar a intercambiar información en tiempo real.

Centrado en la unidad

Contar con un sistema de telemetría resulta importante para medir y controlar diversas variables involucradas en las unidades de carga. De acuerdo a Sitrak [11] los principales aportes de la telemetría en las flotas vehiculares son:

Controlar la temperatura de la carga. A través de la implementación de un sistema se

¹ Los ritmos circadianos son cambios físicos, mentales y conductuales que siguen un ciclo de 24 horas. Estos procesos naturales responden principalmente a la luz y la oscuridad, y afectan a la mayoría de seres vivos. Fuente: Instituto Nacional de Ciencias Médicas Generales EEUU [13].

pueden evaluar los grados centígrados de un contenedor o remolque y con ello evitar mermas.

Mantener la seguridad en la conducción. La telemetría puede medir y controlar la velocidad y el manejo brusco de los conductores.

Prevenir el robo de la carga. Un sistema de telemetría también puede medir el peso de la carga y cierre de puertas de la unidad.

Evitar el mal uso de combustible. Puede medir la carga del motor, la aceleración, los frenados bruscos, los niveles de combustible y el peso transportado, y con ello, disminuir su consumo.

Con enfoque al autotransporte de carga

Las herramientas de rastreo aplicadas a la logística son capaces de canalizar y procesar diversas fuentes de datos para la planificación logística, la toma de decisiones y la optimización de los procesos. De acuerdo a Beetrack [12] las tres tecnologías más utilizadas en el ámbito del monitoreo y rastreo vehicular son las siguientes.

Internet de las Cosas (IoT). El Internet de las Cosas es el conjunto de tecnologías que nos permiten conectar objetos a la red para obtener información de ellos [14]. Este paradigma debe cumplir tres características: Bajo consumo, ser inalámbricos y autosuficientes. La interacción humana es mínima debido a que consumen poca energía y están conectados a una red. El IoT posibilita la obtención eficiente de información a partir de sensores colocados en cualquier lugar, como la unidad vehicular, el remolque, la carga, y ahora también los operadores. Con ello se puede conocer el rendimiento de los vehículos, el desempeño de los transportistas, el estado de las mercancías, etc.

Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). Consiste en un sistema de satélites basado en el espacio que proporciona información de ubicación (longitud, latitud, altitud) e información de tiempo en todas las condiciones meteorológicas y en cualquier lugar de la tierra a dispositivos llamados receptores [15].

Sistema de Posicionamiento Global Asistido (A-GPS). Esta tecnología se le conoce comúnmente como GPS Asistido, y se encuentra incorporada en una variedad de dispositivos como relojes inteligentes, teléfonos de alta gama, etc. El proceso de localización y posicionamiento se realiza a través de un receptor GPS, y con la ayuda de un software, se envía a un servidor externo la identificación de la antena celular donde se encuentra conectado el móvil, posteriormente se obtiene como respuesta los satélites situados encima de su posición. Así, una vez que se haya establecido un primer posicionamiento fiable, el dispositivo seguirá posicionando con los datos recibidos de los satélites.

Tecnologías de monitoreo enfocadas al individuo

En la sección previa se identifican las tecnologías que son implementadas actualmente en la detección de riesgos, las cuales hasta el momento no muestran interés en detectar situaciones relacionadas al estado de salud del conductor, como por ejemplo arritmias o alta frecuencia cardíaca, o identificar largos periodos de vigilia. [16]

La capacidad de uso de los wearables en el ámbito de la salud digital ha crecido de forma proporcional a su nivel de desarrollo. Actualmente su uso se ha ampliado como coadyuvante para el control o tratamientos médicos a través de la obtención de métricas de actividad estándar que abordan diversos aspectos de la salud y bienestar de los individuos.

Las aplicaciones prácticas que pueden tener los wearables para el monitoreo de la salud están dirigiendo esfuerzos para ayudar a prevenir accidentes viales. En este sentido, las mediciones de variables fisiológicas como la frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno y frecuencia respiratoria, son de interés para validar el buen funcionamiento biológico del operador durante la conducción, en correlación con otras variables como la calidad del sueño y el nivel de estrés.

Monitorear estas variables facilitan la identificación de diversas condiciones en las que los conductores podrían estar expuestos, por ejemplo: estrés, ansiedad, enfermedades cardíacas, sobresaltos, incluso intoxicación por la ingesta o inhalación de sustancias tóxicas.

Una de las mediciones que más interés ha despertado en los últimos años es la obtención de valores a partir de la saturación de oxígeno en la sangre, útil para determinar las fases del sueño e incluso para detectar problemas respiratorios como la neumonía asociada al COVID-19 en etapas tempranas. Básicamente, el monitoreo de la saturación de oxígeno en la sangre se emplea para comprobar si alguien necesita asistencia respiratoria o si está experimentando problemas respiratorios, dando como resultado la presencia de diversos problemas como la apnea del sueño, trastornos cardiovasculares (hipertensión o arritmia), problemas respiratorios, obesidad, entre otros [17].

Además, existe una importante cantidad de dispositivos wearables a disposición de los consumidores, que buscan ofrecer soluciones o ser un apoyo en tareas de monitoreo de la salud de los usuarios. Sin embargo, existen limitaciones para su aprovechamiento, siendo la principal su dependencia de software privativo y la consecuente apropiación por parte de las empresas de la información de los usuarios, sin acceso de los datos crudos.

Las propuestas de relojes inteligentes enfocados en los operadores ya existen, sin embargo, se limitan a delegar todo el seguimiento de la salud del conductor a él mismo, sin una figura de autoridad que lo guíe a tomar medidas al respecto [18,19,20].

También, en la literatura se pueden encontrar propuestas de desarrollo de dispositivos wearables [21]. Sin embargo, estas presentan inconvenientes como el costo de producción, diseños poco prácticos, ausencia de atributos básicos como la resistencia al agua, la falta de un plan de soporte o desarrollo a largo plazo.

Para la presente propuesta se decidió optar por dispositivos comerciales económicos, con diseños prácticos y con aceptación por parte de los usuarios. Además, existen trabajos donde se ha demostrado la posibilidad de usar bandas inteligentes con desarrollos de software alternativos para su aprovechamiento en la recolección y análisis de datos fisiológicos.

Por ejemplo, en el trabajo de Herrera y sus colaboradores [22] presentan un sistema de monitoreo de actividades para estudiantes a través de relojes inteligentes, usando específicamente la marca de Microsoft junto con sus herramientas de desarrollo de software. El problema es que las bandas inteligentes de Microsoft se dejaron de producir, desarrollar y dar soporte ese mismo año [23].

Otro ejemplo lo propone García [24], quien en su trabajo de fin de grado desarrolló una aplicación para identificar ataques de epilepsia analizando datos recolectados a través de un dispositivo wearable. Este trabajo fue desarrollado con el software que ofrecía la marca (AngelSensor) y que solo funciona con sus dispositivos.

En cuanto a la evaluación de la precisión de los sensores de estos dispositivos, en [25] se realiza una revisión de la literatura con base en 158 publicaciones. Su objetivo fue examinar la validez y confiabilidad de dispositivos comerciales con respecto a la medición del número de pasos, ritmo cardíaco y gasto energético que realizan. Se revisaron un total de 158 publicaciones y se identificaron nueve marcas en la muestra (Apple Inc, Fitbit, Garmin, Mio, Misfit, Polar, Samsung, Withings y Xiaomi), de las cuales Fitbit es la marca más estudiada. Concluyen que la confiabilidad de las mediciones del ritmo cardíaco y el número de pasos es aceptable, pero existe una variación por marca y modelo. Con respecto al gasto energético, ninguna marca es precisa. Es importante mencionar que en la mayoría de los estudios se trabajó en condiciones controladas.

Pasando al tema de la evidencia de comunicación de los dispositivos con aplicaciones no oficiales, se observa en la literatura el uso de la banda inteligente Xiaomi MiBand 2 [26,27] o Microsoft Band 2 [28].

La prueba más importante que se encontró de la conexión a través de aplicaciones no oficiales es la existencia de Gadgetbridge [29]. Esta aplicación permite conectar alrededor de 50 modelos de diferentes marcas de relojes y bandas inteligentes. Los principales modelos en los que se enfoca son Pebble, Mi Band, Amazfit Bip y HPlus; y no se encuentran modelos de Apple, Samsung o Fitbit. La aplicación permite almacenar, descargar y visualizar las mediciones realizadas con las bandas inteligentes. Al ser un desarrollo de software libre se puede tener acceso al código fuente para ser adaptado a otros proyectos o continuar con el soporte de la aplicación en caso de que el proyecto sea abandonado.

Metodología

Para esta investigación se desarrolló una plataforma tecnológica dividida en dos secciones, la primera se enfoca en la infraestructura y la arquitectura de lado servidor y la segunda se encarga de mostrar los resultados al usuario. Además, los datos de ritmo cardíaco de los conductores se recolectan a través de una banda inteligente junto con la aplicación Gadgetbridge, para después ser analizados con gráficas de control.

Arquitectura del sistema propuesto

En este estudio se propone la arquitectura de un sistema cuyo objetivo es monitorear el estado de salud del operador para determinar si se encuentra en buen estado al realizar sus actividades y, en caso contrario, informar, tanto al operador como al personal designado por la empresa, del posible riesgo en el que se puede encontrar.

En este caso el usuario (operador del transporte de carga) tendrá asignado un dispositivo wearable que cuente con sensores fisiológicos (por ejemplo, ritmo cardíaco y niveles de oxígeno en la sangre) y la característica de monitoreo del sueño. Además, el dispositivo wearable debe contar con Bluetooth 4.0 como mínimo.

El dispositivo comunicará la lectura de los sensores al teléfono inteligente a través de una conexión bluetooth y el protocolo BLE (Bluetooth Low Energy), el cual también debe contar con al menos Bluetooth 4.0 y conexión a una red móvil con acceso a internet. Para realizar la conexión y recolección de los datos será necesario una app para el dispositivo móvil.

Todos los datos recolectados serán enviados por internet con el protocolo TCP/IP a un servidor que cumplirá la tarea de almacenar los datos y analizarlos, además de albergar una página web para su consulta. Del análisis realizado de los datos se identificarán de manera automática los posibles escenarios que se consideren de riesgo para el operador y la alerta correspondiente será notificada. Ver Figura 1.

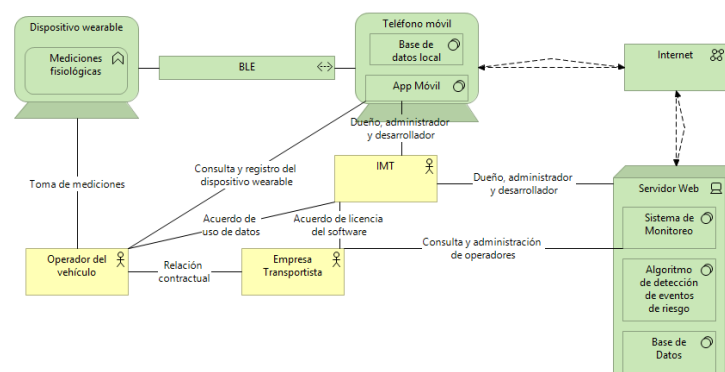


Figura 1. Arquitectura del sistema propuesto. Fuente: Elaboración propia.

De la arquitectura propuesta, aún queda pendiente la comunicación de los datos desde el teléfono móvil hasta el servidor, siendo este paso una tarea manual por el momento.

Características técnicas de los dispositivos

Las principales consideraciones que se tomaron en cuenta para la selección de dispositivos de medición, es que fueran dispositivos compatibles con el sistema operativo Android, con un precio de adquisición inferior a los \$3,000.00 MXN y que midan al menos la frecuencia cardíaca. La limitante del sistema operativo se debe a que es necesario usar la aplicación Gadgetbridge para la recolección de los datos.

Se identificaron 8 modelos de bandas inteligentes de las cuales, a través de un ejercicio de jerarquía analítica, se seleccionó como mejor opción un dispositivo que mide frecuencia cardíaca, seguimiento del sueño y es compatible con Android, con un precio de \$679.00 MXN al momento de llevar a cabo la evaluación.

Dicha selección no es absoluta, la aplicación puede emplear una gran gama de bandas inteligentes en el mercado siempre y cuando cumpla las especificaciones planteadas al inicio de esta sección, de hecho, durante el desarrollo del proyecto se experimentó con cinco diferentes modelos de bandas inteligentes de los que se tuvo disponibilidad: Amazfit U Pro, Amazfit Band 5, Amazfit Neo, Mi Smart Band 5 y Mi Smart Band 6.

Plataforma del lado del servidor

Para el desarrollo de la plataforma se contempló una arquitectura de microservicios, la cual puede definirse como una forma para el diseño de aplicaciones de software y se representa como un conjunto de servicios implementables de forma independiente. Las ventajas de utilizar microservicios son diversas, por ejemplo, se puede definir una arquitectura con características de escalabilidad, se implementan fácilmente nuevas funcionalidades no consideradas al inicio del proyecto, es independiente de la tecnología de desarrollo y se vuelve resiliente ante problemas que puedan surgir.

Plataforma web

Se desarrolló una aplicación web que incluye un conjunto de gráficos informativos con la finalidad de tener una visión más clara del comportamiento de la frecuencia cardíaca. Actualmente la aplicación web ofrece las funcionalidades de: registro y control de acceso a los usuarios, así como las secciones de análisis por periodo y temporalidad de la frecuencia cardíaca (véase la Figura 2).

En la Figura 3 se presenta la captura de la interfaz gráfica correspondiente al análisis por periodo. La funcionalidad de esta vista permite elegir las fechas de inicio y fin de la muestra para ser gráficamenteada, así como el nombre del usuario de interés. Los datos se presentan en una gráfica de control para su análisis e interpretación.

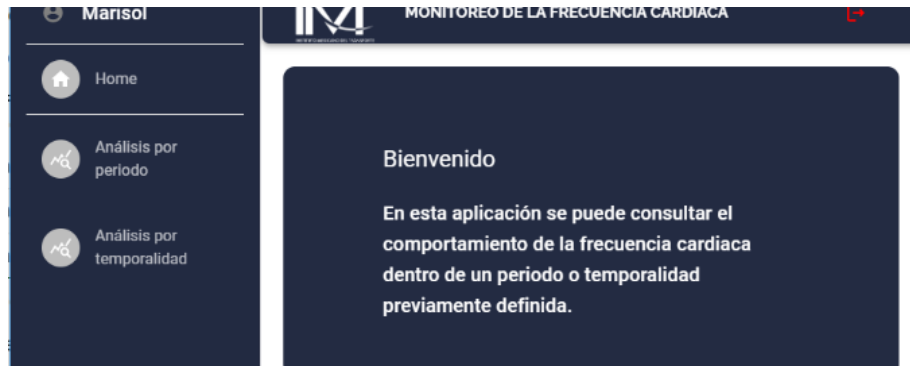


Figura 2. Pantalla de inicio de la aplicación web. Fuente: Elaboración propia (2022).

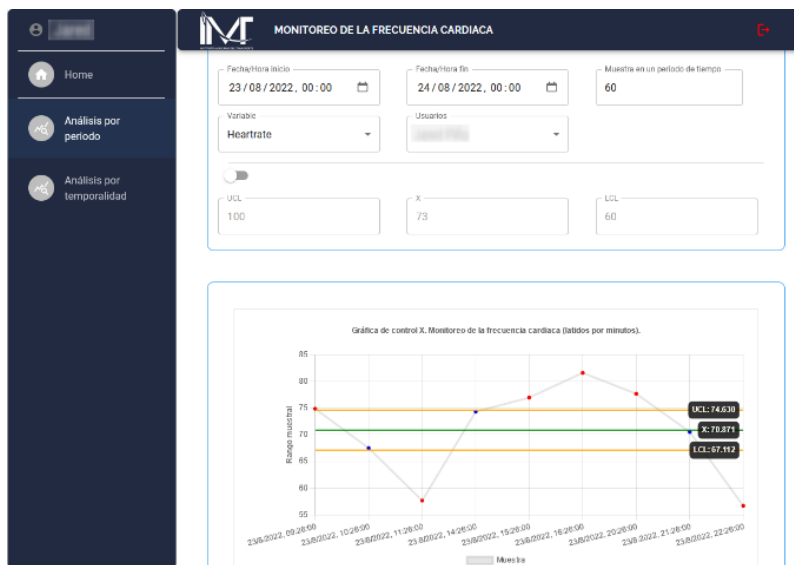


Figura 3. Interfaz gráfica del análisis por periodo. Fuente: Elaboración propia (2022).

Procesamiento de datos

La identificación temprana de riesgos para los operadores, requiere observar su condición física a través del tiempo. Esto puede hacerse midiendo signos vitales que permitan evaluar el estado del conductor y, en caso necesario, emitir una alerta para prevenirlo o avisar a los servicios médicos de apoyo.

Estos signos vitales pueden ser transmitidos a estaciones distantes de resguardo y aná-

lisis de datos, en un esquema conocido como Monitoreo Remoto de Pacientes (MRP), diseñado para atender a pacientes sin acceso a un ambiente clínico convencional, que cambian con frecuencia de ubicación o que están en áreas remotas. En este esquema, datos fisiológicos tales como la presión sanguínea, la temperatura o el pulso son colectados por sensores instalados en dispositivos periféricos que lleva puestos el paciente, y transmitidos a las estaciones de monitoreo. Para los operadores del autotransporte, el problema del constante cambio de ubicación geográfica desaparece con el monitoreo remoto.

El esquema de MRP, si bien puede resultar muy ágil en la captura, transmisión y tratamiento de la información, requiere asegurar algunas condiciones para garantizar su buen funcionamiento.

Existen dos aspectos importantes a considerar: La aceptación de los operadores a utilizar de manera regular los dispositivos de medición; esto implica que los conductores de los camiones tengan conciencia de la relevancia que tiene cuidar su salud, o que reciban algún curso de inducción para lograr que colaboren apropiadamente.

El segundo aspecto que debe cuidarse es garantizar la confidencialidad de los datos que se manejen en el esquema MRP, ya que es información personal sensible de los operadores, y la confianza de estos en el esquema puede depender mucho de este manejo confidencial. [30].

La evaluación de las mediciones

Una vez estando en funcionamiento el esquema anterior, el acopio, transmisión y resguardo de datos de los signos vitales de un operador, será la base para determinar su estado físico durante las jornadas laborales.

Este trabajo propone tratar los datos generados en el MRP, con el enfoque de Control Estadístico de Procesos (CEP) [31], utilizado con éxito en el control de calidad industrial. En este enfoque se reconoce que todo proceso industrial siempre tiene una variabilidad debida a diversas pequeñas causas, que no siempre son detectables o del todo evitables. Esta variabilidad natural del proceso es llamada “ruido de fondo”, y se considera inocua; un proceso que solo muestra esta variabilidad se considera estable [32].

Si las condiciones físicas del proceso cambian de manera importante, surge otra clase de variabilidad, en general de mayor magnitud que el ruido de fondo, y que refleja un mal funcionamiento del proceso. Aquello que provoca esta variabilidad es llamada “causa asignable”, y es lo que debe corregirse para que el proceso vuelva a estar bajo control.

En analogía con el CEP, los signos vitales de un operador, naturalmente, no se mantienen constantes durante el día. Variaciones en la temperatura corporal, la presión sanguínea,

o la frecuencia cardíaca, pueden reflejar cambios en la fisiología del operador, procesos biológicos actuando, errores de medición del sensor o variaciones aleatorias por diversas causas no previsibles.

La evaluación de las mediciones de signos vitales tiene como objetivo detectar los cambios relevantes de estos parámetros, distinguiéndolos de las variaciones normales o cambios aleatorios (ruido de fondo). Con una evaluación adecuada de los signos vitales, se evitan errores en las decisiones de intervención y se minimiza la generación de falsos positivos y falsos negativos.

Por ejemplo, la Figura 4 muestra un histograma de la frecuencia cardíaca (pulso) de un sujeto observado durante 26 días, con tres mediciones diarias por la mañana. La forma acampanada del histograma sugiere una distribución Normal para la variable pulso, hipótesis que se puede verificar con una prueba de bondad de ajuste.

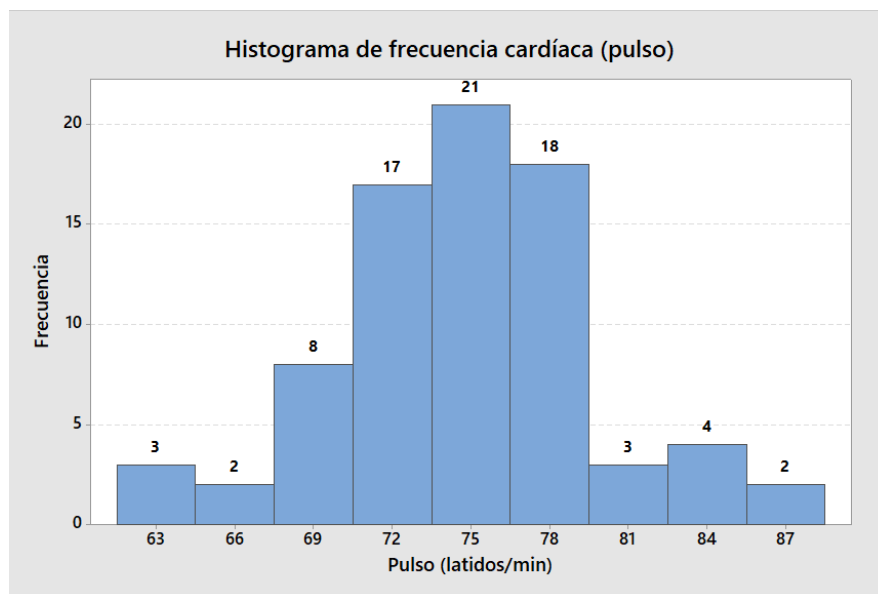


Figura 4. Ejemplo de histograma de la frecuencia cardíaca. Fuente: Elaboración propia.

La técnica básica para la detección de los cambios es la gráfica de control, un procedimiento de monitoreo continuo para detectar mediciones que salen del rango considerado como normal. En la Figura 5 se ve un ejemplo de gráfica de control para las mediciones diarias de la frecuencia cardíaca del usuario anterior (histograma de la Figura 4).

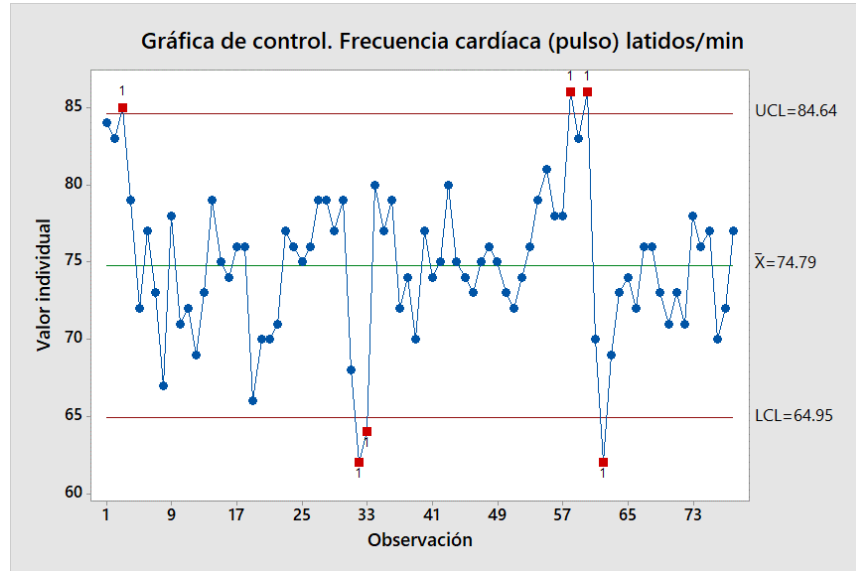


Figura 5. Ejemplo de gráfica de control de la frecuencia cardíaca. Fuente: Elaboración propia.

La línea central indica la media del proceso: 74.79, y se tienen dos límites para el intervalo que se considera de variación natural. El límite superior (UCL, Upper Control Limit) de 84.64 y el límite inferior (LCL, Lower Control Limit) con 64.95. Estos límites suelen ponerse a tres desviaciones estándar de la media, y en la práctica se aceptan como el intervalo de variación natural de la medida.

Cuando el pulso observado aparece dentro de los límites de la gráfica de control, la variable fisiológica está bien; si alguna observación cae fuera de los límites, se tiene una indicación de que la variable salió de control y debe buscarse la causa asignable para corregir la situación.

La Figura 5 muestra los puntos fuera del intervalo en rojo con la etiqueta “1”; corresponden a las mediciones: 3, 58 y 60 arriba del límite superior y las mediciones 32, 33 y 62 por debajo del inferior. En este ejemplo, como las medidas son diarias, los puntos anómalos podrían reflejar circunstancias particulares de los días en que se midió; por ejemplo, situaciones de tensión emocional, consumo excesivo de café, alcohol, o cambios en la medicación del sujeto.

Patrones de comportamiento de la gráfica de control

Cuando un signo vital está controlado, sus mediciones caen dentro de los límites de la gráfica de control; y pareciera que no hay nada más que observar; sin embargo, lo anterior no significa que los cambios en la variable observada se deban a causas aleatorias solamente.

Si el signo está dentro del intervalo, pero muestra patrones no aleatorios de comportamiento, el signo está fuera de control.

Variaciones cíclicas del signo vital alrededor de su media o muchos cambios consecutivos en la misma dirección, por ejemplo, cinco o seis mediciones sucesivas en orden creciente o en orden decreciente pueden indicar una situación anormal. Estas secuencias de observaciones cambiando en el mismo sentido se llaman corridas. Estos patrones no aleatorios deben investigarse para verificar el estado fisiológico del sujeto observado.

Para decidir si el comportamiento de las corridas está afectado por alguna causa no aleatoria, en el control estadístico se usan las reglas propuestas por la empresa norteamericana Western Electric para el control de sus procesos [33].

El resumen de estas reglas es como sigue.

El proceso se considera fuera de control, con respecto a la medida de dispersión sigma (según el tipo de gráfica de control) si:

Se tiene uno o más puntos fuera del rango de 3-sigmas.

Se tienen 2 de 3 puntos consecutivos que exceden el límite de 2-sigmas.

Se tienen 4 de 5 puntos consecutivos que exceden el límite de 1-sigma.

Se tienen 8 puntos consecutivos del mismo lado de la línea central.

De lo ya expuesto sobre gráficas de control, la suposición más fuerte es que las variables observadas se comporten como Normales.

Además, para la gráfica de control, el diseño de muestreo es importante. La experiencia del control industrial sugiere que para detectar cambios relevantes en las variables conviene usar muestras pequeñas recolectadas en intervalos no muy grandes. Esta práctica es particularmente útil cuando el volumen de datos es grande, como es el caso del monitoreo de signos vitales a lo largo de una jornada laboral.

Resultados

Análisis de las muestras de prueba

Como paso previo se tomaron muestras con las bandas inteligentes de 5 personas por cinco días, para evaluar la calidad de los datos que se pueden registrar con los dispositivos, para así identificar posibles problemas durante el proceso.

En la Tabla 3 se muestra la estadística básica (media, desviación estándar, valor mínimo, percentiles, valor máximo y total de datos) de la diferencia de tiempos entre cada par de registros consecutivos, generados por las bandas inteligentes. Se toman los datos de

cada usuario, se ordenan respecto a la hora-fecha, se van tomando en parejas y se mide el tiempo transcurrido entre cada registro. En dichos tiempos se observa una media de aproximadamente un minuto en todos los casos y que se mantiene hasta en el 95% de las ocasiones. El tiempo máximo de 67 minutos del Usuario 1 se debe a ciertos momentos en que dejó de usar la pulsera. Estos datos muestran el potencial que tienen las bandas inteligentes para el monitoreo de los conductores con registros continuos cada minuto.

Tabla 3. Estadística básica de los tiempos entre registros por usuario

Usuario	Media	Desv. Est.	Mín.	P. 25%	P. 50%	P. 75%	P. 95%	Máx.	No. datos
1	1.04	1.24	0.02	1.00	1.00	1.00	1.00	67.00	6 956
2	1.00	0.05	0.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	7 221
3	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	7 200
4	0.93	0.24	0.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	7 714
5	1.00	0.03	0.03	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	6 514

Fuente: Elaboración propia.

Tras la estimación de los tiempos entre cada par de registros consecutivos, se dio paso al análisis de las mediciones de la frecuencia cardiaca. En la Tabla 4 se muestra la estadística básica de la frecuencia cardiaca por usuario, donde lo primero que salta a la vista son los valores -1 y 255, que evidentemente no representan la frecuencia cardiaca de los usuarios, sino que dichos valores representan eventos donde se observaron medidas erróneas tomadas con las bandas inteligentes. La presencia de estos valores, dan como resultado las medias desproporcionadas que se muestran en dicha Tabla y únicamente el Usuario 1 presenta una muestra útil para el análisis.

Tabla 4. Estadística básica de la frecuencia cardíaca por usuario

Usuario	Media	Desv. Est.	Mín.	P. 25%	P. 50%	P. 75%	P. 95%	Máx.	No. datos
1	74.38	32.78	-1	57	70	79	102	255	6 956
2	254.46	10.11	55	255	255	255	255	255	7 221
3	217.88	75.35	43	255	255	255	255	255	7 200
4	240.37	48.30	-1	255	255	255	255	255	7 714
5	223.31	67.69	41	255	255	255	255	255	6 514

Fuente: Elaboración propia.

Tras observar estos resultados se dio paso a enlistar los posibles factores que influyeron durante el proceso de prueba. Los posibles factores que se identificaron son:

Los errores son atribuibles al modelo de la banda.

Ajuste inadecuado de la banda inteligente.

Configuración de la aplicación Gadgetbridge.

El primer factor se pudo descartar al hacer un cambio de bandas entre los diferentes usuarios. El Usuario 1 realizó pruebas con las cuatro bandas y se obtuvieron muestras aceptables en todos los casos, por encima del 90% de datos útiles. El resto de usuarios presentaron muestras pobres en cada prueba.

Continuando con el siguiente factor, se revisó la manera en que se ajustaban las bandas los usuarios, identificando un ajuste holgado en los Usuarios 2, 3, 4 y 5. Se les indicó la manera correcta de ajustar la correa a la muñeca para que la banda no quedara despegada del área de contacto.

De igual forma, se revisó la configuración de la aplicación Gadgetbridge, encontrando en dos casos que la opción “Medición de pulso todo el día” no se encontraba configurada como “Cada minuto”, además de que la opción “Activity monitoring” se encontraba desactivada.

Estos cambios ayudaron a mejorar la calidad de las muestras y fueron tomados en cuenta para la recolección de datos de operadores de vehículos de transporte.

Análisis de datos de un operador de transporte

Con el objetivo de evaluar la recolección de datos con un caso práctico, se le pidió a un operador de transporte participar en el proyecto, asignándole una banda inteligente. La

recolección de datos se llevó a cabo durante un periodo de once días consecutivos, en los cuales, el operador manejó un vehículo de transporte de personal en la ciudad de Querétaro, México.

En la Tabla 5 se observa la estadística de los tiempos entre registros de la muestra del operador. Se recolectaron 15 885 datos, lo cual denota que la pulsera levantó datos durante los once días consecutivos. De éstos, el 49% con valores válidos de la frecuencia cardíaca.

Tabla 5. Estadística básica de los tiempos (minutos) entre registros, datos del operador

Nombre	M e - dia	Desv. Est.	Mín.	P. 25%	P. 50%	P. 75%	P. 95%	Máx.	No. datos
Operador	1.00	0.05	0.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	15 885

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se presenta la estadística básica del tiempo transcurrido entre pares de registros válidos consecutivos. El tiempo medio es de 2.04 minutos con una desviación estándar de 17.52 minutos. El tiempo mínimo entre registros fue de 0.02 y puede ser debido a lecturas redundantes que hacen algunas bandas. Los percentiles del 25% y 50% son igual a un minuto, es decir, al menos el 50% de las lecturas cumplieron con el tiempo ideal. Sin embargo, el 25% de los datos presenta un tiempo igual o mayor a dos minutos entre medidas consecutivas, llegando al tiempo máximo de 1 432.27 minutos (23.8 horas). El 95% de los registros consecutivos tiene una variación máxima de 5 minutos.

Tabla 6. Estadística básica de los tiempos (minutos) entre registros válidos, datos del operador

Nombre	M e - dia	Desv. Est.	Mín.	P. 25%	P. 50%	P. 75%	P. 95%	Máx.	No. datos
Operador	2.04	17.52	0.02	1.00	1.00	2.00	5.00	1 432.27	7 765

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la frecuencia cardíaca, en la Tabla 7 se muestra la descripción estadística de cómo se distribuyen las mediciones del operador. La media se encuentra en 75.97 latidos por minuto (lpm) y la desviación estándar en 10.14 lpm. El menor registro es de 45

lpm, mientras que la cuarta parte de las mediciones es de al menos 69 lpm. La mediana es de 75 lpm y se encuentra muy cercana a la media. El 75% de los registros es de al menos 81 lpm y el 95% llega hasta los 93 lpm. El valor máximo observado es de 132 lpm, el cual es un valor por encima de los 110 lpm, considerado como límite superior para la frecuencia cardíaca en reposo.

Tabla 7. Estadística básica de la frecuencia cardíaca (latidos por minuto), datos del operador

Nombre	Media	Desv. Est.	Mín.	P. 25%	P. 50%	P. 75%	P. 95%	Máx.	No. datos
Operador	75.97	10.14	45	69	75	81	93	132	7 765

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que los datos describen una forma de campana al ser graficados, estos no se ajustan a una distribución normal. Como se presenta en la Figura 8 la prueba de normalidad, realizada con el software Minitab, indica que con un valor P menor a 0.005 se rechaza la hipótesis de que los datos se ajustan a la distribución normal.

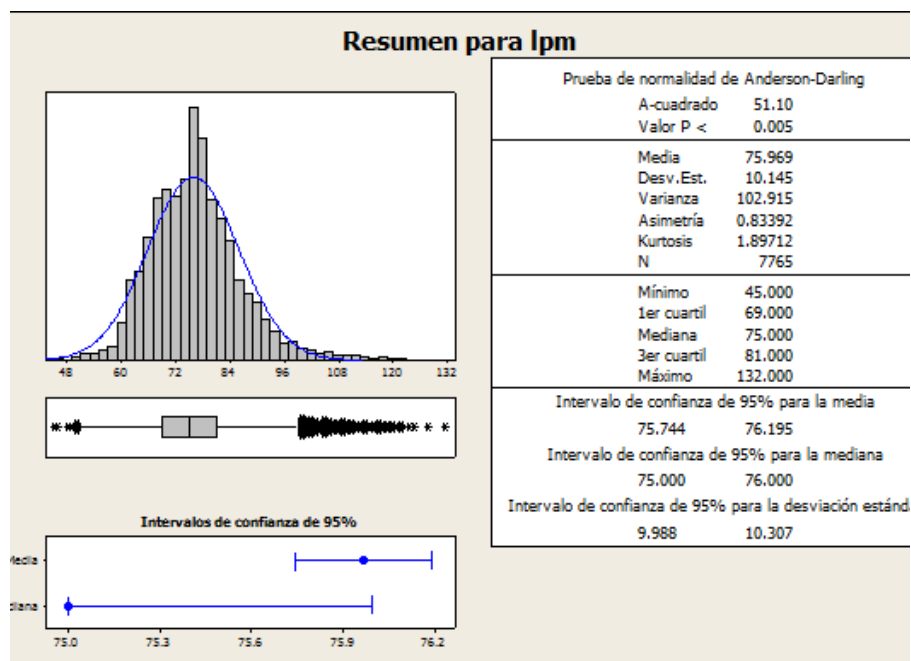


Figura 8. Resumen gráfico de la variable frecuencia cardíaca. Fuente: Elaboración propia con Minitab.

En la Figura 8 también se presenta un gráfico de cajas donde se observa un gran número de datos atípicos, sin embargo, aun descartando estos datos de la muestra, persiste la falta de ajuste a la normal (Figura 9). Esta falta de ajuste a la normal puede ser debido a que el ritmo cardíaco del sujeto de estudio se encuentra fuera de control, como se concluye más adelante.

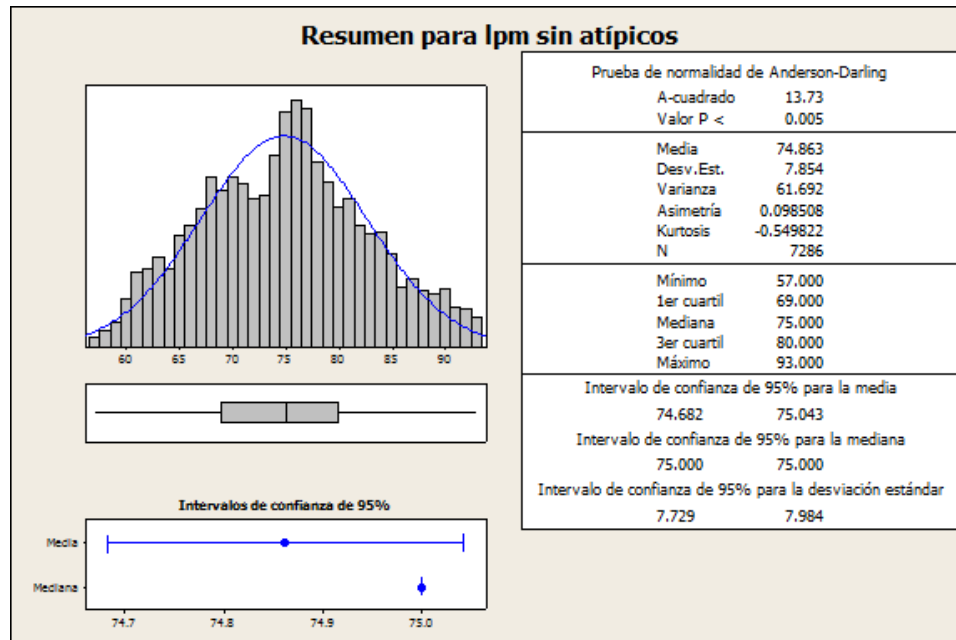


Figura 9. Resumen gráfico de la variable frecuencia cardíaca sin datos atípicos. Fuente: Elaboración propia con Minitab.

Análisis con gráficas de control

Como ejemplo del análisis propuesto usando gráficas de control y tomando los datos del operador del transporte de personal, se presentan las gráficas de todo el día del 13 de diciembre del 2022. Se analizaron los datos en intervalos de seis horas para tratar de anular la influencia de los ritmos circadianos en la variación del ritmo cardíaco. Las gráficas fueron generadas con la plataforma web antes mencionada y con la metodología de cartas de control.

En la Figura 10 se observa que, por la mañana de las cero a seis horas, el operador presenta una media de 73.60 lpm, con límite inferior de 68.69 lpm y límite superior de 78.51 lpm. Cerca de la media noche se pueden observar varios puntos fuera del límite superior. Además, de las 2:30 hrs hasta las 4:50 hrs se tienen puntos por debajo del límite superior. A partir de las 5:10 hrs se observa un aumento en su ritmo cardíaco.

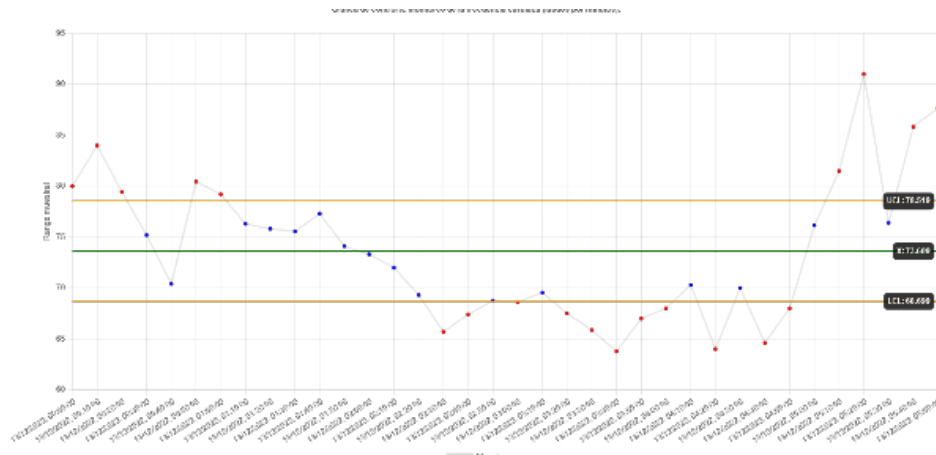


Figura 10. Datos del operador 13/12/2022 00:00hrs – 06:00hrs. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se muestra la gráfica de las seis a doce horas del día, se observa un promedio de 74.84 lpm con límites de 69.14 lpm y 80.53 lpm, inferior y superior respectivamente. Se pueden ver registros más estables con tan solo cinco puntos por fuera de los límites, sin ser más de dos casos consecutivos.

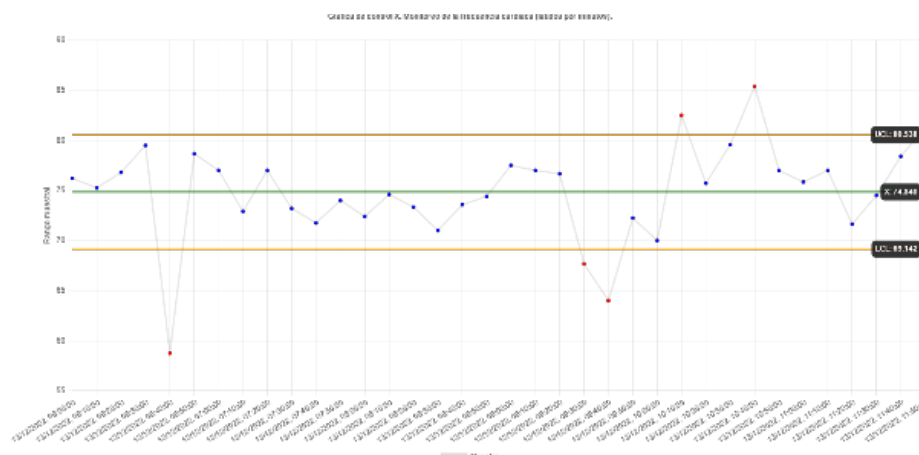


Figura 11. Datos del operador 13/12/2022 06:00hrs – 12:00hrs. Fuente: Elaboración propia

En el caso de la Figura 12, de las 12 a 18 hrs, se tiene una media de 75.40 lpm y límites de 70.21 lpm y 80.60 lpm. El periodo se observa estable con tan solo tres registros que superan el límite superior, además de cinco puntos por debajo del límite inferior. Con cuatro puntos consecutivos por debajo del límite superior es importante confirmar la causa, la cual suponemos, se debe a que el conductor pudo haber dormido durante este periodo de tiempo.

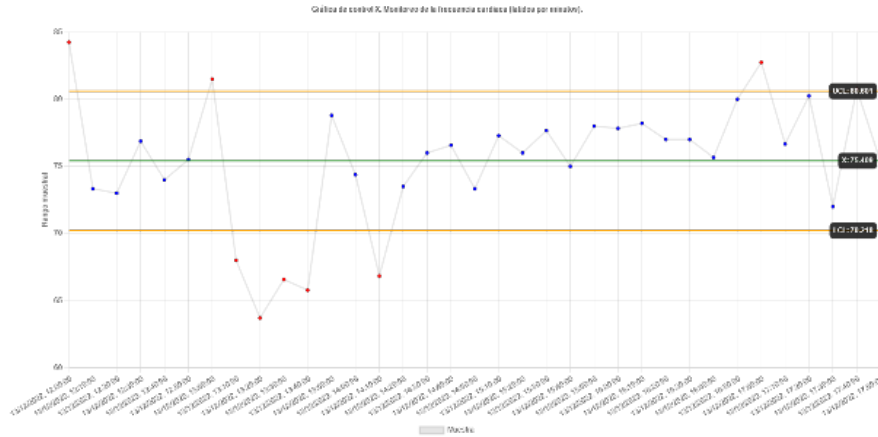


Figura 12. Datos del operador 13/12/2022 12:00hrs – 18:00hrs. Fuente: Elaboración propia.

En el periodo de tiempo de las 18 a 24 horas, en la Figura 13 se presenta un promedio de 75.81 lpm, límite inferior 69.97 lpm y límite superior de 81.66 lpm. Se puede observar que a lo largo del día tanto su promedio como los límites van en aumento, sin una caída al final del día que indiquen un reposo.

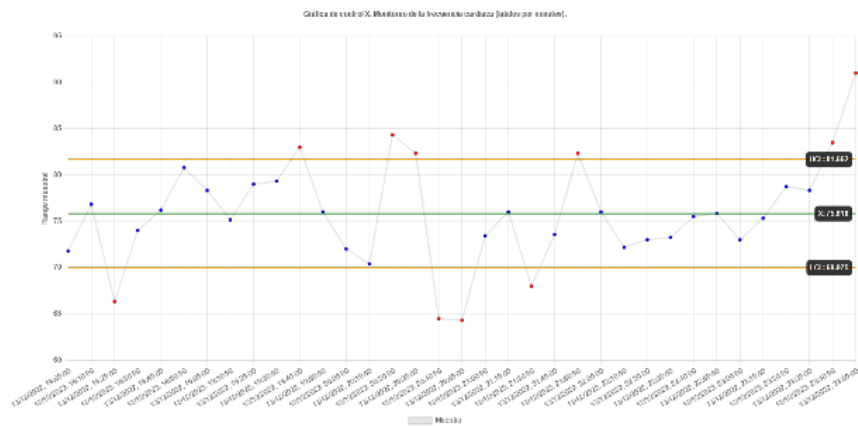


Figura 13. Datos del operador 13/12/2022 18:00hrs – 24:00hrs. Fuente: Elaboración propia.

Los ejemplos anteriores demuestran el potencial de la herramienta para el seguimiento de los operadores de transporte. De acuerdo con las reglas de análisis de las gráficas de control, el ritmo cardíaco del operador se puede considerar fuera de control, sin embargo, es necesario trabajar con un profesional de la salud para establecer reglas de lanzamiento de alertas e identificar casos atípicos.

Conclusiones

Cuidar la salud de los operadores no es solo responsabilidad de las autoridades, es necesario generar iniciativas en las cuales las empresas transportistas también se involucren y coadyuven en el cuidado de la salud de sus conductores, ya que, identificar padecimientos de manera temprana, permite su atención oportuna antes de que estos sean incapacitantes o incluso mortales para el trabajador.

Desde la perspectiva del conductor, es importante generar conciencia sobre la importancia de cuidar su salud, sus horas de sueño y sus niveles de estrés. En este punto, el sistema propuesto también podría ofrecer al conductor información sobre su estado de salud y tiempos de descanso.

En la fase actual, la aplicación web desarrollada puede representar una herramienta de apoyo para el diagnóstico de problemas de salud, a través del análisis de la frecuencia cardíaca de los conductores por periodos determinados de tiempo, favoreciendo la detección y tratamiento temprano de posibles enfermedades crónicas.

En una próxima etapa de desarrollo, se espera proporcionar un análisis a través del cual se puedan identificar patrones de posibles situaciones de riesgo y emitir una alerta a una central donde se puedan tomar decisiones pertinentes y brindar ayuda al operador en caso de ser necesario.

Reconocimientos

Se agradecen las valiosas sugerencias del Dr. Gerardo Álvarez Bucio, jefe del Departamento de Medicina Preventiva en el Transporte del Centro SICT Querétaro, al Ing. Manuel Alberto Alcocer Leos, subdirector de transporte del Centro SICT Querétaro por sus acertados comentarios y su orientación en el desarrollo del presente estudio, así como el apoyo del Dr. Eric Moreno Quintero y el Dr. Eduardo Klein Arenas, su ayuda fue muy importante para este estudio.

Referencias

- [1] M. Ngo y A. Swanson, “Necesitamos más conductores: la historia del mayor problema en la cadena de suministro”, 2021. [Online]. <https://www.nytimes.com/es/2021/11/12/espanol/escasez-choferes-camiones.html>
- [2] IRU. “Driver Shortage Global Report 2022”. The International Road Transport Union. Reports & publications, 2022.
- [3] J. Chavarría Vega, A. Mendoza Díaz, y E. Mayoral Grajeda. “Algunas medidas para mejorar la seguridad vial en la carreteras nacionales”. Instituto Mexicano del Trans-

porte [IMT], Boletín Notas No.59, 1996.

- [4] L. Montoro y F. Toledo. “El factor humano en la conducción de trenes: manual de conducción segura”. Valencia, España, Línea Editorial INTRAS, Instituto de Tráfico y Seguridad Vial, 1996.
- [5] A. C. Cuevas Colunga, M. Cadengo Ramírez, M. E. Silva Rivera y A. Mendoza Díaz. “Anuario estadístico de colisiones en carreteras federales 2021”. Instituto Mexicano del Transporte [IMT], Documento Técnico No. 85, 2022.
- [6] V. J. Soria Anguiano, A. C. Cuevas Colunga, M. E. Silva Rivera, J. M. Chavarría Vega, M. Cadengo Ramírez y A. Mendoza Díaz. “Siniestralidad vial por conducción bajo efectos de alcohol y drogas en la Red Carretera Federal”. Instituto Mexicano del Transporte [IMT], Publicación técnica No. 697, 2022.
- [7] J. A. Horne, L. A. Reyner. “Sleep related vehicle accidents”, BMJ 1995; 310 :565 doi:10.1136/bmj.310.6979.565
- [8] J. Terán Santos, G. Moreno y D. O. Rodenstein, “Medicina del sueño y profesionales del transporte. Aspectos médico-sociales con especial referencia al síndrome de apneas del sueño”. Archivos de Bronconeumología, 46(3), 143–147, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2009.08.004>
- [9] CEPAL, “Revolución tecnológica: Desafíos y oportunidades”. Foro de los países de América Latina y el Caribe sobre el desarrollo sostenible. 2019. [Online] <https://onx.la/d34d5>
- [10] Teknisa, “Rastreabilidad: ¿Qué es, y cuál es su importancia?”, 2018. [Online] <https://www.teknisa.com/es/erp/rastreabilidad/>
- [11] Sitrak, “Telemetría: La solución a los problemas empresariales”, 2018. [Online] <https://onx.la/3e071>
- [12] Beetrack, “Últimas tendencias tecnológicas en logística” Publicación N°14, 2021. [Online] <https://onx.la/8fc47>
- [13] The National Institute of General Medical Sciences [NIGMS], “Ritmos circadianos”, 2022. [Online] <https://onx.la/bf210>
- [14] WND Group, “¿Qué es el Internet de las Cosas?”, 2021 [Archivo de video]. <https://youtu.be/oRVeSTHsqxY>
- [15] Dewesoft. (2021). DEWESoft. GPS measurement and recording – GNSS. Fecha de consulta: 25 de agosto de 2021. Obtenido de: <https://training.dewesoft.com/online/course/gps-measurement-and-recording-gnss>
- [16] E. De la Torre, E. Moreno, M. Barrón y J. Piña, “Estudio exploratorio de tecnologías de seguimiento y alerta temprana en carreteras”. Instituto Mexicano del Transporte [IMT], Publicación técnica No. 656, 2021. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt656.pdf>
- [17] A. Rodríguez, L. Rojas y L. Rodríguez, “Consideraciones para pacientes con enfermedades cardiovasculares durante la pandemia de COVID-19”, Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas , 39 (3), e795. Epub 1 de septiembre de 2020. Recuperado el 18 de julio de 2023, de <https://onx.la/204c7>.
- [18] C. del Castillo, “Nissan presenta su nuevo smartwatch, Nissan Nismo”, Computer Hoy,

2013. [Online] <https://onx.la/c1eec>
- [19] Redacción TYT, “Garmin lanza reloj inteligente para ayudar a operadores a cuidar su salud”, *Revista Transportes y Turismo*, 2022, [Online] <https://onx.la/a33c4>.
 - [20] M. Fernández, “El reloj inteligente para camioneros: control del estrés y del descanso para conducir mejor”, *El Español*, 2022. [Online] <https://onx.la/e51c9>
 - [21] P. Vélez, “Diseño de un dispositivo wearable para el monitoreo de la oxigenación y ritmo cardíaco”. *Memorias Del Congreso Nacional De Ingeniería Biomédica*, (págs. 485-492), 2020.
 - [22] O. Herrera-Alcántara, A. Y. Barrera-Animas, M. González-Mendoza y F. Castro-Espinoza “Monitoring Student Activities with Smartwatches: On the Academic Performance Enhancement”. *Sensors (Basel)*, 2019. doi: 10.3390/s19071605. PMID: 30987130; PMCID: PMC6479892.
 - [23] Microsoft Corporation, “End of support for the Microsoft Health Dashboard applications and services: FAQ”, 2021. [Online] <https://onx.la/e120c>
 - [24] G. M. García Sánchez, “Monitorización de pacientes con pulseras inteligentes”. Trabajo fin de grado. Alicante, España: Universidad de Alicante, 2016.
 - [25] D. Fuller, E. Colwell, J. Low, K. Orychock, M. A. Tobin, B. Simango, N. G. Taylor, “Reliability and Validity of Commercially Available Wearable Devices for Measuring Steps, Energy Expenditure, and Heart Rate: Systematic Review”. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2020.
 - [26] E. Coutinho, M. M. Neto, M. R. Oliveira, L. Moreira y J. N. de Souza, “Asp: An iot approach to help sedentary people”, In 6th Internacional Workshop on ADVANCEs in ICT Infrastructures and Services (ADVANCE). Santiago de Chile, Chile, 2018.
 - [27] M. Peñate Garrido, “Aplicación móvil y web para la monitorización de datos recogidos por la pulsera inteligente Xiaomi MiBand 2 usando BLE y la plataforma Fi-ware”. Trabajo fin de grado. Sevilla, España, 2017.
 - [28] A. Filippoupolitis, W. Oliff, B. Takand y G. Loukas, “Location-Enhanced Activity Recognition in Indoor Environments Using Off the Shelf Smart Watch Technology and BLE Beacons”. *Sensors* 17, no 6, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17061230>
 - [29] A. Shimokawa, C. Pfeiffer y D. Gobbetti, “Gadgetbridge”, 2021. [Online] <https://gadgetbridge.org/>
 - [30] Wikipedia, “Remote Patient Monitoring”, 2021. [Online] https://en.wikipedia.org/wiki/Remote_patient_monitoring.
 - [31] H. Gutiérrez Pulido, R. de la Vara Salazar, “Control estadístico de la calidad y Seis Sigma”, México DF: Mc Graw Hill Education, 2013.
 - [32] C. Lara-Hernández, R. Melo-González, D.A. Herrera-Ruiz y J.A. Valdez-Gómez, “Control estadístico de procesos en tiempo real de un sistema de endulzamiento de gas amargo. Metodología y resultados”, *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 26, núm. 2, julio-diciembre, 2011, pp. 57-74.
 - [33] Western Electric, “Manual del usuario de Business Objects Process Analysis”, 2008. [Online] <https://onx.la/76632>

Capítulo 4

Metaheurísticas para la planificación de demanda y optimización de rutas de vehículos en problema de reabastecimiento de combustible de estaciones de servicio: un caso de estudio

Danisa Romero-Ocaño, Víctor M. Valenzuela – Alcaraz, Kevin Alejandro Galaviz Gámez, Miguel Alejandro Siqueiros Parra

Resumen— Los pagos de tiempo extra a los empleados de una empresa son un factor esencial en sus gastos operativos. Generar tiempo extra es una alternativa para atender las altas exigencias laborales; sin embargo, la mayoría de las veces genera insatisfacción laboral y pagos innecesarios. La presente investigación es una aplicación real y tiene como objetivo solucionar el problema de una empresa dedicada a la distribución de productos derivados del petróleo. La empresa tiene altos costos en recursos humanos con su plan logístico actual. Las técnicas actuales no son suficientes para hacer frente a este problema, conocido como problema de rutas de vehículos. En este artículo, se presentan dos algoritmos evolutivos modificados con el fin de ajustar la demanda y minimizar el costo total de visitar las gasolineras a las que distribuye su producto y las horas extras en los choferes. Con el fin de comparar el desempeño de dos algoritmos, se realizaron dos diferentes estudios: primero, se resolvió el problema de ruta de vehículos tradicional, comparando los resultados con otros algoritmos reportados en la literatura explorada. En el segundo experimento, los resultados computacionales mostraron que la planificación de rutas con ambos algoritmos propuestos es competitiva en las instancias de referencia y supera el método de entrega actual utilizado por la empresa de distribución de productos petrolíferos con una mejora significativa.

Palabras Clave— Algoritmos genéticos; optimización de enjambre de partículas;

Introducción

La distribución de productos desde depósitos (almacenes) específicos hasta sus usuarios finales juega un papel fundamental en la logística y la planificación de una empresa, la optimización de las rutas de transporte implica un ahorro de costos considerables [1]. Se estima que el costo de transporte representa entre el 10 y el 20 por ciento del costo final de los bienes [2]. Uno de los problemas más comunes y estudiados en la optimización de operaciones logísticas es el Problema de Rutas de Vehículos (VRP) [3-5].

El VRP consiste en determinar un conjunto de m rutas con el fin de que cada cliente pertenezca a alguna de ellas, minimizando la distancia total de recorrido, además cada ruta inicia y termina en el depósito. La demanda total de los clientes atendidos en una ruta no debe superar la capacidad de carga del vehículo [2]. Al resolver un VRP se consideran diferentes restricciones, como la capacidad del vehículo, el horario de trabajo del conductor, los horarios de entrega y las relaciones de precedencia. El problema que se aborda en esta investigación consiste en encontrar rutas que permitan el mínimo tiempo para satisfacer la demanda de un conjunto de clientes; sin embargo, las restricciones a considerar de acuerdo a las especificaciones de la Empresa distribuidora de productos derivados del petróleo que se estudia en este proyecto (*Empresa*), no son las restricciones de un VRP tradicional; en la literatura explorada, el problema que estudia el reabastecimiento en gasolineras se conoce como “Problema de Reabastecimiento de Estaciones de Petróleo (PSRP)” [6].

El PSRP es diferente de los VRP [7], debido a los compartimentos de los vehículos de distribución de combustible. Además, la ausencia de medidores de flujo en estos compartimentos significa que el contenido de un compartimento no se puede dividir entre diferentes gasolineras, es decir, el vehículo atiende a un cliente a la vez [8-12].

La comunidad de investigadores y profesionales han estudiado el problema de reabastecimiento durante las últimas tres décadas [8-10, 11, 13-19]. Aunque la mayoría de los estudios de investigación se han centrado en la versión del problema de un solo período, es decir, un horizonte de un solo día, algunos estudios han demostrado que al extender el horizonte de planificación considerando la variante de múltiples períodos [9-11, 13-16, 18, 20, 21], puede generar ahorros significativos.

Una de las contribuciones de este trabajo es modelar un problema de la vida real de una empresa distribuidora de gasolina, tomando como base los modelos existentes del PSRP, adaptándolo a las restricciones de la *Empresa*, las cuales son: (1) los camiones donde se transporta la gasolina deben seguir una ruta autorizada por las autoridades de la ciudad, restringidas por estar transportando materiales altamente inflamables, (2) los camiones

deben atender una gasolinera, descargar el producto en su totalidad y regresar al depósito para recargar nuevamente el camión a su capacidad total y atender la siguiente gasolinera (llamada directa); y finalmente, (3) el número de camiones disponibles con los que cuenta la *Empresa* tienen sus restricciones de capacidad de carga y limitaciones en cuanto al tipo de material que puede ser transportado, además la restricción de la jornada laboral diaria, está limitada a 8 horas.

La solución propuesta para este problema tiene como objetivo encontrar el menor costo operativo generado al atender la demanda de los clientes (gasolineras), minimizando el tiempo de entrega de combustible y el tiempo de trabajo del chofer del vehículo; considerando la planificación de la demanda en un período semanal.

Un concepto similar se introduce por Rizzoli, Casagrande [15]. Los autores presentan un programa basado en la metaheurística de colonias de hormigas; el programa ajusta la demanda de los clientes al aceptar pedidos cuando el camión ya se encuentra en trayectoria.

Para resolver el problema que se aborda en este trabajo, se compararon dos algoritmos ampliamente estudiados en la literatura: el algoritmo genético tradicional (AG) [22] y la metaheurística basada en la optimización de enjambre de partículas (PSO) [23]. Ambos algoritmos han sido ajustados en la fase de construcción de soluciones factibles al incluir el proceso de planificación de la demanda. Los AG han demostrado ser altamente eficientes y han proporcionado soluciones de calidad en un tiempo considerable en este tipo de problemas de rutas [26, 27], son ampliamente estudiados, se pueden consultar en la literatura [29] y se han aplicado a varios problemas relacionados con rutas de vehículos [25, 30]. Los algoritmos basados en enjambres han surgido como una familia de algoritmos inspirados en la naturaleza, basados en poblaciones capaces de producir soluciones robustas, rápidas y de bajo costo para varios problemas complejos [31-33]. PSO se basa en dos metodologías principales: una es la simulación de la vida real en inteligencia artificial, es un algoritmo de búsqueda de población, basado en la simulación del comportamiento social de las aves dentro de una bandada, está relacionado con la computación evolutiva, los algoritmos genéticos y las estrategias de evolución [23]. El algoritmo PSO presenta una amplia gama de aplicaciones en muchos dominios de la informática y las matemáticas aplicadas, como el cálculo de pesos de redes neuronales [34], análisis de series temporales [35] y VRP [36].

Para analizar y verificar la efectividad de los algoritmos propuestos se comparan con investigaciones previas en casos de prueba de referencia. Los algoritmos se aplican a una red regional de abastecimiento de gasolina. El principal problema de la *Empresa* es que presenta altos costos de recursos humanos derivados del tiempo extra pagado a los choferes, necesario para satisfacer la demanda requerida por sus clientes.

Esta investigación modela dos algoritmos basados en restricciones del PSRP minimizando los costos de horas extras de la *Empresa* y diseñando rutas que satisfacen la de-

manda de las gasolineras, en el mínimo tiempo total de trayectoria posible, considerando la planificación de la demanda. Los hallazgos alcanzados al solucionar este problema permiten a la *Empresa* reducir en un 100% las horas extras, atendiendo las demandas diarias de las gasolineras. Las contribuciones de este artículo son: (1) considerar los algoritmos evolutivos AG y PSO con un enfoque adicional de planificación de la demanda para el PSRP en la fase de construcción de la solución factible. (2) Considerar en el modelo de optimización la restricción de la jornada laboral diaria para disminuir los costos de horas extras generados en las empresas. (3) Presentar soluciones a un problema de la vida real, reduciendo los costos de horas extras de la empresa.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección II describe trabajos relacionados en la solución del VRP y el PSRP, la Sección III describe el problema abordado, la Sección IV explica la heurística utilizada. La Sección V describe la configuración experimental y los resultados obtenidos. Finalmente, las discusiones y conclusiones se presentan en la Sección VI.

Revisión de literatura

Los siguientes párrafos se abordan dos aspectos: aplicaciones del VRP e investigaciones actuales del PSRP.

Aplicaciones del VRP

El VRP se ha estudiado ampliamente través de los años, revisión de la literatura relacionada se puede consultar en diferentes investigaciones como [37-40]. Existen varias aplicaciones del VRP en la literatura, por ejemplo, en el campo médico [41-43], en la recolección de desechos [44, 45], en la distribución de productos perecederos [46, 47]. Además, se han llevado a cabo diferentes aplicaciones en empresas de renombre, como la investigación realizada por Azad y Hasin [48] en una empresa cementera en Bangladesh. En las empresas de Wal-Mart [49] y en Toyota Motor Corporation [50].

Lin, Shi [51] proponen un algoritmo eficaz para el VRP en Internet de las cosas. En la planta industrial “Circuito JABIL” de la ciudad de Chihuahua, México [52]. Wang y Wasil [53] presentan una compilación de artículos especificando procedimientos de solución en aplicaciones prácticas.

Problema de Rebastecimiento a Gasolineras

Brown y Graves [10] introducen una de las primeras aplicaciones del PSRP, considerando el problema de las entregas directas y las ventanas de tiempo. Un resumen comparativo de la literatura relevante que involucra métodos de solución, función objetivo; trayectoria, número de camiones, ventanas de tiempo (intervalo de tiempo en el que se debe atender

a los clientes), restricciones de flota heterogénea y camiones con diferentes capacidades se presenta en la Tabla I; donde múltiple se refiere a camiones que tienen más de un compartimiento y simple, a un solo compartimiento. Finalmente, la trayectoria directa significa que el camión solo atiende a un cliente, y se regresa al depósito a cargar para atender otro cliente. El presente trabajo se resuelve con 13 camiones de un compartimiento y un camión de dos compartimentos, es diferente de los investigados en la literatura por la función objetivo a optimizar, el algoritmo utilizado para resolver el problema y la trayectoria asignada a los camiones.

Tabla 1. Revisión de literatura del psrp

Artículo	Ventana de tiempo	Flota heterogénea	Número de Camiones compartimento	Función Objetivo	Método de Solución	Trayectoria
[8]		✓	Ilimitado / multiple	Costo de trayectoria	Método exacto	Directa
[9]			430/multiple	Costo de trayectoria, y de carga	Utiliza un sistema informático	Directa
[10]	✓		28/múltiple	Costo de trayectoria	Algoritmo de larga escala	Directa
[11]		✓	6/multiple	Costo de trayectoria	Branch-and-Price y una heurística	Directa
[12]	✓	✓	Ilimitado / multiple	Costo total distribución	Un algoritmo híbrido AG-PSO	Directa
[13]		✓	NE / multiple	Costo de trayectoria	Búsqueda de vecindario variable	Varios clientes
[14]		✓	5/multiple	Costo de trayectoria	Cuatro heurísticas diferentes	Varios clientes
[15]	✓	✓	NE / multiple	Costo de trayectoria y vehículos	Algoritmo de colonia de hormigas	Varios clientes
[16]		✓	Ilimitado / multiple	Costo de trayectoria	Método heurístico de tres fases	Varios clientes
[17]	✓		Ilimitado / dos	Costo de trayectoria y fijo	Búsqueda ramificada y búsqueda tabú	Varios clientes
[18]	✓	✓	1500 / multiple	Costo de trayectoria y de carga	Búsqueda tabú	Varios clientes
[19]	✓	✓	Ilimitado / multiple	Costo de trayectoria	Tres heurísticas diferentes	Varios clientes
[20]	✓	✓	3/multiple	Maximiza beneficios	Heurísticas pre-selección de arco y de ruta	Varios clientes
[21]		✓	20/multiple	Longitud total de la ruta	Algoritmo de búsqueda adaptativa	Varios clientes
Este artículo		✓	14/individual	Tiempo de trayectoria y tiempo de trabajo	Algoritmo Genético y PSO	Directa

De acuerdo con la revisión bibliográfica explorada, el problema PSRP fue abordado recientemente con un AG en [12, 19]; consideran ventanas de tiempo. Nótese que en ninguno de los trabajos enumerados en la Tabla I se ha abordado el PSRP para minimizar el costo de trayectoria y restringir el tiempo fijo de trabajo diario. Ambos objetivos representan un factor importante en los gastos operativos de las empresas, y es fundamental minimizarlos.

Modelo general y descripción del problema

En términos generales, el objetivo de las estaciones de servicio es entregar productos derivados del petróleo a las gasolineras, utilizando una flota ilimitada y heterogénea de camiones con compartimentos, asignando productos a los compartimentos de los camiones y diseñando rutas óptimas de entrega a las gasolineras.

Características del Problema

Las características a considerar para la solución del problema de la *Empresa* son las siguientes:

Camiones con diferentes capacidades con un solo compartimento y dos con doble compartimentos. Los camiones inician cargados con el producto derivado del petróleo a entregar y descargan en su totalidad en cada visita al cliente.

Los camiones deben regresar al depósito después de terminar la tarea de entrega. Además, teniendo en cuenta la carga de trabajo, el camión puede salir del depósito varias veces al día.

Se debe satisfacer la demanda en cada gasolinera.

Se considera un tiempo de recarga y descarga fija para los camiones (30 minutos).

Se conocen los tiempos de recorrido entre las gasolineras y entre el depósito y cada una de las gasolineras, se supone que estos tiempos no varían con las condiciones del tráfico.

Siempre se supone que la velocidad del camión es constante.

El tiempo de trabajo diario está restringido a 8 horas para cada camión.

La Figura 1 muestra un ejemplo de cómo se construyen rutas, se muestra dos rutas con dos diferentes camiones de entrega; uno de ellos logra atender a dos gasolineras. El camión 1 requiere 160 minutos para trasladarse del depósito a la ubicación de la gasolinera #1, 30 minutos para descargar gasolina, 160 minutos para regresar al depósito. Una vez en el depósito, se tarda 30 minutos en rellenar el producto y se transporta a la gasolinera #2, con un tiempo de ida y vuelta de 29 minutos cada vez. El camión requiere un tiempo

total por día de 468 minutos, cumpliendo con la restricción de no exceder los 480 minutos por día y sirviendo 40,000 litros. El camión 2 atiende a la gasolinera #3 con una demanda de 30,000 litros de producto y requiere un tiempo de ida y vuelta más tiempo de descarga de 440 minutos.

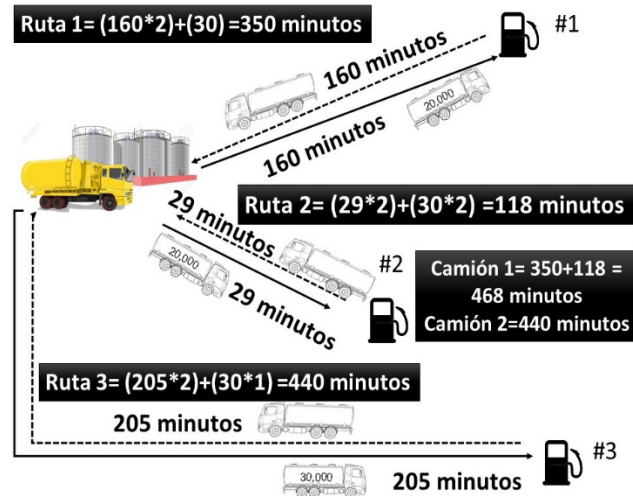


Figura1 Ejemplo de las rutas de dos camiones

Descripción General del Modelo

En esta Sección, se formula un modelo general para minimizar el tiempo total de trayectoria del camión restringiendo el tiempo de trabajo diario a 480 minutos.

Sea un grafo, donde V es el conjunto de nodos y E es el conjunto de arcos:

Arcos e , se les asocia un tiempo de trayectoria t_e . El nodo 0 representa el depósito donde una flota V de vehículos con capacidad limitada Q está disponible en el momento 0 y devuelto en el momento T . Los nodos $1, \dots, N$ representan las gasolineras a las que se prestará servicio, cada una de las cuales requiere una cantidad particular no negativa de un producto derivado del petróleo. De acuerdo al modelo matemático presentado en [54], las variables de decisión son las siguientes: si el viaje del vehículo recorre el arco e , y 0 en caso contrario, si el viaje del vehículo visita el vértice i , 0 en caso contrario, donde $i \in \{1, \dots, N\}$. El modelo es entonces el siguiente:

Minimizar

En este trabajo, las rutas de cada camión están limitadas por el gobierno, por lo que el tiempo total de la ruta se define como T , donde t_0 es el tiempo de viaje desde el depósito hasta la gasolinera, t_i es el tiempo de descarga del combustible, t_1 es el tiempo de viaje

desde la gasolinera hasta el depósito y, es el tiempo que tarda en recargar el vehículo para visitar la siguiente gasolinera. Las restricciones consideradas son:

La restricción (1), representa la función objetivo, es decir minimiza el tiempo de trayectoria. La restricción (2) asegura que cada gasolinera sea visitada solo una vez. Restricción 3 y 4 aseguran que los camiones inician y terminan en el depósito. Restricción (5), la demanda de las gasolineras debe ser satisfecha y no exceder la capacidad Q del camión, en la restricción (6) se consideró el tiempo de trabajo diario que no debe excederse (. Cada camión no debe exceder los 480 minutos por día de viaje. Las restricciones (7) y (8) definen el dominio de las variables de decisión. Analizando las restricciones y formulación anterior, se prueba la complejidad del problema a resolver, ya que considerando los datos de la empresa, donde se deben visitar aproximadamente 100 clientes diarios con 14 vehículos, los cuales deben de atender un cliente a la vez y cada vehículo solo puede transportar un tipo de combustible, y además, los vehículos no deben exceder 480 minutos diarios. Dado que el PSRP es en sí mismo una generalización del VRP, que pertenece a la clase de problemas NP-difíciles, concluimos que nuestro problema también es NP-difícil. Para resolver el PSRP estableciendo como restricción fija el tiempo de trabajo diario y minimizando el tiempo total de viaje, se adaptaron dos algoritmos: AG (AG_R1) y PSO (PSO_R1), ambos descritos en la siguiente sección.

Heurísticas propuestas

A continuación, se describen las metaheurísticas utilizadas en este trabajo, las cuales se ajustan con la planificación de la demanda y las restricciones de tiempo de trabajo; en la fase de construcción de la solución, explicada a continuación.

Algoritmo Genético

Los algoritmos genéticos [55] se definen como una técnica de programación que imita el proceso evolutivo de las especies para resolver problemas de búsqueda y optimización [56]. Es una técnica de inteligencia artificial inspirada en la idea de que sobrevive el que está mejor adaptado al medio, el procedimiento comienza con un conjunto o “población” de soluciones candidatas o “individuos” a quienes se les calcula una medida denominada “adaptación” o fitness e indica que el mejor es el que gana. A continuación, se explica a detalle:

Representación: El punto de partida para cualquier AG está en la representación de cada solución o miembro de la población. Normalmente, se utiliza un cromosoma (permutación). Las posiciones individuales dentro de cada cromosoma se conocen como genes. La representación utilizada en este trabajo es similar a la introducida por Chu y Beasley [57]. La representación basada en permutaciones codifica una solución como una se-

cuencia de gasolineras [58], que describe el orden en el que se deben de atender. Por ejemplo, la permutación [3, 4, 1, 2, 5] representa una solución de cinco gasolineras por atender, los elementos de la permutación se generan aleatoriamente, primero se debe atender a la gasolinera 3, seguida de las gasolineras 4, 1, 2 y 5.

2) Construcción de Soluciones Factibles: Para obtener soluciones factibles se aplica el procedimiento descrito en el Algoritmo 1.

3) Función Objetivo: La función objetivo es minimizar el tiempo total al atender todas las gasolineras (aptitud), en esta investigación se establece como se muestra en la ecuación (1). La función objetivo se calcula en el procedimiento para la construcción de rutas factibles (Sección IV.A.2).

Población inicial: El algoritmo genético comienza con un conjunto inicial soluciones (P), cada una representa una ruta factible generada aleatoriamente. En cada generación, la función objetivo se evalúa para cada solución en la población, y a cada individuo se le asigna un valor de aptitud que impulsa el proceso de selección natural.

5). *Proceso Reproductivo y de Selección:* : Se utiliza el cruce de un punto [59], que consiste en seleccionar al azar dos individuos (padres) de la población, sus cromosomas se dividen a través de un punto seleccionado al azar para generar dos segmentos: la primera parte, el lado izquierdo del cruce, se hereda a las nuevas soluciones (hijo1 e hijo 2) en el mismo orden, esto es, el padre 1 hereda al hijo1 y el padre 2 hereda al hijo 2, y la segunda parte, del punto de cruce, el lado derecho de cada padre se inserta en la descendencia opuesta en el orden en que aparecen, omitiendo los valores que ya existen en la nueva descendencia, generando así la nueva generación. De esta forma, ambos descendientes heredan la información genética de los padres. La Figura 2 muestra un ejemplo del proceso de cruce.

Algoritmo 1: Construyendo soluciones factibles

N , número total de estaciones a visitar durante el día

q_i , demanda de las gasolineras

t_j , tiempo acumulado del camión j

k , número total de camiones

$V=\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ conjunto de camiones

Q_j , Capacidad del vehículo j , donde $j = 1, 2, 3, \dots, k$

Entrada: una permutación de gasolineras $S=\{s_1, \dots, s_N\}$

Salida: v subrutinas, $R=\{r_1, r_2, \dots, r_v\}$

For $i = 1$ a N do

 Seleccionar gasolinera s_i

$q_i \leftarrow$ determinar la demanda de s_i

$j=1$

 while s_i no se asigna o no se reprograma do

 If $(Q_j == q_i)$ then

 If $(t_j \leq 480 \text{ minutos})$ then

 Asignar si el camión v_j

 End if

 End if

 If $(j == k)$ then

 Reprogramar s_i al siguiente día

 End if

$j+1$

 End while

End for

Return $R=\{r_1, r_2, \dots, r_v\}$

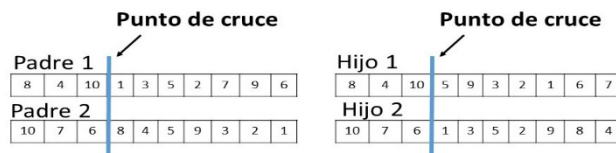


Figura 2. Aplicación del operador de cruce

La mutación intercambia aleatoriamente la posición de dos genes [56], como se muestra en la Figura 3, un ejemplo del hijo 1, donde los números seleccionados al azar son 4 y 2 intercambiando la posición. Después de aplicar operadores genéticos, la población de hijos reemplaza a la generación de padres para formar la siguiente generación.

6). *Criterio de Terminación*: Se utiliza un tiempo máximo de ejecución (tiempo de parada) como condición de parada. Al final de la ejecución, el algoritmo devuelve la solución con la mejor aptitud lograda.

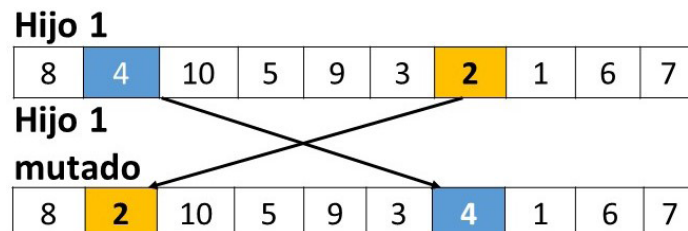


Fig. 3. Aplicación del operador de mutación de intercambio

Algoritmo PSO

PSO consiste en un algoritmo iterativo basado en una población de individuos llamada enjambre. Se dice que cada individuo, llamado partícula, sobrevuela el espacio de decisión, en busca de soluciones óptimas. PSO es muy eficiente para resolver problemas de optimización [60]. A continuación, se describe el procedimiento básico del PSO presentado por Eberhart, Shi [31].

Inicia con una población de partículas con posición y velocidad generada aleatoriamente en d dimensiones del espacio del problema. La población se genera como se describe en la Sección IV.A.1. Para cada partícula, se evalúa la función de aptitud con la ecuación (1).

Se compara el valor de aptitud de la partícula con el $pbest$. Si el valor actual es mejor que $pbest$, se reemplaza $pbest$ y la ubicación de $pbest$ iguala la posición en el espacio d -dimensional. Conceptualmente el $pbest$ es la mejor solución (según el valor de aptitud) alcanzada por la partícula hasta ese momento.

Comparar la evaluación de aptitud con el promedio del mejor valor anterior de la población. Si el valor actual es mejor que $gbest$, se reemplaza $gbest$ al valor e índice actual de la matriz de partículas. El $gbest$ es el mejor valor obtenido de la aptitud y la respectiva posición obtenida por cualquier partícula del enjambre. Cambiar la velocidad y la posición de la partícula r de dimensión s , según las Ecuaciones (8) y (9), respectivamente.

Dónde:

τ es el número de iteraciones, w es el peso inercial utilizado para controlar la exploración y explotación. Las constantes c_1 y c_2 son coeficientes de aceleración para determinar si las partículas prefieren moverse cerca de las posiciones $pbest$ o $gbest$. Los números $rand_1$ y $rand_2$ son números uniformes distribuidos entre 0 y 1.

6. Volver al paso 2 hasta que se cumpla el criterio de parada, normalmente, el criterio es obtener un valor de aptitud o alcanzar un número máximo de generaciones. A continuación, se presentan los resultados obtenidos al resolver el problema con los dos algoritmos estudiados.

Resultados

Ambos algoritmos descritos anteriormente fueron codificados en C++ ejecutados en una computadora personal Lenovo con un procesador Intel (R) Core (TM) i7-5500 UCPU@2.40 GHz. Los parámetros de rendimiento de los dos algoritmos se establecieron iguales para garantizar una comparación justa (Tabla II y Tabla III).

AG_R1 y PSO_R1 se adaptaron para resolver el problema VRP y se comparó el desempeño de ambos algoritmos con dos propósitos: (1) comparar el desempeño usando los casos de prueba disponibles en la biblioteca OR (ver Beasley [29]), y (2) ajustar los parámetros de los algoritmos. Los parámetros de AG_R1 se calibraron utilizando el método Taguchi [61], mostrados en la Tabla II. Los parámetros PSO_R1 se tomaron del trabajo presentado por Okulewicz y Mańdziuk [62] (Tabla III).

Tabla 2. Parámetros de ag-r1

Parámetros	Valor
N = Tamaño de la población	100
Pm = Probabilidad de mutación	0.3
Pc = Probabilidad de cruce	1
<i>Tiempo de parada</i>	30 min

Tabla 3. Parámetros de PSO-R1

Parámetros	Valor
g = factor de atracción del sector	0.60

l = factor de atracción local	2.20
a = Coeficiente de inercia	0.63
$P(X \text{ es vecino de } Y)$	0.50
Partículas	100
Tiempo de parada	300 m.

El porcentaje de *Gap* se calcula para cada solución de acuerdo con la siguiente fórmula, ver ecuación (10).

Donde, *Valor encontrado* es el mejor valor obtenido por el algoritmo, *Mejor valor conocido* representa el valor de solución mejor conocido en ese momento para cada caso de prueba, tomado de [63]. Cada caso de prueba, AG_R1 y PSO_R1 fueron ejecutados 30 veces.

Comparación con Otros Algoritmos

Los resultados obtenidos se compararon con algunas metaheurísticas de última generación: recocido simulado (SA) [64], búsqueda tabú (BT) [65], Algoritmo genético (AG) [25] y algoritmo genético híbrido (AG-H) [25]. Optimización de colonias de hormigas (ACO) [66], algoritmo mejorado de colonias de abejas artificiales (EABCA) [67] y PSO multiobjetivo de 2 fases (MPSO) [68].

La diferencia de AG [25] a AG_R1 radica en la construcción de soluciones; el AG genera una población de tamaño 30 para casos de 50 clientes y lo hace de dos formas: aleatoria y estructurada, AG-R1, genera una población inicial con 100 individuos aleatorios y construye soluciones factibles, además, en el proceso de reproducción AG usa el cruce de 2 puntos, mientras que AG-R1 usa el cruce de un punto. El tiempo de parada considerado para AG-R1 fue de 3,200 segundos en el VRP, y la mejor solución obtenida se reporta después de ejecutar el algoritmo 30 veces.

La Tabla IV muestra los resultados de siete casos de prueba. La primera columna corresponde al número de ciudades (tamaño del caso de prueba), Q describe la capacidad de carga del vehículo, V representa el número de camiones, mejor conocido corresponde al valor de la solución mejor conocida reportado en la literatura hasta este momento. Mejor es la solución reportada y *Gap* es el porcentaje obtenido para cada conjunto de casos de prueba; las últimas columnas representan el promedio *Gap* de los algoritmos AG_R1 y PSO_R.

Como se muestra en la Tabla IV, los resultados de AG_R1 superan en cuatro casos a los presentados por el SA. Por otro lado, AG muestra resultados menos eficientes en términos de % *Gap* que TS en todos los casos. De manera similar, AG_R1 es mejor en

seis casos de prueba en comparación con AG. Asimismo, en comparación con AG-H, el AG_R1 es mejor en un caso de prueba y peor en seis casos. Además, en comparación con ACO, los resultados son mejores en cinco casos de prueba, presentando el mismo comportamiento en cuanto a EABCA y MPSO. Finalmente, en términos del % *Gap* total, en comparación con todos los algoritmos, AG_R1 es mejor (menor) que SA, AG, AG-H, ACO, EABCA y MPSO y peor que TS.

Los resultados obtenidos de PSO_R1, muestran que no son mejores en la mayoría de los casos. En cinco casos de prueba se logró mejorar los resultados de los mejores conocidos: el caso 100C mejora el resultado de AG, ACO y, EABCA, el caso 120 mejora el resultado de SA y el caso 150 mejora el resultado reportado por ACO.

Resultados en la Empresa de Estudio

Los experimentos computacionales realizados para evaluar el desempeño de los algoritmos AG_R1 y PSO_R1 sobre los datos proporcionados por la *Empresa* se muestran a continuación.

1) Experimentos con datos reales de la Empresa.

La investigación involucra casos con un depósito y 50 gasolineras, cada una requiere cuatro tipos de productos de gasolina: (1) magna, (2) premium, (3) Diesel automotriz y (4) Diesel industrial. La *Empresa* cuenta con catorce camiones: once con capacidad de 20, 000 litros, uno con doble tanque de 10, 000 litros y dos de 30, 000 litros cada uno. Para controlar la calidad de la gasolina y garantizar la seguridad durante el proceso de transporte, la gasolina de cada camión debe descargarse en su totalidad en cada gasolinera. El tiempo promedio en minutos generado durante seis días por cada vehículo para atender las demandas de las gasolineras, datos presentados por la *Empresa* se presenta en la Tabla V.

El tiempo reportado considera el tiempo que se tarda un camión en trasladarse del depósito a una gasolinera, descargar el combustible y regresar a la planta o depósito y volver a cargar el camión para atender la demanda de la siguiente gasolinera

La información muestra que el tiempo estándar de una jornada laboral de 8 horas (480 minutos) se extiende diariamente (marcado en negrita). Del mismo modo, la planificación de la demanda no es equitativa, algunos camiones con la misma capacidad de carga tienen un tiempo de viaje diferente entre ellos; por ejemplo, en la Tabla V, el camión uno tiene un tiempo de trayectoria de 848 minutos el día dos, mientras que el camión once tiene 255 minutos trabajados durante el mismo día; casos similares se observan en los días siguientes.

2) Solución al problema de la Empresa

El caso de la vida real se ejecutó diez veces con los algoritmos AG_R1 y PSO_R1, se

restringió cada camión a 480 minutos por día, considerando la demanda planificada, de acuerdo a los datos de la *Empresa*. La Tabla VI reporta los 14 camiones y el tiempo diario necesario para atender las gasolineras asignadas. Como cada vehículo tiene la restricción de no exceder las 480 horas, quedan gasolineras sin asignar. Por ejemplo, en el día uno, los resultados de AG_R1 muestran que quedan siete gasolineras sin asignar con un tiempo acumulado de 1070 minutos, representado en la Tabla VI como 7(1070).

La demanda desatendida total fue de 140,000 litros de gasolina el día uno, como se especifica en las últimas líneas, dos gasolineras de 10.000 litros, representadas como 2(10,000) y 5 de 20,000 litros 5(20,000).

La demanda desatendida total fue de 140,000 litros de gasolina el día uno, como se especifica en las últimas líneas, dos gasolineras de 10.000 litros, representadas como 2(10,000) y 5 de 20,000 litros 5(20,000).

Tabla 4. Comparación con otros trabajos del VRP

[illegible]

Tabla 5. Tiempo promedio (minutos) por vehículo planificación de demanda de la empresa

Camiones	Días					
	1	2	3	4	5	6
1	580	848	540	420	295	540
2	540	790	580	400	395	310
3	425	425	818	440	610	560
4	445	583	460	300	470	320
5	495	855	350	285	313	240
6	550	380	360	250	285	200
7	610	350	423	720	380	450
8	460	390	505	503	410	275
9	405	680	705	430	390	308
10	450	360	350	320	270	340
11	595	255	520	334	235	0
12	419	630	950	570	354	550
13	540	710	520	440	720	730
14	390	510	370	590	770	695

Analizando los resultados obtenidos al aplicar el PSO-R1 en el día uno, podemos observar en la que seis gasolineras no fueron atendidas durante el día, totalizando 860 minutos. De estas seis gasolineras, 2 requirieron 10,000 litros y cuatro gasolineras requirieron 20,000 litros, totalizando 100,000 litros no entregados. Comparando los tiempos que actualmente se reportan (Tabla V) con los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos AG-R1 y PSO-R1 (Tabla VI), se observa que la distribución del tiempo en los camiones es más uniforme. Sin embargo, los resultados no son satisfactorios para la empresa; ya que el tiempo extra disminuye, pero se dejan de atender clientes, y sus ventas disminuirían significativamente.

La propuesta presentada a la empresa consiste en ajustar la planificación de la demanda y limitar los camiones a 480 minutos por día. El procedimiento consiste en realizar una re-planificación periódica de la demanda por semana, considerando los cambios necesarios en los días de entrega de combustible, estableciendo convenios con gasolineras para establecer las fechas de entrega, sin afectar su logística y la atención al cliente. Esta re-planificación se implementa como un ajuste en ambos algoritmos. Con la capacidad actual de los camiones de la *Empresa* con planificación de demanda optimizada, es posible atender la demanda de las gasolineras con un tiempo igual o menor a 480 minutos

por camión, como se muestra en la Tabla VII con un tiempo igual o menor a 480 minutos por camión, como se muestra en la Tabla VII.

En la Tabla VII, observamos que es necesario realizar algunos ajustes en la fase de programación de la planificación, ya que los algoritmos AG_R1 y PSO_R1 han demostrado que es posible atender las gasolineras con los 14 camiones que tiene en su inventario, sin necesidad de superar una jornada diaria de 480 horas. Comparando los resultados obtenidos de 6 días laborables, 4 de ellos, el algoritmo PSO_R1 proporciona menos tiempo. La Figura 4 muestra el tiempo promedio diario en diferentes escenarios que se han revisado en este artículo: (1) el tiempo reportado por la empresa, (2) el tiempo extra generado al optimizar los tiempos diarios con el AG_R1 con restricción de 480 minutos sin ajustar planificación de demanda, (3) el tiempo extra generadas al optimizar los tiempos diarios con el PSO_R1, con restricción de 480 minutos sin ajustar planificación de demanda (4) las horas extras generadas al reprogramar la demanda en una semana y aplicar AG_R1 y finalmente, (5) las horas extras generadas al reprogramar la demanda en una semana y aplicar PSO_R1. Los resultados muestran que la empresa actualmente genera 5,342 minutos de horas extras en promedio en una semana. En base a los resultados obtenidos se demostró que ambos algoritmos reducen a cero las horas extras al reprogramar la demanda de una semana en base a los resultados.

C). Análisis de Sensibilidad de AG-R1 y PSO-R1

Con el propósito de comprobar los resultados obtenidos en la empresa con los algoritmos AG-R1 y PSO-R1, se realizó un análisis de sensibilidad del tamaño de la población y el tiempo de parada de cada algoritmo. Se eligieron estos dos parámetros ya que el tamaño de la población y el tiempo de parada presentan el siguiente comportamiento: si se mantiene fijo el tamaño de la población existe un tiempo de parada que asegura convergencia; y, a medida que el valor del tamaño de la población sea más alto normalmente se logran mejores soluciones, sin embargo, habrá un valor del tamaño de la población para el cual la variación en la solución no es significativa [69-71]. Para realizar este análisis se decidió utilizar los datos del día 6, ya que como se observa en la Tabla VII es el día que en total presenta mayor tiempo. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla VIII y las Figuras 5 y 6, donde se observa que a partir de los 300 minutos los resultados obtenidos no muestran variación significativa y que a medida que se aumenta el tamaño de la población mejoran los resultados, sin embargo, no es relevante el aumento del número de la población, ya que la función objetivo establecida en el presente proyecto es atender a las gasolineras en un tiempo que no exceda los 480 minutos diarios. Por lo que establecer los parámetros de 300 minutos de tiempo de parada y el tamaño de la población igual a 100 se considera que el algoritmo se estabiliza, ya que no es posible mejorar debido a la restricción de 480 minutos por cada camión.

Tabla 6. Tiempo diario (minutos) por camión (restringiendo 480 minutos por día)

Camión	Días											
	1		2		3		4		5		6	
	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1
1	440	475	425	440	470	460	445	445	475	470	472	472
2	455	455	473	440	450	440	455	440	465	445	477	462
3	470	450	425	480	460	460	460	468	479	478	433	455
4	440	470	423	440	460	480	470	440	443	479	470	455
5	355	470	440	448	455	450	459	430	480	445	470	480
6	390	475	380	435	405	440	470	479	440	455	480	450
7	400	380	380	398	390	380	478	450	470	470	480	438
8	400	380	379	440	390	385	455	470	460	380	405	475
9	380	380	380	420	383	390	480	380	320	410	300	300
10	375	360	370	390	380	380	170	340	0	0	0	0
11	360	380	360	380	350	380	0	0	0	0	0	0
12	355	415	405	405	360	360	420	450	295	295	406	406
13	450	450	360	360	390	390	380	380	465	470	480	480
14	450	390	350	350	450	450	350	350	450	445	472	472
Sin asignar	7(1070)	6(860)	8(1240)	7(969)	5(750)	5(698)	4(540)	3(510)	3(450)	3(450)	0	0
Demanda	2(10000)	2(10000)			3(10000)	3(10000)	4(10000)	3(10000)	3(10000)	3(10000)		
no atendida	5(20000)	4(20000)	8(20000)	7(20000)	2(20000)	2(20000)						

Tabla 7. Tiempo diario (minutos) de camiones (promedio de tiempos optimizados por demandas re-planificadas)

Camiones	Días											
	1		2		3		4		5		6	
	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1	AG_R1	PSO_R1
1	440	475	440	440	470	460	445	445	470	440	470	462
2	455	455	445	440	475	440	465	440	469	445	470	462
3	470	450	475	480	460	460	449	468	450	480	460	450
4	440	470	440	440	460	480	470	440	448	469	473	435
5	480	470	455	448	450	450	410	460	460	440	475	480
6	390	475	440	435	440	440	440	479	475	470	465	430
7	400	380	380	398	465	380	430	450	440	438	430	480
8	400	380	389	440	395	385	460	470	480	470	480	478
9	380	380	370	420	395	390	453	380	340	380	410	460
10	375	360	368	390	380	380	320	480	480	450	470	420
11	360	380	388	380	350	380	480	420	460	50	450	377
12	480	415	405	405	480	480	450	450	445	445	405	406
13	450	450	480	360	390	390	380	480	470	465	480	480
14	450	390	350	350	450	450	350	350	445	450	470	472
Total	5970	5930	5825	5826	6060	5965	6002	6212	6332	5892	6408	6292

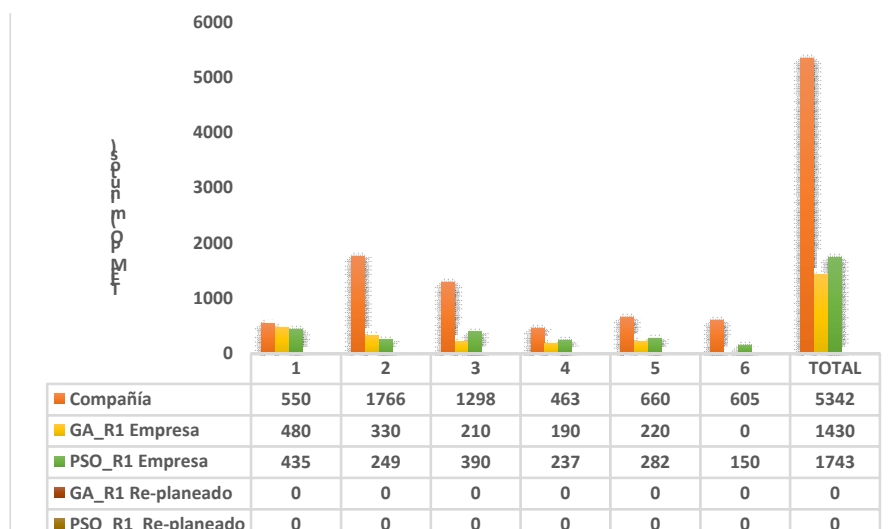


Fig. 4. Análisis de tiempo extra en diferentes escenarios

Discusiones y conclusiones

La planificación adecuada de la demanda impulsa planes de cadena de suministro posteriores más precisos y mejora el servicio al cliente. La cadena de suministro se está volviendo más complejas con más variaciones en productos, canales de distribución y planificación de materiales. Al implementar estos cambios en la empresa (planificación adecuada de la demanda), hay una reducción significativa en los costos de recursos humanos; específicamente en el pago de horas extras a los camioneros, sin embargo, estos cambios implican acuerdos con los clientes para que realicen sus pedidos a tiempo. Este trabajo se desarrolló por la problemática que se presenta en una empresa que distribuye productos derivados del petróleo a diferentes gasolineras. La *Empresa* presenta altos costos en el pago de horas extras a los camioneros.

Tabla 8. Análisis de sensibilidad para diferentes tamaños de población y tiempo de parada

TIEMPO	Función objetivo AG_R1			Función objetivo PSO_R1		
	N=100	N=200	N=300	N=100	N=200	N=300
60	7560	7427	7327	7350	6985	6980
120	7450	7448	7400	7150	6958	6900
180	6850	6700	6700	7100	6700	6520
240	6440	6438	6468	6445	6437	6481
300	6408	6409	6409	6292	6290	6289
360	6408	6408	6409	6292	6290	6290
420	6408	6408	6408	6290	6290	6290
480	6407	6408	6407	6289	6289	6289

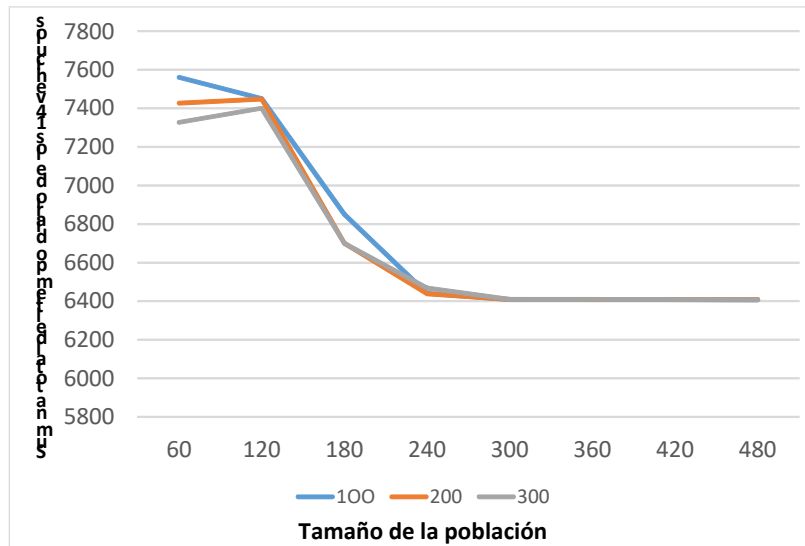


Fig. 5. Análisis de sensibilidad de tamaño de la población y tiempo de parada con el algoritmo AG-R1.

La Tabla 4 muestra que se estudiaron siete casos reportados en la literatura, el AG_R1 demostró un buen desempeño. En comparación con los resultados mejor conocidos, se obtuvo un % *Gap* de 0,55, mostrando una mínima diferencia. Al aplicar PSO_R1 a las instancias del VRP, los resultados mostraron un % *Gap* superior a los conocidos en la literatura, presentando un 6,9 % de *Gap* frente a los mejor conocido. Con el fin de determinar si existía diferencia significativa se realizó la prueba estadística no paramétrica de Wilcoxon (también conocida como Wilcoxon Mann-Whitney). Esta prueba se utilizó un nivel de confianza $\alpha = 0,05$ con respecto a AG_R1 y PSO_R1 utilizando el software estadístico Minitab versión 18.1. Los resultados no mostraron diferencia significativa entre AG_R1 y PSO_R1 con un valor de p de 0.1766, concluyendo que el desempeño de ambos algoritmos es estadísticamente equivalente.

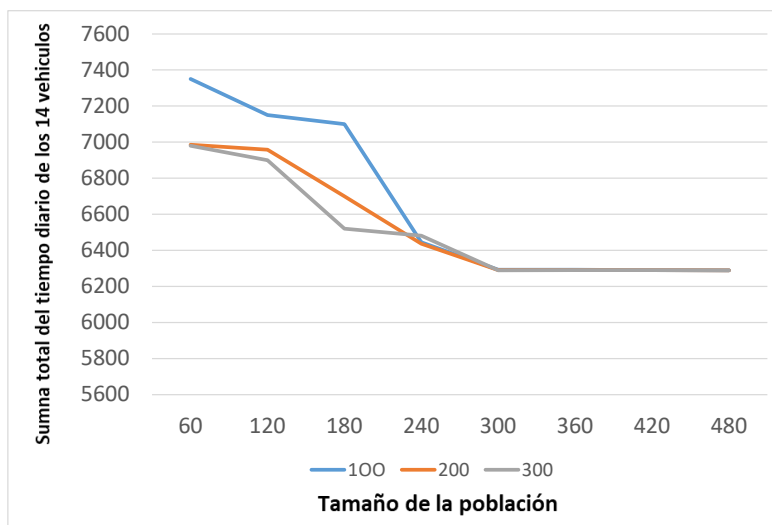


Fig. 6. Análisis de sensibilidad de tamaño de la población y tiempo de parada con el algoritmo PSO-R1

Los resultados obtenidos (Tabla 7) muestran que se puede optimizar el plan de distribución de productos actual de la empresa.

Se presentan dos opciones de solución a la empresa; ambos reducen el monto actual del pago de horas extras. Los resultados indican que los métodos AG_R1 y PSO_R1 disminuyen las horas extras pagadas por la empresa en un 67,37% y 73,23%, respectivamente si se mantiene la demanda planificada tal y como la empresa distribuye actualmente sus productos. Sin embargo, ambos métodos pueden reducir las horas extras a cero con ajustes en la planificación de las demandas diarias. Aun cuando los algoritmos AG_R1 y PSO_R1 brindan resultados de calidad, es imposible concluir que tendrán un comportamiento similar en otras empresas distribuidoras de combustible [11].

Finalmente, se concluye que es importante considerar una óptima planificación de la demanda en problemas de PRSP ya que las restricciones de las capacidades y número de compartimentos de los camiones; las limitaciones del manejo del producto al no poder mezclarse; aunado a las restricciones de tránsito, hacen que este problema sea más difícil de resolver sobre todo cuando se quiere cumplir con un tiempo de trabajo de no más de ocho horas para los choferes. Como trabajo a futuro, consideramos que sería interesante proponer casos de referencia basados en el problema PRSP con los que se comparen las nuevas aportaciones. Resolver el problema con algoritmos aplicados al problema de rutas con ventanas de tiempo (VRPTW). Realizar un análisis de sensibilidad sobre el impacto en el costo de modificar los cronogramas de planificación de la demanda diaria. Sería interesante aplicar esta heurística de construcción de soluciones factibles considerando la planificación de la demanda en otros algoritmos, y con diferentes restric-

ciones más utilizadas hoy en día, como considerar camiones con múltiples compartimentos y visitar varias gasolineras.

Referencias

- [1] Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2007). A flexible adaptive memory-based algorithm for real-life transportation operations: Two case studies from dairy and construction sector. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 806-822.
- [2] Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Society for industrial and applied mathematics..
- [3] Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- [4] Mor, A., & Speranza, M. G. (2022). Vehicle routing problems over time: a survey. *Annals of Operations Research*, 314(1), 255-275.
- [5] Rios, B. H. O., Xavier, E. C., Miyazawa, F. K., Amorim, P., Curcio, E., & Santos, M. J. (2021). Recent dynamic vehicle routing problems: A survey. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107604.
- [6] Boctor, F. F., Renaud, J., & Université du Québec. Direction de la recherche. (1998). *La distribution des produits pétroliers au Québec: État de la situation*. Direction de la recherche, Université du Québec.
- [7] Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics..
- [8] Cornillier, F., Boctor, F. F., Laporte, G., & Renaud, J. (2008). An exact algorithm for the petrol station replenishment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 59, 607-615.
- [9] Brown, G. G., Ellis, C. J., Graves, G. W., & Ronen, D. (1987). Real-time, wide area dispatch of mobil tank trucks. *Interfaces*, 17(1), 107-120.
- [10] Brown, G. G., & Graves, G. W. (1981). Real-time dispatch of petroleum tank trucks. *Management science*, 27(1), 19-32.
- [11] Avella, P., Boccia, M., & Sforza, A. (2004). Solving a fuel delivery problem by heuristic and exact approaches. *European Journal of Operational Research*, 152(1), 170-179.
- [12] Xu, G., Xu, M., Wang, Y., Liu, Y., & Lv, Q. (2020). Collaborative multidepot petrol station replenishment problem with multicompartments and time window assignment. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 1-22.
- [13] Abdelaziz, F. B., Roucairol, C., & Bacha, C. (2002, October). Deliveries of liquid fuels to SNBP gas stations using vehicles with multiple compartments. In *IEEE international conference on systems, man and cybernetics (Vol. 1, pp. 478-483)*. IEEE.
- [14] Malépart, V., Boctor, F., Renaud, J., & Labillois, S. (2003). Nouvelles approches pour l'approvisionnement des stations d'essence. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 22(2), 15-31.
- [15] Rizzoli, A. E., Casagrande, N., Donati, A. V., Gambardella, L. M., Lepori, D., Montemanni, R., ... & Zaffalon, M. (2003, July). Planning and optimisation of vehicle routes

for fuel oil distribution. In MODSIM international congress on modelling and simulation. Townsville, Australia..

- [16] Triki, C. (2013). Solution methods for the periodic petrol station replenishment problem. *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 10(2), 69-77..
- [17] Wang, B., Liang, Y., Yuan, M., Zhang, H., & Liao, Q. (2019). A metaheuristic method for the multireturn-to-depot petrol truck routing problem with time windows. *Petroleum Science*, 16, 701-712.
- [18] Benantar, A., Ouafi, R., & Boukachour, J. (2019). A combined vehicle loading and routing problem: a case study of fuel logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 32(3-4), 346-371.
- [19] Al-Hinai, N., & Triki, C. (2020). A two-level evolutionary algorithm for solving the petrol station replenishment problem with periodicity constraints and service choice. *Annals of Operations Research*, 286(1-2), 325-350.
- [20] Cornillier, F., Laporte, G., Boctor, F. F., & Renaud, J. (2009). The petrol station replenishment problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 36(3), 919-935.
- [21] Wang, L., Kinable, J., & Van Woensel, T. (2020). The fuel replenishment problem: A split-delivery multi-compartment vehicle routing problem with multiple trips. *Computers & Operations Research*, 118, 104904.
- [22] Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1), 66-73.
- [23] Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science* (pp. 39-43). Ieee.
- [24] Bulhoes, T., Ha, M. H., Martinelli, R., & Vidal, T. (2018). The vehicle routing problem with service level constraints. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 544-558.
- [25] Baker, B. M., & Ayeche, M. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 30(5), 787-800.
- [29] Marcos; Rivero Gestal (Daniel; Rabuñal, Juan Ramón; Dorado, Julián; Pazos, Alejandro), & Gestal, M. (2010). *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética* (p. 32). Coruña: Universidade da Coruña..
- [30] Potvin, J. Y., & Thangiah, S. R. (1997). Vehicle routing through simulation of natural processes. *Université de Montréal, Centre de recherche sur les transports*..
- [31] Eberhart, R. C., Shi, Y., & Kennedy, J. (2001). *Swarm intelligence*. Elsevier..
- [32] Engelbrecht, A. *Fundamentals of computational swarm intelligence*, 2006, Hoboken..
- [33] Blum, C., & Merkle, D. (Eds.). (2008). *Swarm intelligence: introduction and applications*. Springer Science & Business Media.
- [34] Mohammadi, N., & Mirabedini, S. J. (2014). Comparison of particle swarm optimization and backpropagation algorithms for training feed forward neural network. *Journal of mathematics and computer science*, 12, 113-123.
- [35] Hadavandi, E., Ghanbari, A., & Abbasian-Naghneh, S. (2010, August). Developing a time series model based on particle swarm optimization for gold price forecasting. In *2010 Third International Conference on Business Intelligence and Financial Engineer-*

ing (pp. 337-340). IEEE..

- [36] Zouari, M., Baklouti, N., Sanchez-Medina, J., Kammoun, H. M., Ayed, M. B., & Alimi, A. M. (2020). PSO-based adaptive hierarchical interval type-2 fuzzy knowledge representation system (PSO-AHIT2FKRS) for travel route guidance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(2), 804-818..
- [37] Sar, K., & Ghadimi, P. (2023). A Systematic Literature Review of the Vehicle Routing Problem in Reverse Logistics Operations. *Computers & Industrial Engineering*, 109011.
- [38] Audy, J. F., Rönqvist, M., D'Amours, S., & Yahiaoui, A. E. (2023). Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. *International Journal of Forest Engineering*, 34(2), 143-167.
- [39] Golden, B., Wang, X., & Wasi, E. (2023). The Evolution of the Vehicle Routing Problem—A Survey of VRP Research and Practice from 2005 to 2022. In *The Evolution of the Vehicle Routing Problem: A Survey of VRP Research and Practice from 2005 to 2022* (pp. 1-64). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [40] Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106242.
- [41] Issabakhsh, M., Hosseini-Motlagh, S. M., Pishvaei, M. S., & Saghaei Nia, M. (2018). A vehicle routing problem for modeling home healthcare: a case study. *International Journal of Transportation Engineering*, 5(3), 211-228.
- [42] Campelo, P., Neves-Moreira, F., Amorim, P., & Almada-Lobo, B. (2019). Consistent vehicle routing problem with service level agreements: A case study in the pharmaceutical distribution sector. *European Journal of Operational Research*, 273(1), 131-145.
- [43] Thongkham, M., & Kaewman, S. (2018). Methodology to solve the combination of the generalized assignment problem and the vehicle routing problem: a case study in drug and medical instrument sales and service. *Administrative Sciences*, 9(1), 3.
- [44] Rabbani, M., Heidari, R., & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 945-961.
- [45] Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., Hussain, A., & Scavino, E. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste management*, 71, 31-41.
- [46] Ai, H. T. T., Thi, N. T., & Can, N. V. (2019). A multiple objective model for vehicle routing problem with time windows: a case study. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 889, pp. 588-596). Trans Tech Publications
- [47] Chokanat, P., Pitakaso, R., & Sethanan, K. (2019). Methodology to solve a special case of the vehicle routing problem: A case study in the raw milk transportation system. *AgriEngineering*, 1(1), 75-93.
- [48] Azad, T., & Hasin, M. A. A. (2019). Capacitated vehicle routing problem using genetic algorithm: a case of cement distribution. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 32(1), 132-146.
- [49] Liao, T. W., Egbelu, P. J., & Chang, P. C. (2013). Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door

cross docking operations. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 212-229.

- [50] Witt, C. E. (1998). Crossdocking: Concepts demand choice. *Material Handling Engineering*, 53(7), 44-49.
- [51] Lin, N., Shi, Y., Zhang, T., & Wang, X. (2019). An effective order-aware hybrid genetic algorithm for capacitated vehicle routing problems in internet of things. *IEEE Access*, 7, 86102-86114.
- [52] Matos, E., Gaxiola, F., González-Gurrola, L. C., & Manzo-Martinez, A. (2019). An Optimization Vehicle Routing Problem Approached by Bio-inspired Algorithms—A Real Case Study. *Applied Decision-Making: Applications in Computer Sciences and Engineering*, 27-44.
- [53] Wang, X., & Wasil, E. (2021). On the road to better routes: Five decades of published research on the vehicle routing problem. *Networks*, 77(1), 66-87.
- [54] Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2016). Vehicle routing problems with multiple trips. *4or*, 14, 223-259.
- [55] Holland, J.H., *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. 1992: MIT press.
- [56] Eiben, A.E. and J.E. Smith, *Introduction to evolutionary computing*. Vol. 53. 2003: Springer.
- [57] Chu, P.C. and J.E. Beasley, *A genetic algorithm for the generalised assignment problem*. *Computers & Operations Research*, 1997. **24**(1): p. 17-23.
- [58] Grefenstette, J.J., *Genetic algorithms and their applications: proceedings of the second international conference on genetic algorithms*. 2013: Psychology Press.
- [59] Whitley, L.D., T. Starkweather, and D.A. Fuquay. *Scheduling problems and traveling salesmen: The genetic edge recombination operator*. in *ICGA*. 1989.
- [60] Kennedy, J. and R. Eberhart. *Particle swarm optimization*. in *Proceedings of IC-NN'95-International Conference on Neural Networks*. 1995. IEEE.
- [61] Gillett, B.E. and L.R. Miller, *A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem*. *Operations research*, 1974. **22**(2): p. 340-349.
- [62] Chowmali, W. and S. Sukto, *A novel two-phase approach for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles: a case study on fuel delivery*. *Decision Science Letters*, 2020. **9**(1): p. 77-90.
- [63] Beasley, J.E., *OR-Library: distributing test problems by electronic mail*. *Journal of the operational research society*, 1990. **41**(11): p. 1069-1072.
- [64] Osman, I.H., *Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem*. *Annals of operations research*, 1993. **41**(4): p. 421-451.
- [65] Rochat, Y. and É.D. Taillard, *Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing*. *Journal of heuristics*, 1995. **1**(1): p. 147-167.
- [66] Yu, B., Z.-Z. Yang, and B. Yao, *An improved ant colony optimization for vehicle routing problem*. *European journal of operational research*, 2009. **196**(1): p. 171-176.
- [67] Szeto, W.Y., Y. Wu, and S.C. Ho, *An artificial bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem*. *European Journal of Operational Research*, 2011. **215**(1): p.

126-135.

- [68] Okulewicz, M. and J. Mańdziuk, *A metaheuristic approach to solve Dynamic Vehicle Routing Problem in continuous search space*. Swarm and Evolutionary Computation, 2019. **48**: p. 44-61.
- [69] Jarmo T Alander. *On optimal population size of genetic algorithms*. In CompEuro 1992 Proceedings computer systems and software engineering, pages 65–70. IEEE, 1992.
- [70] Jaroslaw Arabas, Zbigniew Michalewicz, and Jan Mulawka. *Gavaps-a genetic algorithm with varying population size*. In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence, pages 73–78. IEEE, 1994.
- [71] Kay Chen Tan, Tong Heng Lee, and Eik Fun Khor. *Evolutionary algorithms with dynamic population size and local exploration for multiobjective optimization*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 5(6):565–588, 2001.

Capítulo 5

Algoritmo metaheurístico para resolver un caso del problema de rutas de vehículos: Un caso de estudio en el sistema de distribución de leche

Víctor M. Valenzuela-Alcaraz, A. Danisa Romero-Ocaño, Kevin Alejandro Galaviz Gámez, Miguel Alejandro Siqueiros Parra

Resumen—El desempeño de la cadena de suministro puede verse afectado en gran parte por sus costos de transportación, por lo que es necesario una adecuada selección de sus rutas de distribución. El presente estudio se desarrolla en una empresa real de distribución de leche, en donde las decisiones en cuanto a la selección de las rutas se han basado únicamente en la experiencia del personal dedicados a la distribución de este producto, que en la práctica, pueden ser muy costosos. El problema es modelado como un caso especial del problema de rutas de vehículos y resuelto mediante un algoritmo genético. Los resultados muestran que el algoritmo propone un conjunto de rutas que reduce significativamente los costos totales de distribución que al hacerlo de la forma tradicional, además de brindar una herramienta de toma de decisiones a los empleados de la empresa para un mejor aprovechamiento de la flota de vehículos.

Palabras Clave— Problema de rutas de vehículos; distribución de leche; algoritmo genético.

Introducción

La optimización de las rutas de distribución es un factor clave en la eficiencia y rentabilidad de las empresas distribuidoras de bienes y servicios. Estas empresas enfrentan constantemente el desafío de entregar sus productos a tiempo y de manera rentable a sus clientes, lo que implica la planificación y gestión efectiva de sus rutas de distribución [1].

La optimización de estas rutas puede resultar en una reducción significativa en los cos-

tos de transporte, un aumento en la capacidad de entrega y una mejora en la calidad del servicio al cliente [2]. Además, la optimización de las rutas de distribución también puede ayudar a minimizar la huella de carbono y contribuir a una operación más sostenible [3]. Por lo tanto, la aplicación de técnicas de optimización para resolver el problema de ruteo de vehículos se ha convertido en una necesidad estratégica para las empresas distribuidoras de bienes y servicios en busca de mejorar su competitividad en el mercado.

En el presente trabajo se aborda un problema de la vida real que involucra a una empresa que distribuye leche y busca la manera óptima de distribuir sus productos para disminuir sus costos de transporte. La empresa tiene un centro de distribución y un grupo de clientes a los que debe entregar una cantidad determinada de leche utilizando una flota de vehículos con capacidad limitada. Por lo anterior, este problema se modela como el Problema de Rutas de Vehículos con Capacidades Limitadas (Capacitated Vehicle Routing Problem o CVRP) [4]. Este problema se caracteriza por implicar una flota de vehículos con una capacidad limitada, así como otros aspectos propios de los problemas de rutas de vehículos (Vehicle Routing Problem o VRP, por sus siglas en inglés) [4].

El método utilizado para abordar este problema consiste en la implementación de un algoritmo genético, que recibe este nombre porque se basa en la selección natural y la evolución biológica. Los algoritmos genéticos se aplican para solucionar problemas complejos mediante la creación de una población de posibles soluciones, la evaluación de su calidad o aptitud, y la aplicación de operadores de selección, reproducción y mutación para generar nuevas soluciones a partir de las ya existentes. A medida que estas etapas se repiten, la población evoluciona y mejora su adaptación al problema, con la finalidad de encontrar una solución óptima o cercana a la óptima para el problema.

El presente artículo está estructurado en cinco secciones, siendo la siguiente a esta la sección dos, donde se definirá el problema. En la sección tres se describirá la metodología empleada en el desarrollo del trabajo. En la sección cuatro se presentan los resultados obtenidos y finalmente, en la sección cinco se expondrán las conclusiones obtenidas.

Definición del problema

El problema de Rutas de Vehículos

El VRP es uno de los problemas más importantes en la investigación de operaciones y logística. Se trata de un problema de optimización combinatoria que busca encontrar la ruta más eficiente para una flota de vehículos que deben entregar bienes a un conjunto de clientes, minimizando los costos de transporte y cumpliendo con ciertas restricciones de capacidad y tiempo [4]. Este problema tiene aplicaciones en diversos sectores como la distribución de alimentos, medicinas, paquetes y servicios de transporte, entre otros [5]. Además, el VRP se vuelve más complejo cuando se consideran factores como múltiples

depósitos, múltiples tipos de vehículos, ventanas de tiempo y demandas estocásticas de los clientes [4]. Por esta razón, el VRP ha sido objeto de estudio en la investigación de operaciones, la inteligencia artificial y la optimización metaheurística, entre otros campos, en busca de soluciones eficientes y efectivas para problemas del mundo real [6].

Por lo general, el VRP se utiliza para el transporte de bienes entre distintos clientes y depósitos. Cada vehículo debe iniciar y terminar su recorrido en el depósito, mientras que cada cliente solo puede ser visitado una vez. El objetivo principal del VRP es encontrar la cantidad mínima de rutas que permitan atender la demanda de todos los clientes de manera eficiente [4].

En este caso de estudio, se utilizará la versión básica del VRP, conocida como VRP con capacidad limitada (CVRP) [4], debido a que se ajusta a las características de la empresa.

En el CVRP se considera que cada vehículo tiene una capacidad limitada para transportar los productos. Es decir, cada cliente tiene una demanda de productos y el vehículo que lo atiende solo puede llevar una cierta cantidad de productos limitados por su capacidad. El objetivo del CVRP es encontrar un conjunto de rutas que atiendan a todos los clientes, respetando las limitaciones de capacidad de los vehículos, y minimizando los costos de transporte, como el tiempo de viaje o la distancia recorrida [4]. Este problema se utiliza comúnmente en la planificación de rutas de distribución de bienes y servicios.

Modelo matemático del CVRP

El CVRP se define en un grafo completo no dirigido $G = (V, A)$, donde [4]:

$V = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos que representan la red de distribución. El nodo 0 representa al depósito donde se ubica una flota de k vehículos homogéneos con capacidad Q , el resto de los nodos $1, \dots, n$ representan a los clientes quienes tienen asociada una demanda no negativa d_i previamente establecida.

$A = \{(i, j)\}$ es el conjunto de arcos que conectan los nodos.

Cada arco (i, j) está asociado con un costo de viaje no negativo C_{ij} , que representa el costo de recorrer del nodo i al nodo j .

El CVRP consiste en determinar m rutas de vehículos tales que cada ruta inicia y finaliza en el depósito; cada cliente se visita exactamente una vez; la demanda total de cualquier ruta de vehículos no excede Q ; y el costo total de todas las rutas de vehículos se minimiza [4].

El CVRP puede ser formulado matemáticamente de la siguiente manera [7]:

$$\sum_{r=1}^k \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n C_{ij} x_{rij}, \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{r=1}^k \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{rij} = 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{r0j} = 1, \quad \forall r \in \{1, \dots, k\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{rij} = \sum_{i=0}^n x_{rji}, \quad \forall j \in \{0, \dots, n\}, \quad r \in \{1, \dots, k\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n d_j x_{rij} \leq Q, \quad \forall r \in \{1, \dots, k\} \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^k \sum_{i \in S} \sum_{j \in S, i \neq j} x_{rij} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq \{1, \dots, n\} \quad (6)$$

$$x_{rij} \in \{0,1\}, \quad \forall r \in \{1, \dots, k\}, \quad i, j \in \{0, \dots, n\}, i \neq j \quad (7)$$

La función objetivo (1) es el costo total de la solución. La restricción (2) aseguran que cada cliente sea visitado por un solo vehículo. Las restricciones (3) y (4) aseguran que un vehículo solo puede partir del depósito una vez, y que la cantidad de vehículos que llegan a cada cliente y entran al depósito es igual a la cantidad de vehículos que salen. La restricción (5) garantiza que la suma de las demandas de los clientes visitados en una ruta no exceda la capacidad del vehículo que brinda el servicio. La restricción (6) funciona como una restricción de eliminación de sub-rutas, garantizando que la solución no contenga ciclos desconectados del depósito. Finalmente, la restricción (7) es la variable de decisión que solo pueden tomar valores de 0 o 1.

Algoritmo Genético

En el presente estudio se implementa un AG tradicional [9] para resolver el problema mencionado anteriormente. Los AG son considerados una herramienta eficaz para resolver el VRP debido a que es un problema de optimización combinatoria NP-difícil [8], lo que significa que el tiempo requerido para encontrar la solución óptima aumenta exponencialmente con el tamaño del problema. Los AG son capaces de abordar problemas de esta complejidad y encontrar soluciones subóptimas en tiempos razonables.

La propuesta inicial de los AG fue presentada por John Holland [9] en los años 60. El AG es una técnica de optimización inspirada en la evolución biológica que busca la mejor solución a un problema dado mediante una población de posibles soluciones representadas por cromosomas [10]. Este algoritmo sigue un proceso iterativo que involucra la selección, reproducción, evaluación y reemplazo de individuos en la población, con el objetivo de mejorar la calidad de las soluciones [9]. El AG es capaz de realizar una búsqueda local óptima y consta de algunos pasos básicos que se muestran en la Figura 1, comenzando con la generación aleatoria de una población inicial de soluciones factibles, seguida de la evaluación de la aptitud para cada individuo. Posteriormente inicia el proceso evolutivo, donde se seleccionan los individuos con mejores resultados, que actúan como padres y son sometidos a un proceso de cruce genético para generar nuevos individuos (hijos) con características similares a las de sus progenitores. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de mutación en algunos individuos para mantener la variabilidad en la población. La combinación de estos procesos genera una nueva población, que se somete al mismo ciclo iterativo de selección, cruce y mutación. La ejecución del algoritmo finaliza después de un número predeterminado de generaciones o iteraciones.

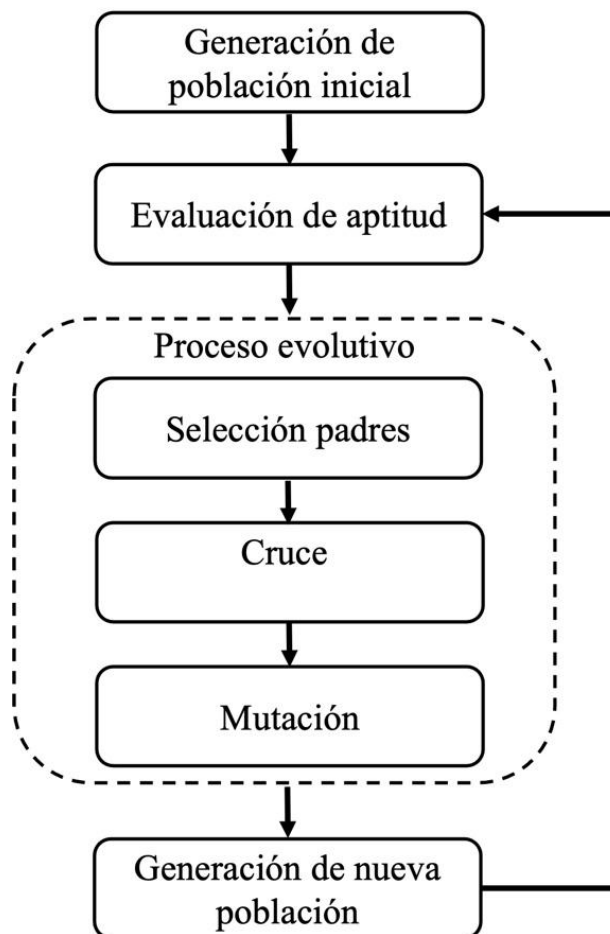


Figura 1. Esquema general del AG.

Caso de estudio: Empresa distribuidora de Leche

En esta investigación se enfoca en una empresa distribuidora de Leche que opera con un centro de distribución desde el cual enviar el producto a sus puntos de venta. Actualmente, la asignación de rutas para la entrega de productos se basa en la experiencia del personal encargado de dicha actividad y no se utiliza un método cuantitativo que permita una asignación adecuada de los recursos, considerando factores como la capacidad de los vehículos, los tiempos de traslado y las distancias a recorrer.

La planificación de rutas para la entrega de Leche no cuenta con una herramienta de toma de decisiones, lo que hace que el personal encargado de esta tarea no tenga un método para visualizar el inicio y fin de la ruta. En lugar de esto, la planificación se realiza de manera empírica, lo que puede resultar en descuidar los puntos de venta con mayor demanda y en entregas incompletas, lo que a su vez provoca un nivel de servicio irregular y aumenta los costos de combustible.

En este contexto, la compañía necesita examinar el problema de enrutamiento de vehículos para reestructurar su red de distribución y lograr una planificación efectiva de sus recursos, lo que resultaría en una disminución de los costos de transporte tomando en cuenta la demanda de los puntos de venta y asegurarse de que se respete la capacidad de los vehículos.

Actualmente la empresa cuenta con un depósito (centro de distribución), 55 puntos de entrega (clientes), una flota de 5 vehículos, cada vehículo puede transportar en promedio 70 litros de leche. La demanda de Leche se satisface mediante el envío de recipientes de un litro. Se dispone de una estimación promedio de la demanda diaria para cada punto de venta, y se conoce un día antes de realizar la entrega de la mercancía en dichos puntos.

La Tabla 1 muestra la demanda diaria en litros de los 55 puntos de venta (clientes), los cuales son identificados mediante los números del 1 al 55.

Tabla 1. Demanda Diaria de los Clientes

Cliente	Demanda	Cliente	Demanda	Cliente	Demanda
1	4	21	7	41	4
2	5	22	4	42	5
3	6	23	8	43	4
4	8	24	6	44	5
5	4	25	6	45	5
6	8	26	10	46	6
7	6	27	9	47	5
8	5	28	5	48	6

9	5	29	6	49	6
10	6	30	5	50	4
11	6	31	6	51	5
12	5	32	5	52	4
13	6	33	6	53	7
14	7	34	4	54	6
15	4	35	4	55	5
16	6	36	5		
17	6	37	2		
18	7	38	5		
19	8	39	6		
20	8	40	3		

Se utilizó el *Google Maps* para calcular la distancia entre todos los puntos de venta incluyendo el depósito. La Tabla II muestra la matriz de distancias de los primeros y los últimos 4 clientes, donde el cero representa el depósito. Nótese que las distancias se consideran simétricas, es decir, la distancia desde el punto A hacia el punto B es la misma que la distancia desde el punto B hacia el punto A.

Tabla 2. Matriz de Distancias (KM)

	0	1	2	3	4	...	52	53	54	55
0	0.0	3.0	3.1	3.2	3.6	...	0.5	0.6	3.3	1.4
1	3.0	0.0	0.2	0.5	0.7	...	2.5	3.4	0.9	1.6
2	3.1	0.2	0.0	0.2	0.5	...	2.6	3.5	1.1	1.8
3	3.2	0.5	0.2	0.0	0.4	...	2.7	3.6	1.3	1.9
4	3.6	0.7	0.5	0.4	0.0	...	3.1	4.0	1.4	2.3
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
52	0.5	2.5	2.6	2.7	3.1	...	0.0	2.7	2.1	1.4
53	0.6	3.4	3.5	3.6	4.0	...	2.7	0.0	1.6	1.3
54	3.3	0.9	1.1	1.3	1.4	...	2.1	1.6	0.0	1.4
55	1.4	1.6	1.8	1.9	2.3	...	1.4	1.3	1.4	0.0

Metodología

En esta sección se explica el enfoque metodológico empleado para aplicar un algoritmo genético (AG) en la solución del Problema de Rutas de Vehículos (VRP). La metodología consta de dos etapas: En primer lugar, se describe el diseño del AG que se propone para abordar el VRP, y en segundo lugar, se detalla el caso de estudio de la empresa distribuidora de Leche.

AG para CVRP

a) Representación de soluciones

En este trabajo, se emplea una cadena de números enteros de longitud n para representar la solución del CVRP [11], donde cada gen de la cadena corresponde al número de nodo asignado a un cliente. La secuencia de los genes en la cadena indica el orden en que se visitan los clientes. Por ejemplo, se puede observar en la Figura 2 un cromosoma que decodifica una solución para el CVRP con 6 clientes. En dicho cromosoma, se especifica que primero debe visitarse el cliente 3, posteriormente el cliente 5, después el cliente 1 y así sucesivamente.

3	5	1	6	4	2
---	---	---	---	---	---

Figura 2. Representación de una solución de 6 clientes.

2. Función Objetivo

En este problema, el costo mínimo de cada ruta depende únicamente de la distancia. Para maximizar la eficacia del cromosoma, se busca disminuir la distancia recorrida en cada ruta. Para lograr esto, se calcula la aptitud del cromosoma como la suma de las distancias recorridas en cada ruta de acuerdo con la ecuación (1). El objetivo es minimizar la distancia recorrida para aumentar la aptitud del cromosoma.

3. Generación de la Población

En el presente estudio, la población inicial se genera de manera aleatoria [12] y se asignan números a cada cliente. Una cadena de números aleatorios que representa el cromosoma define la secuencia de ruta. Después de generar cada población, se realiza una evaluación de los individuos utilizando la función objetivo (ecuación (1)), con el fin de determinar la calidad de la solución que está siendo codificada.

4. Operador de Selección

En esta investigación, se aplica el método de selección por ruleta [13] (ver Figura 3) para la elección de padres que serán cruzador y para formar nuevos cromosomas que contribuyen en la reproducción y formación de las siguientes generaciones [14]. Este procedimiento implica asignar a cada individuo de la población un segmento en la rueda de la ruleta en función de su aptitud y la aptitud total de la población. Los individuos más aptos tendrán una porción mayor de la ruleta en comparación con los menos aptos. Para seleccionar un individuo, se genera un número aleatorio en el intervalo $[0,1]$ y se selecciona el individuo ubicado en esa posición de la rueda en la ruleta. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario para completar las selecciones requeridas.

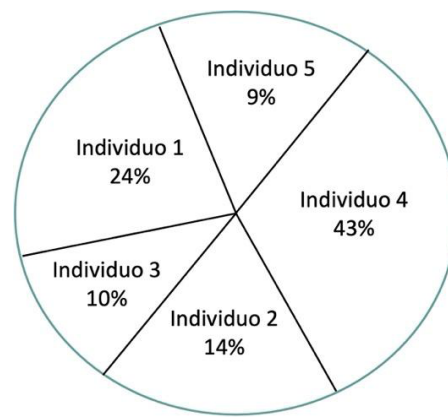


Figura 3. Proporción de la ruleta para 5 individuos de un título de imagen.

5. Operador de Cruce

En este estudio se utilizó el operador de cruce de un punto [15], en el cual se selecciona un punto de cruce al azar dentro del rango $[1, l-1]$, donde l es la longitud del individuo. Después de dividir cada padre en este punto, cada hijo tiene la primera parte del primer padre y la segunda parte del segundo padre, eliminando los números duplicados para asegurar soluciones factibles. Se generan dos hijos combinando los padres en el punto de cruce. Un ejemplo de este tipo de cruce se muestra en la Figura 4.

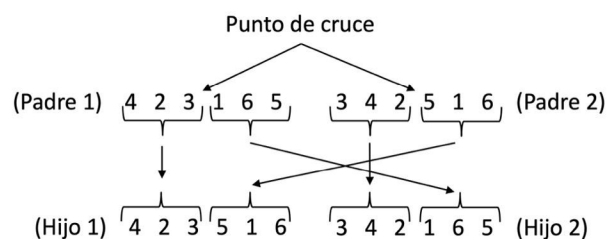


Figura 4. Cruce de un punto.

6. Operador de Mutación

Se puede observar en la Figura 5 el operador de mutación utilizado en el AG presentado, que es conocido como “Intercambio de 2-posiciones” [16]. Este operador se basa en elegir dos posiciones aleatorias en un cromosoma y cambiar los valores de dichas posiciones entre sí.

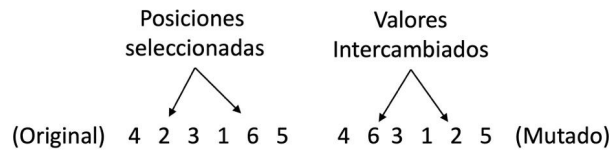


Figura 5. Mutación de intercambio de 2-posiciones

7. Criterio de Terminación

Cuando se llega a un número específico de generaciones, el AG se detiene y produce como resultado la mejor solución encontrada junto con su costo correspondiente.

Pruebas y Resultados

El AG fue programado en C++, compilado con la versión 7.3.0 de gcc y ejecutado en un sistema operativo basado en Ubuntu 18.10 con un procesador Intel® Core™ i7-4900MQ @ 2.80GHz con 16 GB de RAM.

Esta sección se compone de dos partes. En la primera parte se presenta el análisis del ajuste de parámetros del AG propuesto, en la segunda parte se comparan los resultados obtenidos por el AG con la actual forma de distribución de productos empleado por la empresa.

a. Ajuste de parámetros del AG

El ajuste de parámetros del AG se realizó mediante un DOE utilizando la metodología Taguchi [17].

Se determinaron los factores que impactan en el desempeño del AG, entre los cuales se incluyen la probabilidad de cruce (P_c), la probabilidad de mutación (P_m), el tamaño de la población (T_p) y el número de generaciones (N_g). Cada factor tiene cuatro niveles diferentes, como se indica en la Tabla III. Siguiendo la matriz ortogonal de Taguchi, se realizaron un total de 16 corridas, como se detalla en la Tabla IV.

Tabla 3. Factores y Niveles Establecidos

	Factores			
Nivel				
1	0.7	0.1	100	500
2	0.8	0.2	200	600
3	0.9	0.3	300	800
4	1.0	0.4	400	1000

Tabla 4. Valores Asignados a los Parámetros en cada Ejecución del Experimento

Corrida				
1	0.7	0.1	100	500
2	0.7	0.2	200	600
3	0.7	0.3	300	800
4	0.7	0.4	400	1000
5	0.8	0.1	200	800
6	0.8	0.2	100	1000
7	0.8	0.3	400	500
8	0.8	0.4	300	600
9	0.9	0.1	300	1000
10	0.9	0.2	400	800
11	0.9	0.3	100	600
12	0.9	0.4	200	500
13	1.0	0.1	400	600
14	1.0	0.2	300	500
15	1.0	0.3	200	1000
16	1.0	0.4	100	800

Para investigar el efecto que tienen estos parámetros en el desempeño del AG, el algoritmo fue evaluado en 3 casos de prueba, A-n32-k5, A-n33-k5, y A-n45-k7 del VRP, disponibles en la biblioteca CVRP (<http://vrp.galgos.inf.puc-rio.br/index.php/en/>).

En cada caso de prueba, el AG fue ejecutado 10 veces con semillas aleatorias separadas para cada combinación de la Tabla IV. La evaluación del desempeño del algoritmo se basó en las siguientes dos métricas [18]:

1.- Porcentaje de Desviación Relativa (PRD, por sus siglas en inglés)

$$PRD = \frac{MV - VMC}{VMC} 100$$

Donde MV es el mejor valor obtenido por el AG en 10 ejecuciones y VMC es el valor de la solución mejor conocida para el caso de prueba.

2.- Porcentaje de Desviación Relativa Promedio (APRD, por sus siglas en inglés)

$$APRD = \frac{VP - VMC}{VMC} 100$$

Donde VP es el valor promedio obtenido por el AG en las 10 ejecuciones y VMC es el valor de la solución mejor conocida para el caso de prueba.

La Tabla 5 muestra los resultados de las 16 corridas, para cada caso de prueba se reporta el PRD y el APRD en cada una de las configuraciones.

Tabla 5. Resultados Obtenidos al ejecutar el AG en cada una de las configuraciones del DoE Taguchi

	A-n32-k5 VMC=784		A-n33-k5 VMC=661		A-n45-k7 VMC=1146	
Corrida	PRD	APDR	PRD	APDR	PRD	APDR
1	2.68	6.66	0.15	6.26	2.88	5.90
2	0.77	4.04	2.42	4.58	4.01	5.68
3	1.15	4.48	0.91	4.04	1.93	3.84
4	0.89	3.04	0.30	2.86	1.22	3.25
5	1.66	4.82	2.42	5.30	2.58	5.54
6	0.38	5.00	1.82	3.60	1.22	5.73
7	0.38	2.32	2.72	4.05	2.62	4.62

8	0.38	3.65	1.21	3.43	1.36	4.13
9	1.15	3.28	1.82	4.75	3.40	5.51
10	0.38	5.84	1.21	4.13	2.18	4.80
11	1.02	5.22	1.36	5.85	3.32	5.72
12	0.38	4.94	3.18	5.55	3.32	4.97
13	0.38	4.86	1.51	4.18	4.01	5.49
14	0.38	2.92	2.87	5.37	1.40	4.16
15	1.15	4.69	2.72	5.19	3.05	4.86
16	1.15	4.03	2.12	4.60	1.75	4.55

Las Figs. 6 y 7 muestran la tendencia de cada nivel por factor respecto al PRD y APRD, respectivamente. Se puede observar en ambas figuras que el valor mínimo de la variable de respuesta para el parámetro P_c se encuentra en el segundo nivel, mientras que para el parámetro P_m , el valor mínimo de la variable de respuesta se encuentra en el cuarto nivel. De manera similar, los parámetros T_p y N_g presentan el valor mínimo de la variable de respuesta en el cuarto nivel para ambos parámetros.

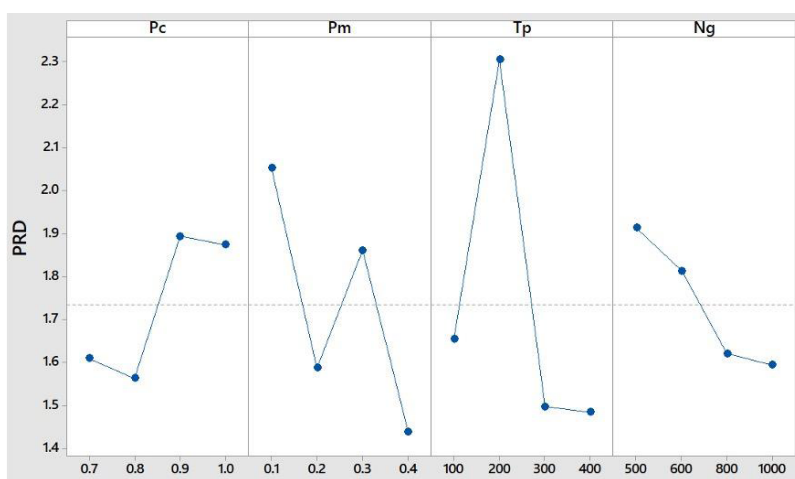


Figura. Tendencia de cada factor respecto a PRD.

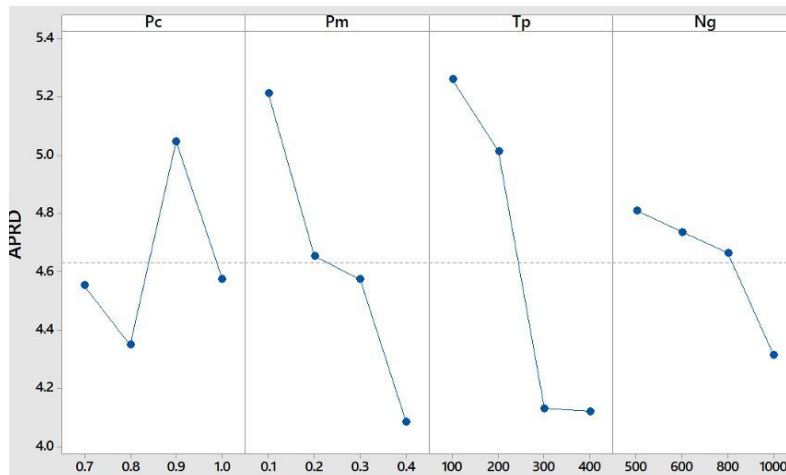


Figura Tendencia de cada factor respecto a APRD.

Basándose en el análisis previo, se sugiere que los parámetros del AG para resolver el CVRP sean configurados de acuerdo con lo indicado en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros Seleccionados para el AG

No.	Parámetro	Valores
1	Probabilidad de cruce ()	0.80
2	Probabilidad de mutación ()	0.40
3	Tamaño de población ()	400
4	Número de generaciones ()	1000

b. Pruebas estadísticas no paramétricas de Mann-Whitney-Wilcoxon

Una vez que se han establecido los valores en los parámetros del AG en la sección anterior, se realizó un estudio estadístico con el objetivo de explorar si se observan mejoras significativas en los resultados generados por el AG implementado en comparación con su aplicación junto a otras variantes de operadores genéticos. Con este fin, se llevó a cabo una comparación que implica la evaluación de un método de cruzamiento y tres distintos métodos de mutación. Estos métodos son contrastados con los operadores genéticos previamente empleados. Los métodos en cuestión son los siguientes:

Cruzamiento de Mapeado Parcial [19]: Este operador trasmite tanto los valores de los genes como el orden en que aparecen en el cromosoma de los padres hacia los hijos. Con el propósito de generar cromosomas nuevos para la siguiente generación, se eligen

de manera aleatoria dos puntos de cruce. La secuencia de genes situada entre estos puntos es intercambiada, generando así una nueva descendencia. Posteriormente, se forman los extremos de los puntos de cruce en cada hijo mediante la incorporación de los cromosomas provenientes del otro padre, evitando la duplicación de valores. La Figura 8 muestra un ejemplo de este operador.

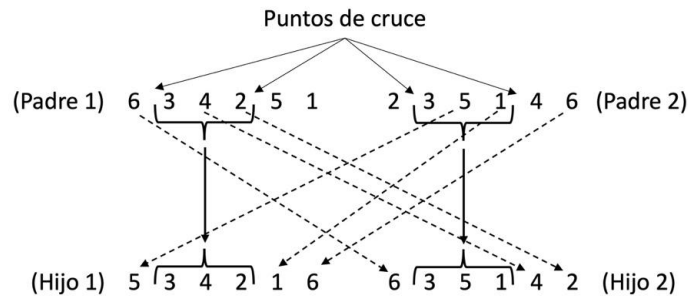


Figura 8. Operador de cruce de mapeo parcial.

Mutación con intercambio de 3 posiciones [20]: Se procede a seleccionar de manera aleatoria tres posiciones en el cromosoma, donde se intercambian los valores asociados a dichas ubicaciones. El elemento ubicado en la primera posición elegida es desplazado a la segunda posición, el elemento que ocupaba la segunda posición se traslada a la tercera, y, por último, el elemento previamente en la tercera posición se reubica en la primera posición (Figura 9 a).

Mutación con inserción [20]: De manera aleatoria, se eligen dos posiciones dentro de un cromosoma. Luego, se toma el elemento de la primera posición y se inserta en la segunda posición. El elemento de la segunda posición se mueve a la siguiente posición con respecto al primer elemento, los elementos anteriores se desplazan (Figura 9 b).

Mutación con inversión [20]: Dos posiciones en un cromosoma son escogidas de manera completamente aleatoria, estableciendo así un intervalo. Los elementos situados dentro de dicho intervalo re-ordenan en sentido opuesto (Figura 9 c).

Para evaluar los cuatro operadores genéticos descritos anteriormente, el AG fue ejecutado 10 veces en cada uno de ellos para cada caso de prueba. Los resultados están presentados en las Tablas VII y VIII. Además, se realizan pruebas estadísticas no paramétricas (pruebas de Wilcoxon), con un intervalo de confianza del 95% (o un nivel de significancia del 5%), para cada par de operadores genéticos. Si el *valor-p* resulta menor a 0.05, indica que existe una diferencia significativa entre los operadores genéticos sujetos a comparación.

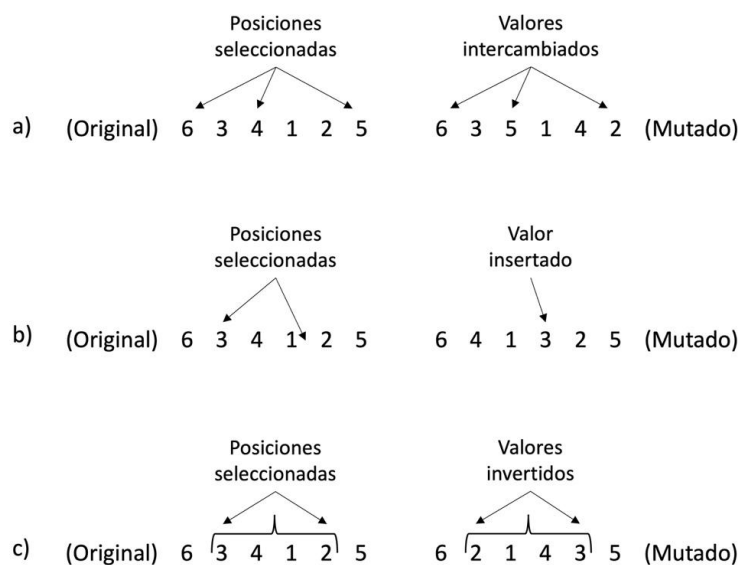


Figura 9. Operador de mutación: a) intercambio de 3 posiciones, b) inserción e c) inversión.

La Tabla VII presenta una comparación de los resultados obtenidos al llevar a cabo la ejecución del AG utilizando el operador de cruce de un punto (Figura 4) en contraste con el operador de cruce de mapeado parcial (Figura 8). Además, proporciona el registro de las pruebas estadísticas correspondientes. En esta Tabla, se presenta la información de que, a pesar de que los valores de significancia (*valores-p*) señalan que, con un nivel de confianza del 95%, no existen diferencias de importancia entre el AG con cruce de un punto y el AG con mapeado parcial, en los tres escenarios de prueba. No obstante, el AG con cruce de un punto logró los resultados más favorables tanto en el PRD como en APRD en comparación con el AG con cruce de mapeado parcial.

Tabla 7. Comparación de Operadores de Cruce.

Caso de prueba	Cruce de un punto		Cruce de mapeado parcial		vs Cruce de mapeado parcial <i>valor-p</i>
	PRD	APRD	PRD	APRD	
A-n32-k5	0.38	2.25	0.41	2.36	1.0000
A-n33-k5	0.25	3.13	0.25	3.32	0.8505
A-n45-k7	1.22	3.45	1.35	3.62	0.7774

La Tabla 8 presenta una comparación con relación a los resultados obtenidos al llevar a cabo la ejecución del AG utilizando el operador de mutación de intercambio de 2 posiciones (Figura 5) en contraste con los operadores de mutación de intercambio de 3 posiciones, mutación de inserción y mutación de inversión (Figura 9).

En cuanto a la prueba estadística, la Tabla 8 se muestra que, pese a que los *valores-p* señalan que, con un nivel de confianza del 95%, no existen discrepancias significativas entre los operadores de mutación como el intercambio de 2 puntos, intercambio de 3 puntos, inserción e inversión, el AG con la mutación de intercambio de 2 puntos logró los resultados más favorables tanto en el PRD como en APRD en los tres casos de prueba en comparación con sus distintas variantes.

En resumen, los resultados indican que no existe diferencias significativas entre los diferentes operadores genéticos analizados. Sin embargo, es recomendable optar por la configuración del AG con cruce de un punto y mutación de intercambio de 2 puntos, ya que, en comparación con otras variantes de operadores, esta configuración logró valores más bajos tanto en términos del PRD como de APRD.

Tabla 8. Comparación de Operadores de Mutación.

Caso de prueba	Intercambio de 2 posiciones		Intercambio de 3 posiciones		Intercambio de 2 posiciones vs Intercambio de 3 posiciones	Intercambio de 2 posiciones vs Inserción			Inversión vs Intercambio de 2 posiciones vs Inversión		
	PRD	APRD	PRD	APRD	valor-p	PRD	APRD	valor-p	PRD	APRD	valor-p
A-n32-k5	0.38	2.25	0.45	2.39	0.8354	0.45	2.32	0.8802	0.38	2.48	0.9580
A-n33-k5	0.25	3.13	0.28	3.10	0.7774	0.25	3.38	0.8950	0.28	3.44	0.4856
A-n45-k7	1.22	3.45	1.22	3.70	0.5340	1.35	3.50	0.7487	1.33	3.80	0.4285

Comparación de rutas generadas por AG vs Empresa

En esta sección se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por el AG y aquellos generados por la empresa distribuidora de leche.

La Tabla 9 presenta las rutas que están siendo utilizadas por la empresa para distribuir el producto en la actualidad, estas rutas fueron diseñadas por el personal que se dedica a esta actividad, considerando su experiencia en el campo. Se puede observar que el diseño consta de un total de 5 rutas, que acumulan un costo total de recorrido de 68.7 Km.

Es importante mencionar que las rutas actuales que utiliza la empresa han cumplido con las expectativas de la organización en cuanto a costos y la asignación adecuada de vehículos para cada ruta. Esta opinión se basa, por un lado, a que la empresa no tiene un punto de comparación para saber que tal bien o mal están diseñadas sus rutas y por otro lado la falta de conocimiento sobre las técnicas de optimización de rutas que existen en la actualidad.

Aunque las rutas actuales parecen ser efectivas, siempre hay espacio para la mejora y la exploración de nuevas estrategias para reducir aún más los costos y mejorar la eficiencia en la entrega del producto.

Tabla 9. Rutas Diseñadas por la empresa

Ruta	Secuencia	% Capacidad utilizada	Distancia (KM)
1	0-38-32-33-50-30-46-51-11-25-26-53-36-0	98.6	11.3
2	0-4-12-16-49-14-6-9-13-3-31-47-0	100.0	12.1
3	0-2-8-55-29-22-24-7-5-18-15-17-1-54-0	97.1	17.1
4	0-27-35-43-20-42-48-45-44-41-34-40-37-52-39-0	97.1	19.9
5	0-23-28-21-19-10-0	48.6	8.4
Distancia Total			68.7

En contraste, la Tabla X muestra los resultados obtenidos por el AG implementado en este artículo. Donde se observa que la solución obtenida por el AG incluye 5 rutas que suman un total de 37.6 Km de recorrido. Aunque ambas soluciones ofrecen 5 rutas, la propuesta presentada por el AG ofrece una mejora considerable en comparación con la solución previa de la empresa, que tenía una distancia total de recorrido de 68.7 Km.

Tabla 9. Rutas Diseñadas por el AG

Ruta	Secuencia	% Capacidad utilizada	Distancia (KM)
1	0-36-53-45 - 4 4 - 20-43-48-35-27-26-28-0	97.1%	5.5
2	0-42-41-31 - 5 0 - 32-33-47-30-40-34-37-0	70.0%	7.7
3	0-38-39-46 - 2 2 - 23-6-13-7-8-5-9-21-0	100.0%	6.1
4	0-52-19-18 - 2 4 - 10-11-25-51-29-0	77.1%	6.5
5	0-55-54-12 -1-49- 2-14-3-4-16-15-17-0	97.1%	11.8
Distancia Total			37.6

A partir de los resultados favorables obtenidos, se sugiere que la empresa adopte el uso del AG en su proceso de distribución de productos, ya que se ha demostrado que puede generar ahorros significativos en la asignación de rutas. Además, el AG propuesto puede ser aplicado a la distribución de otros productos ofrecidos por la empresa. Los resultados obtenidos sugieren que el uso del AG es una opción rentable para la empresa.

Conclusiones

La introducción de herramientas de optimización en el diseño de rutas para la distribución de productos se ha demostrado que puede proporcionar un importante ahorro en los costos de transporte y mejorar los tiempos de entrega. En este artículo, se examinó el problema de rutas de vehículos con capacidad limitada (CVRP), el cual consiste en asignar rutas a un conjunto de vehículos con capacidad limitada para entregar un conjunto de clientes, minimizando la distancia total recorrida o el costo asociado.

Se presentó una solución basada en un algoritmo genético para el CVRP, el cual fue evaluado a través de experimentos computacionales. Los resultados indicaron que la propuesta del AG representa una mejora significativa en comparación con la solución previamente empleada por la empresa.

En conclusión, se ha demostrado que el AG es eficiente en la resolución del CVRP, ya que es capaz de resolver problemas de la vida real, como se ha hecho en este documento.

Para futuros trabajos, se recomienda probar el algoritmo genético en la distribución de otros productos manejados por la empresa, tomando en cuenta la restricción de ventanas de tiempo.

Referencias

- [1] Carro, R., & González Gómez, D. A. (2013). Logística empresarial.
- [2] Muñoz, E. A. B., & Sotero, J. H. C. (2009). Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte. *El hombre y la máquina*, (32), 52-67.
- [3] Schneider, H., & Samaniego, J. (2009). La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 29-34.
- [4] Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Society for industrial and applied mathematics.
- [5] Baldacci, R., Bartolini, E., & Laporte, G. (2010). Some applications of the generalized vehicle routing problem. *Journal of the operational research society*, 61(7), 1072-1077.
- [6] Simeonova, L., Wassan, N., Wassan, N., & Salhi, S. (2020). Recent developments in real life vehicle routing problem applications. *Green Transportation and New Advances in Vehicle Routing Problems*, 213-228.
- [7] Borcinova, Z. (2017). Two models of the capacitated vehicle routing problem. *Croatian Operational Research Review*, 463-469.
- [8] Lenstra, J. K., & Kan, A. R. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 221-227.
- [9] Jh, H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor.
- [10] Mirjalili, S., & Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications*, 43-55.
- [11] Tan, K. C., Lee, L. H., Zhu, Q. L., & Ou, K. (2001). Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. *Artificial intelligence in Engineering*, 15(3), 281-295.
- [12] Marcos; Rivero Gestal (Daniel; Rabuñal, Juan Ramón; Dorado, Julián; Pazos, Alejandro), & Gestal, M. (2010). *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética* (p. 32). Coruña: Universidade da Coruña.
- [13] De Jong, K. A. (1975). *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. University of Michigan.
- [14] Michalewicz, Z. (1999). *Genetic Algorithms+ Data Structures= Evolution Programs*. Springer-Verlag, 1999. Google Scholar Google Scholar Digital Library Digital Library.
- [15] Poli, R., & Langdon, W. B. (1997). Genetic programming with one-point crossover. *Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing*, 180-189.
- [16] Bäck, T., Fogel, D. B., & Michalewicz, Z. (Eds.). (2018). *Evolutionary computation 1: Basic algorithms and operators*. CRC press.
- [17] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.
- [18] Valenzuela-Alcaraz, V. M., Cosío-Leon, M. A., Romero-Ocaño, A. D., & Brizuela, C. A. (2022). A cooperative coevolutionary algorithm approach to the no-wait job shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 194, 1164.
- [19] Goldberg, D. E., & Lingle, R. (2014, January). Alleles, loci, and the traveling salesman problem. In *Proceedings of the first international conference on genetic algorithms and their applications* (pp. 154-159). Psychology Press.
- [20] Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to evolutionary computing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Sección 2:

Diseño de la eficiencia

Capítulo 6

Diseño y evaluación de layout de una empresa dedicada a la fabricación de cerámica con simulación y SLP

Marlenne Cruz Romero, Carlos Alonso López Marcelo, José Luis López Cervantes, Javier García Gutiérrez

Resumen—El objetivo de este documento es presentar la correcta distribución de los departamentos que conforman una empresa dedicada a la manufactura de productos de cerámica. Para la redistribución de planta se hace uso de diferentes diagramas como el diagrama de flujo de proceso, el diagrama de flujo de materiales y el diagrama de relación de actividades y espacio, dichos diagramas sirvieron como datos de entrada para el software CORELAP el cual generó diferentes escenarios de distribución de las áreas de trabajo de esta empresa. Con el software ARENA se representó el sistema de producción actual y se generaron diferentes escenarios de mejora que permitieron el cálculo de los recursos necesarios para satisfacer la demanda pronosticada.

Palabras Clave—Simulación, Distribución de planta, Toma de decisiones.

Introducción

La empresa bajo estudio, fundada en octubre del 2012, es una empresa dedicada al diseño y producción artesanal de vajillas de cerámica de alta temperatura. Su amplio catálogo lo conforman diversas creaciones de alta calidad y colores únicos.

Además de las colecciones de piezas únicas que se generan a través de la vinculación con diseñadores y artistas. En su tienda se pueden encontrar productos como tazas, tazones, platos, saleros, teteras, mezcaleros, etcétera. El taller de manufactura se ubica en San Jacinto Amilpas, Oaxaca mientras que la tienda y oficinas se encuentran en el centro de esta ciudad.

En el año 2022 reportaron un total de 28,858 piezas vendidas lo que representa un total de \$6,922,771.00 pesos, lo anterior indiscutiblemente gracias a su ventaja competitiva, la cual se centra en fusionar las técnicas artesanales y los avances tecnológicos para cerámica.

Debido a la gran demanda de productos y a la limitación del espacio en el actual taller, se ve la necesidad de construir una planta de producción en el Parque Industrial y maquilador Oaxaca 2000 de esta forma el objetivo del presente trabajo es proponer la distribución idónea de los departamentos que conforman esta empresa de manera que diferentes factores como la maquinaria, los recursos humanos, materiales y servicios ofrezcan un valor agregado al sistema de producción.

El tiempo y los costos son los factores más importantes en la planeación de las actividades operativas de una compañía, en general, una organización busca desarrollar procesos donde se emplee el menor tiempo posible para garantizar la calidad de sus productos, cumplir el tiempo pactado con el cliente y que los costos sean mínimos [1].

En ciertos casos, parece muy sencillo disponer los equipos industriales sobre una superficie, después de haber realizado varias distribuciones sin realizar un estudio riguroso de la situación hasta conseguir un resultado satisfactorio. No obstante, esta solución llevará a una pérdida de tiempo, molestias al personal o incluso la inutilización de las instalaciones [2].

El *Systematic Layout Planning* (SLP) es una metodología que permite organizar el lugar de trabajo en una distribución de planta mediante la ubicación de las áreas tomando en consideración su relación y cercanía. Esta metodología también se usa para un rápido flujo de materiales donde es imprescindible la menor manipulación de estos, fue desarrollada por Richard Muther y dado su sencillo enfoque para el diseño de instalaciones hoy en día es de las más usadas [3].

La metodología consiste en cuatro fases de desarrollo que se ilustran en la Figura 1.



Figura 1 Metodología SLP

La localización consiste definir la ubicación de la planta, la segunda fase es el plan de distribución general donde se establece el total de áreas que estarán en la planta y asimismo la forma, la ubicación y las dimensiones que cada área tendrá. La tercera fase es el plan de distribución detallada, la cual se realiza una vez que se logre la distribución general ya que se procede a instalar y distribuir la maquinaria y puestos de trabajo. Por

último, en la fase de instalación se visualizan los últimos detalles y ajustes como la instalación de equipos de trabajo, la instalación de máquinas e instalaciones específicas que sean necesarias de realizar para lograr que la distribución de planta sea la correcta para la empresa [3].

De acuerdo con Muther [3] los aspectos para una distribución de planta exitosa deberán contemplar la planificación de diversos factores como los requisitos generales para el diseño de layout, la necesidad de los recursos en relación con los materiales, la distribución ideal, el seguimiento a las fases mostradas en la Figura 1. Y finalmente la instalación de la nueva distribución de planta.

El SLP se complementa del desarrollo de un diagrama de flujo de materiales, la Tabla y diagrama de relaciones, el cálculo de los requerimientos de espacio comparados con el espacio disponible

Las herramientas anteriores ayudan a representar cómo está conformada la operación y sus actividades también sirven para visualizar actividades repetitivas o cortas. La ventaja de estas herramientas es que se puede tener un grado de detalle de la operación que lleva a poder optimizar o realizar mejoras en alguna tarea o dentro del proceso. Cada actividad, debe ser medible en cuanto a recorridos y tiempos [4].

En [5] se menciona que el resultado de un diseño óptimo de instalaciones es la reducción de costos y el aumento en productividad ya que implica la ubicación sistemática de los departamentos, estaciones de trabajo, máquinas, áreas de almacenamiento y áreas comunes en una empresa.

En [6] se menciona que un diseño de instalaciones es un edificio en donde las personas utilizan materiales, máquinas y otros recursos para la manufactura de un producto o para poder brindar un servicio.

Por último, en [7] exponen que un diseño de instalaciones es la determinación de las ubicaciones relativas y la asignación del espacio disponible entre el número determinado de departamentos.

Según [8] una distribución por proceso contempla que en la empresa se manufacturan varios productos con volúmenes y tasas de producción variables, el flujo es variable y cada ítem puede requerir una secuencia de operaciones propia, en cuanto a la mano de obra, esta debe ser calificada, sin necesidad de estrecha supervisión y moderadamente adaptable, también se deberá programar el manejo de materiales y existirá el control de la producción e inventarios, también se considerará la baja rotación de materias primas y materiales en curso. Por otra parte, en este tipo de distribución se requiere que se destine gran espacio para el almacenamiento del producto en proceso y finalmente los costos fijos son bajos pero el costo unitario por mano de obra y materiales es alto.

En la actualidad existen distintos modelos automatizados que contemplan ecuaciones y operaciones matemáticas los cuales generan alternativas de solución para una correcta distribución de planta y además son capaces de resolver problemas con amplios contenidos de datos.

La planificación computarizada de la disposición de las relaciones (CORELAP) fue desarrollada por Lee y Moore en 1967 y es un algoritmo constructivo con el objetivo de desarrollar una mejor distribución de planta donde los departamentos y áreas de trabajo queden de una manera que sea más eficiente para la empresa. El procedimiento inicia con una matriz de relacional de actividades. Los requerimientos de datos para CORELAP son las áreas de los departamentos y la matriz relacional de actividades. La distribución se construye mediante el cálculo de la ratio total de proximidad (TCR) para cada departamento el valor de la TCR es la suma de los valores numéricos asignados a las relaciones en la matriz relacional de actividades. El usuario es quien asigna los pesos para cada una de las relaciones sin embargo los valores que toman normalmente las constantes para la determinación del TCR son $A= 6$, $E= 5$, $I= 4$, $O= 3$, $U= 2$, $X= 0$ [9].

El proceso de selección de los departamentos es el siguiente:

1. Seleccionar el departamento con mayor TCR.
2. En caso de empate en el valor TCR, se tomará el departamento con la siguiente preferencia: mayor TCR, mayor área del departamento.
3. Paso iterativo.
 - 3.1.1 Se selecciona el departamento con la mayor ratio de proximidad con los ya colocados.
 - 3.1.2 Ver casos de empate.

Proceso de colocación:

1. El primer departamento se sitúa en el centro.
2. Para los siguientes departamentos en ser colocados.
 - 2.1 Se evalúan todas las posibles situaciones.
 - 2.2 Para cada combinación se calcula:
 - 2.2.1 Ratio de colocación usando el CR y longitud de borde.
 - 2.2.2 Se escoge la ratio de colocación más alto.

Por otro lado, en [10] se menciona que la simulación se puede utilizar tanto como una herramienta de análisis para predecir el efecto de los cambios en los sistemas existentes y como una herramienta de diseño para predecir el rendimiento de los nuevos sistemas en diferentes conjuntos de circunstancias.

La Simulación es una herramienta de gran ayuda a la hora de disminuir los riesgos y optimizar la toma de decisiones empresariales, la evaluación de inversiones en tecnología, personal e instalaciones, así como para planificar, analizar y mejorar los procesos de la empresa. En concreto, presenta importantes posibilidades en su aplicación a instalaciones y procesos industriales, logísticos, de transporte o de servicios.

Los Modelos de Simulación permiten profundizar en las variables que afectan más significativamente al funcionamiento de la empresa, analizar sus interacciones y evaluar su impacto global, constituyendo una ayuda inestimable para optimizar los procesos [11].

Un modelo de simulación se requiere cuando surge la necesidad de visualizar de manera integral los componentes e interrelaciones de un sistema. En dicho modelo primero se debe lograr la representación abstracta de la realidad, posteriormente, se requiere generar las soluciones que producirá el modelo, para que después se tomen las decisiones pertinentes. Para ello, es necesario identificar cuándo la simulación es una herramienta útil, por ejemplo, cuando se conocen las leyes que gobiernan el comportamiento del proceso o sistema y sus relaciones, cuando el sistema sea del mundo real y pueda construir una mejora o beneficio de la organización y cuando los procesos o sistemas son de rediseño que implica en mejoras del sistema productivo [10].

Por otra parte, en [12] se menciona que la simulación es una herramienta práctica de la ingeniería ya que se representa un hecho real en este caso un proceso donde se analizan sus características.

Finalmente, una vez desarrolladas las soluciones, hay que seleccionar una de ellas, para lo que es necesario realizar una evaluación de las propuestas, lo que nos pone en presencia de un problema de decisión multicriterio. La evaluación de los planes alternativos determinará que propuesta ofrece la mejor distribución en planta. [13].

Metodología

Generalidades de la empresa bajo estudio

En la Figura 2 se representan las diferentes áreas que actualmente conforman la empresa de cerámica y la distribución actual de la empresa. Para elaborar este layout fue necesario realizar un inventario de todas las áreas que conforman la empresa.

Mientras que la Figura 3 muestra la situación actual de la empresa en el proceso de manufactura, desde una perspectiva global y resumida.

El proceso inicia con la primera actividad denominada “preparado de pasta”, para después continuar con el “moldeado de piezas”. Es importante mencionar que el moldeado de las piezas se realiza a través de prensado o vaciado, asimismo algunas piezas requieren de detalle (quitar rebaba o colocación de asa) mientras que otras no. Ambas continúan con la siguiente actividad la cual es el “pulido”, si la pieza se llegara a romper en esta actividad se puede regresar al preparado de pasta; en caso contrario, continúa con las siguientes actividades: el primer horneado sancocho, el esmaltado, el segundo horneado vidriado, el empaque y finalmente el envío a tienda o al cliente.

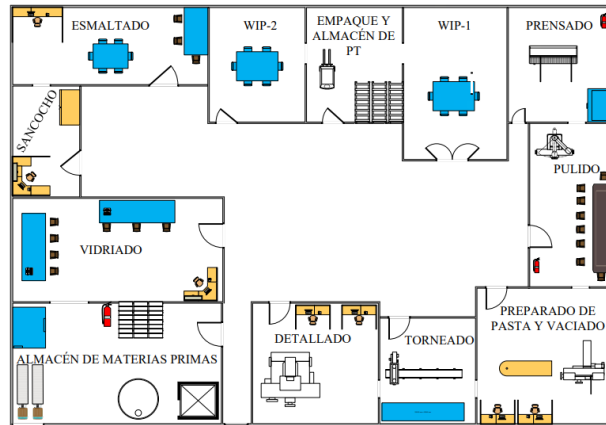


Figura 2 Layout de la empresa antes de aplicar las mejoras

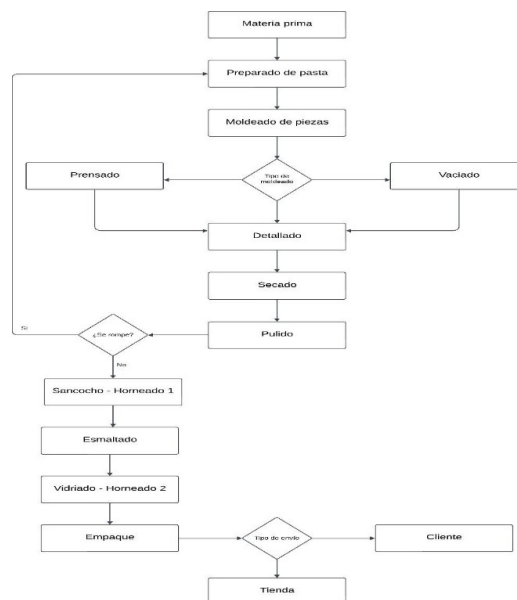


Figura 3 Proceso de manufactura

Identificar el tipo de distribución que la empresa requiere.

En una distribución de planta por proceso o función se agrupan todas las operaciones del mismo proceso y está diseñado para hacer frente a diversos tipos de productos y de pasos de proceso. Esta distribución contempla características de producto, flujo de trabajo, mano de obra, personal, manejo de materiales, inventarios, utilización de espacio, necesidad de capital y costo del producto. La ruta que siguen las piezas depende de cada producto. Con respecto a la distribución por proceso o función, que se explica en párrafos anteriores, es necesaria la observación de similitudes de las características expuestas en la literatura de una distribución por proceso y lo que actualmente es la empresa bajo estudio (véase Tabla I).

Una vez observadas y analizadas estas similitudes se determina que la mejor distribución de planta es por proceso o función.

Tabla 1. Distribución por proceso

Característica	Empresa de cerámica
Producto	Manufactura 75 items con volúmenes y tasas de producción variables.
Flujo de trabajo	Se clasifican los 75 items en 4 grupos. Cada grupo con una secuencia de operaciones propia.
Mano de obra	La mano de obra está calificada para su actividad a desempeñar.
Personal	El objetivo de manejo de materiales es de 900 kg por semana y cada área tiene su objetivo de producción.
Inventarios	Escaso inventario en producto terminado, alto inventario en materia prima y trabajo en proceso.
Utilización del espacio	Gran necesidad de espacio en trabajo en proceso.
Costo del producto	Costos fijos bajos y alto costo en mano de obra y materiales.

Se identificó el proceso de producción para el grupo de ítems. Y se realizaron los diagramas de flujo de materiales para cada familia de productos.

Una vez realizados los diagramas de flujo de materiales fue necesario realizar una Tabla de relación de actividades la cual ayudo a obtener el diagrama de relación de actividades y espacio. En cuanto al espacio, la nueva planta cuenta con una dimensión de 1,013 m² la cual muestra los metros cuadrados de ocupación de cada una de las áreas de trabajo que se muestran en la Figura 4.

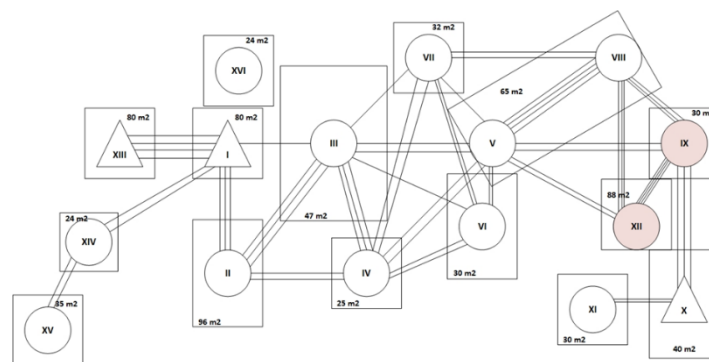


Figura 4 Diagrama de relación de actividades y espacio

Uso del software CORELAP

Las opciones generadas por el software CORELAP son las siguientes:

Primera alternativa de solución.

En la (Tabla 2) se muestra el valor TCR de cada uno de los departamentos a distribuir.

Tabla 2. Cálculo TCR

Departamento	TCR
Secado 1	45
Almacén de materias primas	40
Secado 2	40
Torneado	37
Prensado	35
Mantenimiento	32
Pulido	32
Almacén wip-2	31
Preparado de pasta	28
Almacén de producto terminado	26
Sancocho	26
Lijado	25
Diseño	24
Esmaltado	24
Moldes	24
Vidriado	23

En la Figura 5 se muestra la primera alternativa de distribución generada por el software. Los valores que tomaron las constantes son: A=6, E=5, I=4, O=3, U=2, X=0.



Figura 5. Alternativa 1 de distribución

Segunda alternativa de solución

En la Tabla 3 se muestra el valor TCR de cada uno de los departamentos a distribuir.

Tabla 3. Cálculo TCR

Departamento	TCR
Secado 2	110
Sancocho	103
Almacén de materias primas	97
Secado 1	94
Vidriado	88
Almacén de producto terminado	74
Prensado	48
Preparado de pasta	43
Torneado	40
Almacén wip-2	31
Pulido	23
Lijado	19
Mantenimiento	18
Moldes	16

Esmaltado	14
Diseño	12

En la Figura 6 se muestra la segunda alternativa de distribución generada por el software. Los valores que tomaron las constantes son: A=64, E=16, I=4, O=2, U=1, X=0.



Figura 6. Alternativa 2 de distribución

Tercera alternativa de distribución

En la Tabla IV se muestra el valor TCR de cada uno de los departamentos a distribuir.

Tabla 4. Cálculo TCR

Departamento	TCR
Secado 1	45
Secado 2	41
Almacén de materias primas	40
Torneado	39
Prensado	38
Pulido	35
Sancocho	34
Preparado de pasta	33

Almacén de wip-2	33
Mantenimiento	32
Vidriado	31
Lijado	31
Almacén de producto terminado	30
Moldes	29
Esmaltado	28
Diseño	27

En la Figura 7 se muestra la tercera alternativa de distribución generada por el software. Los valores que tomaron las constantes son: A=6, E=5, I=4, O=3, U=2, X=1.



Figura 7. Alternativa 3 de distribución

Cuarta alternativa de distribución

En la (Tabla 5) se muestra el valor TCR de cada uno de los departamentos a distribuir.

Tabla 5. Cálculo TCR

Departamento	TCR
Almacén de materias primas	150

Preparado de pasta	130
Prensado	125
Torneado	120
Secado 1	115
Lijado	100
Pulido	95
Secado 2	90
Sancocho	90
Almacén wip-2	85
Esmaltado	80
Vidriado	80
Almacén de producto terminado	75
Moldes	70
Mantenimiento	65
Diseño	60

En la Figura 8 se muestra la cuarta alternativa de distribución generada por el software. Los valores que tomaron las constantes son: A=25, E=20, I=15, O=10, U=5, X=0.

ALMACÉN DE PT Y EMPAQUE	ESMALTADO	ALMACÉN DE WIP-2	VIDRIADO	FABRICACIÓN DE MOLDES
DISEÑO	SECADO 2	PULIDO	SANCOCHO	
	ALMACÉN DE MATERIAS PRIMAS	PREPARADO DE PASTA	LIJADO	
	TORNEADO	PRENSADO	SECADO 1	MANTENIMIENTO

Figura 8. Alternativa 4 de distribución

Una vez revisado el flujo de los materiales en cada una de las alternativas de distribución generadas con CORELAP se obtienen dos alternativas factibles de distribución de planta para la fábrica de cerámica Figura 9 y Figura 10, estas son presentadas a los tomadores de decisiones de la empresa.

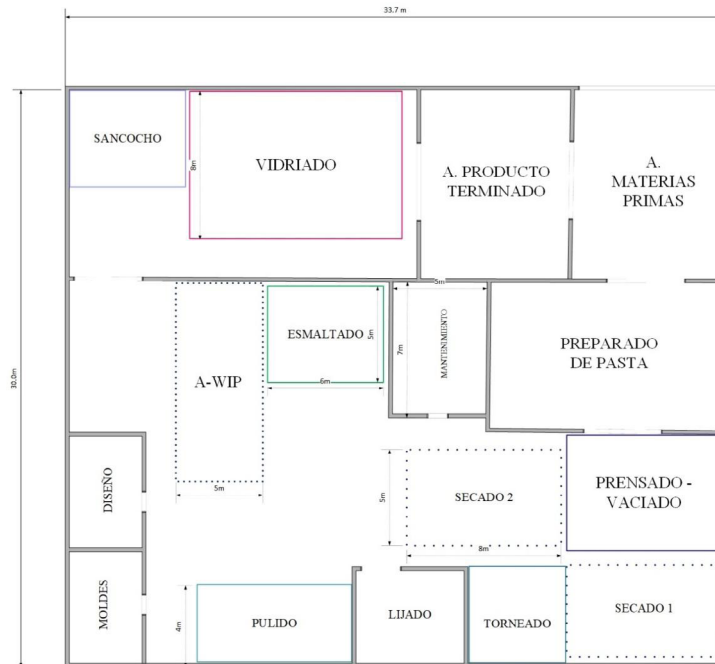


Figura 9. Primera alternativa factible de distribución de planta

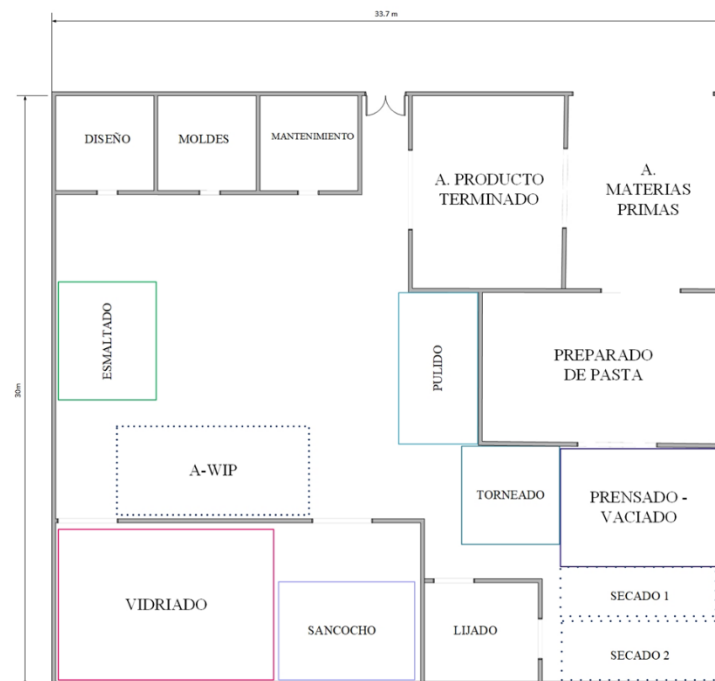


Figura 10. Segunda alternativa factible de distribución de planta

Simulación del proceso actual

La empresa bajo estudio, en el momento en el que se realizó el proyecto, tenía la necesidad de cambiarse a una nueva instalación por lo que se tenían que realizar inversiones

en nueva maquinaria para mejorar el tiempo de su proceso y además fue importante para la empresa conocer la capacidad de producción mensual.

La empresa estima que tiene una capacidad de 3792 piezas al mes y cuando tiene pedidos mayores los llega a rechazar o en algunos casos aumenta el tiempo de entrega para poder cumplir con esas órdenes. Por tal motivo los objetivos de la realización de la simulación se orientan a conocer la capacidad máxima de producción del sistema actual en un lapso de seis meses y la productividad de las áreas de trabajo y, por otra parte, realizar la simulación integrando nueva maquinaria para saber la capacidad de producción para el último semestre del año.

La recolección de datos para el modelo de simulación se realizó en la planta de cerámica, y se tomaron 30 tiempos en todos los procesos. La Tabla 6 muestra la distribución y parámetros identificados de las actividades del modelo de simulación.

Tabla 6. Distribución y parámetros de las actividades

Proceso	Distribución (segundos)
Prensado	Triangular (83,87,147)
Secado 1	Triangular (7200,10800,14400)
Retorneado	Normal (41.2,6.24)
Secado 2	Triangular (64800,86400,108000)
Lijado Atrás	Normal (43,9)
Lijado Frente	Normal (54.36,9.9)
Pulido	Normal (82.7,15.9)
Horno 1	Constante (129600)
Sellado	Normal (34.8,3.4)
Esmalte	Constante (50)
Horno 2	Constante (324000)

Para construir el modelo de simulación de la situación actual de la planta de cerámica en el software Arena se consideraron las distribuciones ya mencionadas en la Tabla 8, además de los días y horas laborables por mes, capacidad de los hornos de acuerdo a datos de las bitácoras y experiencia de los encargados de esas áreas y personal adjunto a cada actividad. El modelo de simulación está representado en la Figura 11.

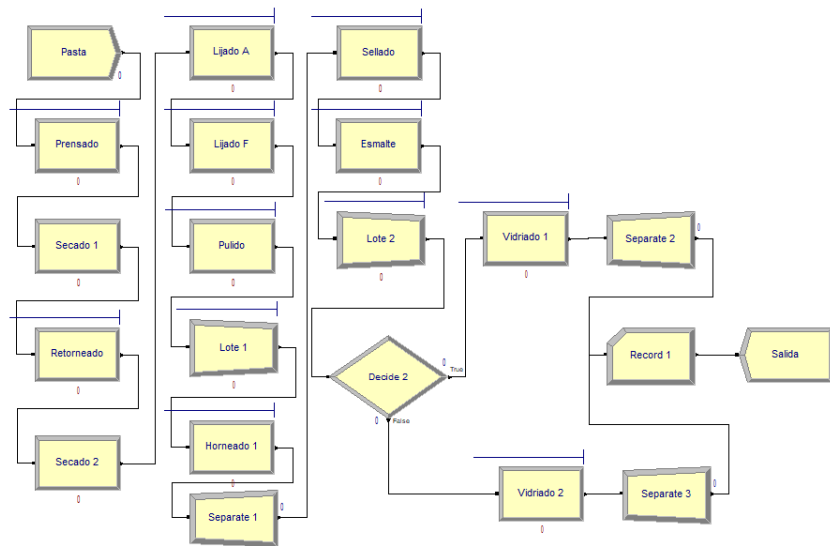


Figura 11 Modelo de simulación de la situación actual en Software Arena

Propuesta de escenarios de mejora

Escenario de mejora 1 Horneado continuo

En el primer escenario de mejora se realizó una simulación modificando el número de veces que se hornea tanto en el horneado 1 y horneado 2 manteniendo la restricción del tiempo de ciclo, los recursos humanos y de maquinaria permanecen como en el estado actual. Al realizar esta modificación se obtuvo una salida de **29,500 piezas**, un 22.8% más que en la situación actual.

Los recursos utilizados en el escenario de simulación con horneado continuo se mantienen similar para las actividades de prensado, pulido y lijado, la utilización de los hornos de vidriado (horno 2) disminuye ya que al aumentar la capacidad de horneado de 15 veces al mes a 8 veces que se tienen en la situación actual se requieren de un número mayor de piezas saliendo del horno 1 para alimentar al horno 2 y no se tenga un incremento en el tiempo de espera.

Escenario de mejora 2 Nueva maquinaria

En el escenario de mejora 2 se plantea implementar una prensa adicional, un segundo horno de sancocho y un tercer horno de vidriado con las mismas características a los de la operación actual. Al realizar la simulación se obtuvo una salida de **34,500 piezas** en un periodo de seis meses aumentando en 11,750 piezas adicionales a la operación actual.

Las medidas de utilización con datos de la simulación del escenario 2 añadiendo nueva maquinaria muestran que los hornos tanto del proceso de sancocho como los de vidriado

están cerca de su máxima utilización, y los demás procesos aumentaron cerca del 50 % su utilización al implementar una prensa extra.

Escenario de mejora 3 Hornos continuos y nueva maquinaria

El escenario de mejora tres tiene considerado utilizar la maquinaria adicional del escenario 2 pero con la modificación de un ciclo de horneado continuo como el escenario de mejora 1, la cantidad de piezas de salida con este escenario es de **59,250 piezas** aumentando en 36,500 artículos en un semestre respecto al estado actual.

La utilización de recursos en el escenario 3 es similar a la obtenida en el escenario 2 para los procesos de pulido, lijado, esmaltado y sellado, los procesos de horneado 1 y 2 tiene una disminución respecto al escenario 2 debido a que están programados para realizar horneadas continuamente, pero al tener tiempos de espera debido al proceso del primer horneado no cumplen con las 15 horneadas mensuales programadas, teniendo en promedio 13 horneadas al mes.

Análisis de resultados

Para cumplir con la demanda pronosticada se tuvieron que realizar 3 escenarios de mejora en el primero se realizó un horneado continuo con lo cual se obtuvo una salida de 29,500 piezas y un aumento de producción del 22.8%, el segundo escenario de mejora se planteó implementar una prensa adicional, un segundo horno de sancocho y un tercer horno de vidriado con esto al realizar la simulación se obtuvo una salida de 34,500 piezas, en el tercer escenario de mejora se consideró utilizar la maquinaria adicional del escenario 2 pero con la modificación de un ciclo de horneado continuo como en el escenario 1 y la cantidad de piezas de salida fue de 59,250, todas las simulaciones se realizaron con la simulación en un tiempo de 6 meses (Tabla 7).

La empresa tiene dos opciones; que los procesos de horneado 1 y 2 sean continuos realizando lo que implica tener personal disponible para este proceso; y la segunda opción es añadir nueva maquinaria lo que se plantea en el escenario 2, aunque en esta opción se tiene una sobre producción de 8844 artículos de acuerdo con el pronóstico y requiere una inversión en maquinaria.

Tabla 7. Resultados de la simulación para la capacidad de producción

Resultados de capacidad de productos			
Estado	Capacidad de producción semestral	Capacidad de producción promedio actual (mensuales)	Porcentaje de aumento
Situación actual	22,750	3,792	
Escenario 1	29,500	4,917	30%
Escenario 2	34,500	5,750	52%
Escenario 3	59,250	9,875	160%

Conclusiones

El resultado de las propuestas de distribución de planta permitió el flujo adecuado de personas y materiales además de la utilización de espacio disponible de manera efectiva y eficiente, así mismo, se tomó en cuenta que algunos departamentos no pueden situarse adyacentemente por razones de seguridad, independientemente del volumen de flujo de material entre ellos, mientras que otros departamentos necesitan ubicaciones específicas.

La simulación al ser una herramienta que permite imitar un proceso a lo largo del tiempo, además de medir los efectos en los cambios de un sistema, fue el mejor instrumento para cumplir con los objetivos planteados por la empresa de cerámica que eran, conocer la capacidad de producción del sistema actual y el de integrar nueva maquinaria para saber los efectos que causan en la producción y así identificar si el sistema actual tanto los modificados cumplen con el pronóstico de la demanda para el último semestre del año. Se simuló el sistema actual obteniendo una capacidad de producción de 22,750 piezas. Se diseñaron y evaluaron tres distintos escenarios de mejora; el primer escenario consistió en programar los procesos de horneado de forma continua; en el segundo escenario se añadió una prensa, un horno de sancocho y un horno de vidriado adicional al sistema actual y se mantuvieron los horarios laborales actuales; el tercer escenario mantiene la nueva maquinaria del escenario 2 y una programación continua de los hornos, los datos de capacidad de producción del sistema actual y los escenarios de mejora se muestran en las Tablas anteriores, en la que el escenario de mejora 1 tiene la capacidad de producción para cumplir con el pronóstico de la demanda para los seis últimos meses del año en curso.

Referencias

- [1] "Metodología SLP". Accedido el 9 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2020000200103
- [2] Muther, R (1968) Planificación y proyección de la empresa industrial (Método SLP). España: Técnicos y asociados S.A.
- [3] D. R. Kiran, "Chapter 19 - Systematic layout planning," D. R. B. T.P. P. and C. Kiran, Ed. Butterworth-Heinemann, 2019, pp. 279–292. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818364-9.00019-6>.
- [4] "Euskonews & Media :: Gaiak :: La arquitectura industrial y el desarrollo arquitectónico: del Parque Cultural Martín Ugalde a Ficoba". Euskonews 780 zenbakia. Accedido el 9 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <http://www.euskonews.com/0238zbnk/gaia23801es.html>
- [5] A. T. Haryanto, M. Hisjam, and W. K. Yew, "Redesign of Facilities Layout Using Systematic Layout Planning (SLP) on Manufacturing Company: A Case Study," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1096, no. 1, p. 12, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1096/1/012026. [3] S. S. Heragu, *Facilities design*. Crc Press, 2008.
- [6] F. A. C. CÁRDENAS and J. A. A. GARCÍA, "REGULARIZACIÓN DE DEPARTAMENTOS DE ÁREAS DESIGUALES A PARTIR DE SOLUCIONES PLANTEADAS AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.," Universidad Industrial de Santander, 2012. [Online]. Available: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/145344.pdf>
- [7] J. A. P. García and M. I. C. Valencia, *Planeación, Diseño y Layout de Instalaciones...: Un enfoque por competencias*. Grupo editorial patria, 2014.
- [8] A. Nozari and E. E. Ensore, "Computerized facility layout with graph theory," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 183–193, 1981, doi: [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(81\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0360-8352(81)90004-8).
- [9] M. D. Rossetti, *Simulation modeling and Arena*. John Wiley & Sons, 2015.
- [10] J. Banks, J. S. CARSON II, and L. Barry, "Discrete-event system simulation fourth edition." Pearson, 2005.
- [11] Niebel, B. W., Freivalds, A., & Osuna, M. A. G. (2004). Métodos, estándares y diseño del trabajo. Alfaomega.
- [12] "Method of Systematic Layout Planning Improved by Genetic Algorithm and Its Application to Plant Layout Design." Scopus preview - Scopus - Welcome to Scopus. Accedido el 9 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <http://www.scopus.com>
- [13] "Systematic Layout Planning | PDF | Diseño | Planificación". Scribd. Accedido el 9 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/391311243/Systematic-Layout-Planning>

Capítulo 8

Modelos para ubicar un centro de distribución en caso de contingencia por el volcán Popocatepetl en Morelos

Carolina Sacarlett Chávez Marchan, Maria del Carmen Torres Salazar, Jesús del Carmen Peralta Abarca

Resumen— La logística humanitaria es un proceso de planificación, gestión, implementación y control de flujo de información y bienes; con una gama de actividades tácticas y operativas, las cuales son utilizadas para brindar ayuda y satisfacer la demanda de personas en situación de emergencia. Considerando lo anterior, y dado que el volcán Popocatepetl tiene riesgo de hacer erupción y que las autoridades de protección civil de los estados colindantes al volcán tienen planeado ya el establecimiento de refugios temporales para los posibles damnificados, el presente trabajo busca encontrar el lugar más adecuado para establecer un centro de distribución (CEDI), que atienda dichos refugios temporales. Para encontrar la mejor ubicación del CEDI se utilizaron los modelos de Centro de Gravedad y AHP (Analythic Hierarchy Process). Para el modelo de centro de gravedad se tomaron como variables las coordenadas de los refugios temporales y su capacidad. Para el AHP, se consideraron la capacidad de los refugios temporales, la accesibilidad, las distancias y la seguridad. Después de la aplicación de ambos modelos, el resultado es localizar el CEDI en el municipio de Temixco, en un conocido balneario que por sus instalaciones puede funcionar adecuadamente en caso de una contingencia por el volcán Popocatepetl. La logística humanitaria va más allá de solo pedir y recibir ayuda, es un trabajo que se debe realizar con mayor esfuerzo al momento de distribuir los bienes adquiridos o donados, se tiene que buscar siempre hacerlo de forma óptima, utilizando las herramientas matemáticas al alcance.

Palabras Clave— centro de distribución, logística humanitaria, volcán Popocatepetl, centro de gravedad, proceso de análisis jerárquico.

Introducción

Uno de los desastres más importantes y devastadores que han ocurrido en los últimos años, el huracán Katrina en el año 2005, puso nuevamente en el mapa a la logística humanitaria, haciendo consciente a la población de mitigar los efectos que llegan con los desastres.

Actualmente la logística humanitaria es un tema que ha tomado muchas direcciones, por un lado, se toma como la acción de ayudar a personas en situaciones de riesgo; aliviar el sufrimiento de personas damnificadas o simplemente mandar ayuda en especie o económica a personas que han vivido un desastre. La logística humanitaria va más allá de eso, es un proceso que se hace de forma estratégica, desde la persona que manda y brinda la ayuda hasta el damnificado.

De acuerdo con Thomas y Kopczak [1], la logística humanitaria se define como el proceso de planificación, implementación y control del flujo y almacenamiento eficiente y rentable de bienes y materiales, así como de la información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el fin de aliviar el sufrimiento de personas vulnerables. Sheu [2], sugiere que es un proceso de planificación, gestión y control de los flujos eficientes de ayuda, información y servicios desde los puntos de origen hasta los puntos de destino para satisfacer las necesidades urgentes de las personas afectadas en situaciones de emergencia. Arroyo, Gaytán y Mejía [3], mencionan que está más orientada a la ejecución de las actividades tácticas (almacenaje de los productos recolectados), y operativas (abastecimiento a albergues y evacuación de individuos de la zona de desastre), requeridas para empatar la demanda de la población afectada con la oferta de ayuda disponible.

Con las aportaciones anteriores, la logística humanitaria se puede definir como un proceso de planificación, gestión, implementación y control de los flujos de información y bienes; con una gama de actividades tácticas y operativas, las cuales contribuyen a brindar ayuda y satisfacer la demanda de personas en situación de emergencia. La respuesta debe ser inmediata, ágil y eficaz para reducir el impacto social y económico que genera. La ayuda puede ser brindada hasta que el damnificado cuente con una estabilidad económica y social.

En el contexto de la logística humanitaria y considerando que la erupción del volcán Popocatepetl es una situación probable y en constante desarrollo, el presente trabajo busca encontrar, mediante modelos matemáticos, el lugar más adecuado para instalar un centro de distribución (CEDI), que opere para la recolección y entrega de productos a los refugios temporales establecidos por protección civil en el estado de Morelos. Para instaurar centros de distribución, se utilizan metodologías como el análisis multicriterio y de optimización [4], el método gráfico de Weber y el centro de gravedad [5]. Dado que se busca encontrar el mejor lugar de una sola instalación, el modelo de centro de gravedad es el adecuado. Para complementar de forma cualitativa, se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) como lo mencionan Urongo, Pérez y Romo [6].

El presente documento muestra los siguientes apartados: la descripción del volcán Popocatepetl, los efectos que pudieran tener las poblaciones cercanas de acuerdo con el tipo de escenario eruptivo y el trabajo que en el estado de Morelos ya ha realizado la Coordinación Estatal de Protección Civil. Posteriormente, se presenta la descripción de metodología utilizada para encontrar la ubicación del centro de distribución considerando los modelos de Centro de Gravedad y Proceso de Análisis Jerárquico, así como los cálculos y resultados de estos. Finalmente, se establecen las conclusiones del trabajo.

Volcán Popocatepetl

El Popocatepetl es un estratovolcán o volcán compuesto. Se le describe como un volcán activo, de hecho, el más activo de México. Descansa al sur de la Ciudad de México sobre los estados de Puebla, Morelos y México, en una provincia fisiográfica nombrada Eje Neovolcánico o Eje Volcánico Transversal, que es una cadena de volcanes que incluye al Iztaccíhuatl, al Parícutín y al Nevado de Toluca, entre otros. El Popocatepetl es un volcán geológicamente joven. Se cree que tiene unos 730,000 años de antigüedad y que es remanente de volcanes antiguos que colapsaron [7].

Por su origen náhuatl su nombre significa “montaña que humea”, por su altura es el más alto de México después del Pico de Orizaba, y por su cercanía con varias poblaciones humanas se le considera uno de los volcanes más peligrosos del mundo. También se le conoce como “Don Goyo” o simplemente como “Popo”.

El volcán Popocatepetl ha sido uno de los volcanes más activos en México; desde el año 1354 se han registrado 18 episodios eruptivos; su último periodo de actividad fue de 1919 a 1924, después de lo cual entró en un periodo de calma. En diciembre del año 1994 se inició el actual periodo eruptivo con emisiones de gases y cenizas, lo que provocó una evacuación preventiva de cerca de 70,000 personas. La mayor actividad presentada hasta ahora en el actual periodo eruptivo ocurrió en diciembre de 2000, cuando se emplazó el domo No. 12, que alcanzó un volumen estimado entre 15 y 19 millones de m³. Desde entonces y hasta fines de 2011 se formaron y posteriormente se destruyeron 22 domos (hasta el No. 34), todos ellos de dimensiones menores, que fueron poco a poco rellenando el cráter interno formado en 2001. Desde agosto de 2013 y hasta el momento actual (mayo 2019) los episodios de crecimiento y formación de domos de dimensiones menores han continuado, y se emplazaron 48 domos más [8].

Escenarios de riesgo

Los mapas de peligros del volcán Popocatepetl se elaboraron a partir de la reconstrucción

de la historia geológica del volcán. A través de trabajo de campo y revisión de archivos históricos se reconocieron los estilos eruptivos, recurrencia y extensión de las erupciones en tiempos geológicos e históricos en el volcán. Con esta información se proyectaron escenarios de peligro (Tabla 1) a través de múltiples simulaciones por computadora basadas en la magnitud de las erupciones y su probabilidad de ocurrencia.

Tabla 1. Análisis de escenarios posibles para la evolución de la actual etapa evolutiva del volcán Popocatepetl [4]

Escenario	Descripción	Efectos	Probabilidad
Explosiones pequeñas	Expulsión de ceniza y piedras pequeñas, la actividad disminuye lentamente y termina.	Afecta solo al área más inmediata al volcán, poco probables efectos letales, excepto sobre individuos cerca del cráter, ciudadanos con techos débiles afectados por piedras y cenizas, probabilidad de lahajares pequeños en épocas de lluvia.	70 a 90%
Explosiones moderadas	Episodios con intensidad de un orden de magnitud mayor que el anterior (índice de explosividad volcánica de 3 a 4).	Los grandes volúmenes de ceniza y piedras producen colapsos de techos de viviendas, afecta en caminos, comunicaciones y líneas de emergencia; los efectos abarcan un radio de 20 km.	10 a 25%
Colapso de domo de lava	Episodios posiblemente alternados con explosiones moderadas, la velocidad de crecimiento del domo de lava aumenta sensiblemente rebasa el cráter y se producen colapsos que causan avalanchas de flujo piroclástico, si la velocidad permanece estable este escenario tomaría de 1 a 3 años	Las avalanchas destruyen poblaciones cercanas ubicadas en barrancas, la zona afectada depende de la ubicación del derrumbe, peligro mayor en correspondencia con el labio inferior del cráter.	15 a 30%
Gran erupción pliniana	Exploración de extraordinaria potencia que alcanza gran altura y arroja grandes volúmenes de material aunados a flujos piroclásticos.	Evento catastrófico totalmente destructivo de en zonas de 1 a 3, efectos severos por caída de ceniza a un afuera de esas zonas.	2 a 5%

Población en riesgo

A partir de información contenida en el Atlas de Riesgos del Estado de Morelos, y en coordinación con el área científica del Centro Nacional de Prevención de Desastres, se identificaron las zonas de alto, mediano y bajo riesgo con el fin de establecer la zona de

planeación del Plan Operativo Popocatepetl. Lo anterior permitió establecer (Tabla 2) las comunidades expuestas al riesgo volcánico de cinco municipios ubicados en la zona de influencia del Volcán Popocatepetl.

Tabla 2. Población en riesgo y etapas de evacuación [4]

<i>Municipio</i>	<i>Localidad</i>	<i>Población</i>	<i>Riesgo Alto</i>	<i>R i e s g o Medio</i>	<i>R i e s g o Bajo</i>
Tetela del Volcán	Tlalmimilulpan	10 199	10 199		
	Hueyapan	6 478	6 478		
	Ocoxaltepec	1 338	1 338		
	Lomas Lindas	183		183	
	TOTAL	18 198	18 015	183	
Temoac	Temoac	5 799		5 799	
	Huazulco	3 847		3 847	
	Amilcingo	3 515		3 515	
	TOTAL	13 161		13 161	
Zacualpan	Tlacotepec	5 087		5 087	
	Zacualpan	3 492		3 492	
	TOTAL	8 579		8 579	
Ocuituco	Ocuituco	4 846		4 846	
	Huepalcalco	1 094		1 094	
	Jumiltepec	3 859		3 859	
	Huecauasco	1 785		1 785	
	Metepec	2 581		2 581	
	TOTAL	14 165		14 165	
Yecapixtla	Yecapixtla	16 811			16 811
	Achichipico	2 288		2, 288	
	Texcala	1 444		1 444	
	Tezontetelco	163		163	
	Xochitlan	2 606		2 606	
	Los Capulines	289		289	
	Colonia Paraíso las flores	209		209	
	TOTAL	37 975		21 164	16 811

Refugios temporales

Al surgir una emergencia provocada por la actividad del volcán Popocatepetl, se llevarán a cabo los trabajos de apertura y funcionamiento de los refugios temporales, para dar albergue a las personas que sean evacuadas de las poblaciones del estado aledañas al Volcán. Esta actividad corresponde a la Secretaría de Educación Pública y el Sistema DIF

Morelos, quienes tienen la responsabilidad de administrar los refugios temporales, que en su gran mayoría son instalaciones educativas; apoyan en esta actividad los gobiernos de los municipios de Cuernavaca, Jiutepec, Temixco, Emiliano Zapata y Xochitepec [8]

El término de refugio temporal se refiere a la instalación física habilitada para brindar temporalmente protección y bienestar a las personas que no tienen posibilidades inmediatas de acceso a una habitación segura en caso de un riesgo inminente, una emergencia, siniestro o desastre [9].

Metodología

El objetivo de este trabajo es identificar la ubicación óptima para establecer un Centro de Distribución (CEDI) que entregue ayuda humanitaria, como alimentos, ropa y artículos de limpieza personal, a los refugios temporales en el estado de Morelos. El propósito principal es mejorar la distribución durante una contingencia.

En este estudio, se aplicarán dos metodologías: el Centro de Gravedad y el Proceso de Análisis Jerárquico, también conocido como AHP por sus siglas en inglés. Estas dos metodologías se seleccionaron por las razones siguientes:

El Centro de Gravedad es una técnica bien establecida en logística y gestión de la cadena de suministro que se utiliza para optimizar la ubicación de instalaciones de distribución. Su enfoque cuantitativo permite minimizar los costos de transporte y maximizar la eficiencia de la cadena de suministro, lo cual es especialmente relevante en situaciones de contingencia donde se requiere una entrega rápida y eficaz de ayuda humanitaria. Es un método sencillo que genera una sola ubicación.

El AHP, por otro lado, es un método ampliamente utilizado para la toma de decisiones en situaciones complejas y con múltiples criterios. Permite evaluar de manera sistemática y ponderada las diferentes alternativas y criterios involucrados en la ubicación del CEDI. Su enfoque cualitativo permite considerar factores subjetivos, como la seguridad y accesibilidad de los refugios temporales, que pueden ser críticos en el contexto humanitario.

Estas metodologías se utilizan de manera complementaria, ya que el modelo Centro de Gravedad proporciona resultados cuantitativos y el modelo AHP, resultados cualitativos. La combinación de ambas metodologías permitirá determinar la ubicación óptima del CEDI.

El CEDI será trascendental para la entrega de ayuda humanitaria en situaciones de emergencia, por lo que es esencial determinar su ubicación adecuada. El resultado de este estudio será un importante aporte para la mejora de la distribución durante contingencias en el estado de Morelos.

Modelo de Centro de Gravedad

El modelo de centro de gravedad es una técnica valiosa para determinar la ubicación ideal de un Centro de Distribución (CEDI). Para aplicar este método de manera efectiva, es necesario recopilar información precisa y detallada sobre los clientes, la demanda de productos, los costos de transporte y otros factores relevantes. El objetivo principal es minimizar los costos de transporte y maximizar la eficiencia de la cadena de suministro [10].

El proceso para determinar la ubicación del CEDI mediante el modelo de centro de gravedad se puede resumir en los siguientes pasos:

Paso 1. Identificar la ubicación de los clientes y la demanda de productos.

Paso 2. Calcular las coordenadas x e y de cada cliente.

Paso 3. Calcular el peso de cada cliente, el cual puede medirse por la demanda de productos.

Paso 4. Calcular la suma total de los pesos de todos los clientes.

Para utilizar este método, se necesita calcular las coordenadas del centro de gravedad ponderado por el peso de cada cliente. De esta manera, se puede encontrar la ubicación óptima del CEDI que minimice los costos de transporte y maximice la eficiencia de la cadena de suministro.

Las coordenadas del centro de gravedad (X_{cg} , Y_{cg}) se calculan utilizando las siguientes fórmulas:

$$X_{cg} = \Sigma(x_i * v_i) / \Sigma v_i \quad (1)$$

$$Y_{cg} = \Sigma(y_i * v_i) / \Sigma v_i \quad (2)$$

Donde x_i e y_i son las coordenadas x e y de cada refugio, respectivamente, v_i es el aforo manejado por cada refugio y Σ es la suma de los valores correspondientes de todos los refugios.

Tabla 3. Coordenadas y aforo de cada refugio

No.	Refugio	Coordenada x	Coordenada y	Aforo v_i
1	CBTis 166	18.89633395	99.16575292	350
2	CETis 12	18.92012842	99.16865472	250
3	UTEZ	18.85050676	99.20074623	1200
4	CECyTE 03	18.85514735	99.19780444	380
5	I.T.Z	18.6534537	99.18446005	100
6	UPEMOR	18.90437975	99.17413628	600
7	CONALEP	18.84330047	99.23280882	425
8	WTC	18.7455638	99.24600667	1550
9	SECUNDARIA #02	18.92372938	99.24888715	500

10	PREPARATORIA #02	18.92494176	99.25015133	550
11	CETis 44	18.92372236	99.25054752	380
12	CBTA 08	18.68955257	99.2500236	540
13	COBAEM PLANTEL 01	18.96390585	99.23818012	350
14	CETis 136	18.62429002	99.20208929	500
15	PREPARATORIA #01	18.91961952	99.19819039	600
16	UAEM POLI 1	18.97932934	99.2370953	650
17	UAEM POLI 2	18.9853047	99.23764719	650
18	UAEM GIM	18.98121391	99.23984594	350

Usando los datos de la Tabla III y las ecuaciones 1 y 2, se puede calcular los valores necesarios para encontrar el centro de gravedad de la siguiente manera:

$$X_{cg} = ((18.89633395 * 350) + (18.92012842 * 250) + (18.85050676 * 1200) + (18.85514735 * 380) + (18.6534537 * 100) + (18.90437975 * 600) + (18.84330047 * 425) + (18.7455638 * 1550) + (18.92372938 * 500) + (18.92494176 * 550) + (18.92372236 * 380) + (18.68955257 * 540) + (18.96390585 * 350) + (18.62429002 * 500) + (18.91961952 * 600) + (18.97932934 * 650) + (18.9853047 * 650) + (18.98121391 * 350)) / (350 + 250 + 1200 + 380 + 100 + 600 + 425 + 1550 + 500 + 550 + 380 + 540 + 350 + 500 + 600 + 650 + 650 + 350)$$

$$X_{cg} = 18.8523547$$

$$Y_{cg} = ((99.16575292 * 350) + (99.16865472 * 250) + (99.20074623 * 1200) + (99.19780444 * 380) + (99.18446005 * 100) + (99.17413628 * 600) + (99.23280882 * 425) + (99.24600667 * 1550) + (99.24888715 * 500) + (99.25015133 * 550) + (99.25054752 * 380) + (99.2500236 * 540) + (99.23818012 * 350) + (99.20208929 * 500) + (99.19819039 * 600) + (99.2370953 * 650) + (99.23764719 * 650) + (99.23984594 * 350)) / (350 + 250 + 1200 + 380 + 100 + 600 + 425 + 1550 + 500 + 550 + 380 + 540 + 350 + 500 + 600 + 650 + 650 + 350)$$

$$Y_{cg} = 99.2136666$$

Por consiguiente, estas coordenadas (18.8523547, 99.2136666) representarán la ubicación óptima para el CEDI, minimizando los costos de transporte y maximizando la eficiencia de la cadena de suministro.

Las coordenadas se encuentran en Lomas de Cuernavaca, cerca del refugio CONALEP Plantel Temixco. Sin embargo, al considerar la densidad de población en esa área y la calidad de los accesos, se concluyó que establecer el CEDI allí podría tener desafíos

significativos.

La alta densidad de población en el área alrededor del refugio CONALEP Plantel Temixco dificulta la operación eficiente del CEDI, ya que la congestión del tráfico y la limitada disponibilidad de espacio afectan la fluidez de la distribución de la ayuda humanitaria. Además, por su densidad poblacional podría haber restricciones adicionales para la instalación de un centro de distribución debido a regulaciones locales, competencia por el uso del espacio, etc. Después de analizar en entorno del refugio CONALEP, se sugiere que el CEDI se establezca en la “Ex Hacienda de Temixco”.

El balneario ofrece ventajas en términos de acceso y disponibilidad de espacio. Cuenta con una infraestructura adecuada para el almacenamiento y distribución de suministros, y con las instalaciones necesarias para funcionar como un centro de recepción de ayuda, también tiene una mejor accesibilidad a través de vías principales y rutas de transporte.

Al seleccionar la ubicación óptima del centro de distribución en este lugar, se puede mejorar la eficiencia de la cadena de suministro, minimizar los costos de transporte y asegurar una entrega rápida y efectiva de los suministros a los refugios temporales.

Modelo de Análisis Jerárquico

El segundo modelo utilizado para determinar el centro de distribución es conocido como el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), el cual es una técnica de toma de decisiones desarrollada por Thomas L. Saaty. En el AHP, se utiliza una estructura jerárquica para descomponer un problema en diferentes niveles de criterios y alternativas, y se emplean comparaciones pareadas para determinar las preferencias relativas entre ellos. La Escala de Saaty es una escala de comparación utilizada en el AHP para asignar valores numéricos a las preferencias relativas [11].

Este método es una técnica matemática que se utiliza para la toma de decisiones en situaciones complejas y con múltiples criterios. A diferencia del modelo de Centro de Gravedad, este método proporciona una evaluación cualitativa que permite considerar factores subjetivos en la evaluación [12].

La participación de expertos en la evaluación comparativa es fundamental para garantizar la calidad y validez de los resultados. Estas personas pueden aportar conocimientos especializados, juicio y experiencia práctica que ayudan a establecer las comparaciones de manera adecuada y a asignar los valores numéricos en la Escala de Saaty de manera precisa [13].

Es importante tener en cuenta que la participación de expertos debe ser cuidadosamente

seleccionada y se deben seguir buenas prácticas para evitar sesgos y asegurar la imparcialidad en el proceso de evaluación.

Las implicaciones de estos resultados son diversas. En primer lugar, el AHP ayuda a tomar decisiones informadas y objetivas al proporcionar una metodología estructurada para evaluar los criterios clave. Esto garantiza que las decisiones sobre la ubicación del Centro de Distribución se basen en un análisis cuidadoso y ponderado de los factores relevantes. El resultado obtenido con el AHP es una jerarquía de prioridades que indica la importancia relativa de las alternativas evaluadas. Proporciona una base sólida para la toma de decisiones al considerar múltiples criterios y sus ponderaciones relativas. Al interpretar estos resultados, es posible identificar la alternativa más preferible o la de mayor prioridad en función de los criterios evaluados.

Para resolver este problema utilizando el AHP, se deben seguir los siguientes pasos [14].

- Definir el objetivo y los criterios.

Identificar los criterios que se utilizarán para comparar los refugios temporales. En este caso, se utilizarán los criterios de Aforo (capacidad de cada refugio para alojar a las personas damnificadas), Acceso (cantidad de avenidas principales que lo conectan), Distancia (calculada desde cada refugio hasta la Ex Hacienda de Temixco) y Seguridad (evaluación de seguridad de cada refugio por su ubicación).

Para establecer el criterio de accesibilidad se utilizó Google Maps, con el cual se identificaron las avenidas principales con las cuales cuenta cada refugio temporal, esto con la finalidad de tener en consideración la importancia de la vialidad con la que cuenta cada refugio. En el caso del criterio de seguridad, se realizó una encuesta a ciudadanos que viven cerca de los refugios temporales para conocer la percepción del nivel de seguridad que ellos consideran que tienen los refugios temporales.

- Establecer la jerarquía de los criterios.

Jerarquizar los criterios en función de su importancia relativa para el objetivo final. En este caso, se considera que todos los criterios son igualmente importantes, y el objetivo es identificar el refugio temporal más adecuado.

- Establecer la escala de comparación.

Para poder comparar los diferentes refugios temporales entre sí en función de cada uno de los criterios, es necesario establecer una escala de comparación. En el método AHP, se utilizan escalas numéricas para evaluar las comparaciones, asignando valores que reflejen las diferencias de importancia relativa entre los refugios.

- Obtener las matrices de comparación.

Para cada criterio establecido, se construye una matriz que compara todos los pares de

refugios temporales en función de dicho criterio. En cada comparación, se utiliza la escala definida previamente. Es importante señalar que la diagonal de la matriz debe ser igual a 1, ya que cada refugio temporal es idéntico a sí mismo. Los valores fuera de la diagonal se llenan según las definiciones de la escala correspondiente.

- Calcular la matriz de ponderaciones para cada criterio.

Se asigna un peso a cada criterio según su importancia relativa. Para lograr esto, se realiza un proceso de normalización utilizando las matrices de comparación.

- Calcular la matriz de prioridades globales para cada refugio temporal.

En esta matriz, se determina la prioridad de cada refugio temporal considerando las ponderaciones de los criterios y las evaluaciones que se han realizado en cada uno de ellos. Esta matriz se crea a partir de una matriz de evaluación comparativa, en la que se comparan las ubicaciones en función de los criterios previamente establecidos.

La metodología AHP permitirá evaluar los refugios temporales en función de múltiples criterios y obtener una jerarquía de prioridades que nos ayudará a seleccionar la ubicación óptima para el CEDI.

La Tabla 4 se elaboró para la aplicación del modelo, las escalas de acceso y seguridad ya fueron integradas:

Tabla 4. Datos de Refugios Temporales

No.	Refugio	Aforo	Acceso	Distancia (km)	Seguridad (%)
1	CBTis 166	350	2	8.24	22
2	CETis 12	250	3	10.1	18
3	UTEZ	1200	2	2.43	37
4	CECyTE 03	380	2	2.5	36
5	I.T.Z	100	2	21.72	32
6	UPEMOR	600	2	10.3	22
7	CONALEP	425	2	1.05	23
8	WTC	1550	2	7.05	27
9	SEC 2	500	1	9.16	17
10	PREPA 2	550	1	9.31	17
11	CETis 44	380	1	9.19	18
12	CBTA 8	540	2	20.66	23
13	COBAEM 1	350	2	13.3	36
14	CETis 136	500	2	24.67	30

15	PREPA 1	600	3	8.67	32
16	UAEM POLI 1	650	2	14.98	40
17	UAEM POLI 2	650	2	15.64	25
18	UAEM GYM	350	2	15.22	44

Para construir la matriz de comparación utilizando el modelo AHP, se comparó cada par de refugios temporales en términos de su aforo, accesibilidad, distancia y seguridad. Una vez calculadas las matrices de comparación, se procedió a desarrollar las matrices normalizadas para cada criterio.

Los resultados obtenidos de las matrices normalizadas fueron los siguientes:

- El refugio 8 (WTC) es preferible sobre las demás, dado que este refugio tiene más capacidad para refugiar a los damnificados.
- Con respecto a la matriz de acceso los refugios con mayor cantidad de calles principales son el CETis 12 (Centro de Estudios Tecnológico, Industrial y de Servicios, SEP) y la PREP #01 (Escuela preparatoria 1, UAEM).
- De la matriz normalizada de distancia, CONALEP plantel Temixco es el refugio que se encuentra más cerca del CEDI propuesto.
- En la matriz normalizada de seguridad el refugio llamado UAEM (GIMNASIO) es el que cuenta con mayor seguridad respecto al resto de refugios.

La Tabla 5 presenta la matriz normalizada de criterios. Al analizarla, se puede inferir que el factor más relevante a considerar es el aforo. Por lo tanto, este factor resulta crucial al momento de tomar decisiones.

Tabla 5. Matriz normalizada de criterios

Criterio	Aforo	Acceso	Distancia	Seguridad	Vector prioridad
Aforo	0.75	0.87	0.50	0.59	0.68
Acceso	0.08	0.10	0.28	0.33	0.20
Distancia	0.08	0.02	0.06	0.02	0.04
Seguridad	0.08	0.02	0.17	0.07	0.08

Haciendo la multiplicación entre la matriz conformada por los vectores prioridad de cada criterio y el vector prioridad de criterios, se obtiene el vector de prioridad global, Tabla 6.

Tabla 6. Matriz de prioridad global

Criterio/ Refugio	Volumen	Acceso	Distancia	Seguridad	Prioridad global
CBTis 166	0.02	0.05	0.06	0.02	0.03
CETis 12	0.01	0.14	0.04	0.01	0.04
UTEZ	0.15	0.05	0.15	0.09	0.13
CECyTE 03	0.02	0.05	0.15	0.09	0.04
I.T.Z	0.01	0.05	0.01	0.07	0.02
UPEMOR	0.05	0.05	0.04	0.02	0.05
CONALEP	0.04	0.05	0.19	0.02	0.05
WTC	0.25	0.05	0.07	0.03	0.19
SEC 2	0.04	0.02	0.04	0.01	0.04
PREPA 2	0.05	0.02	0.04	0.01	0.04
CETis 44	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02
CBTA 08	0.06	0.05	0.01	0.02	0.05
COBAEM 1	0.03	0.05	0.02	0.09	0.04
CETis 136	0.05	0.05	0.01	0.05	0.05
PREPA 1	0.06	0.14	0.06	0.06	0.07
UAEM POLI 1	0.06	0.05	0.02	0.11	0.06
UAEM POLI 2	0.06	0.05	0.02	0.07	0.06
UAEM GYM	0.02	0.05	0.02	0.23	0.04

Como resultado, con un valor de prioridad global de 0.19 la mejor ubicación es el World Trade Center, esto se debe a que es el refugio temporal con mayor capacidad para albergar a la población damnificada por ello es necesario que se abastezca de manera regular.

En términos prácticos, esto implica que la ubicación sugerida para el Centro de Distribución, basada en los resultados del AHP, permitirá una respuesta humanitaria más efectiva y eficiente en situaciones de emergencia. Asimismo, se puede esperar una mejor coordinación y distribución de alimentos y otros suministros esenciales, lo que beneficiará a las personas afectadas por la contingencia en el estado de Morelos que serán ubicadas en este espacio en caso de alguna contingencia mayor.

Las implicaciones de estos resultados en este trabajo se traducen en una distribución mejorada de la ayuda humanitaria durante contingencias, optimizando la eficiencia de la cadena de suministro y garantizando una respuesta rápida y efectiva a las necesidades de los refugios temporales. Este resultado también implica que se ha identificado un re-

fugio temporal como la opción más adecuada en términos de los criterios considerados, como aforo, accesibilidad, distancia y seguridad, que permiten identificar la ubicación óptima del Centro de Distribución en función de múltiples criterios.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el cálculo del Centro de Gravedad, se sugiere que el CEDI se establezca en la Ex Hacienda de Temixco, ya que cuenta con instalaciones adecuadas, espacio suficiente para el funcionamiento de un almacén y centro de distribución, y se encuentra cerca de vías principales y rutas de transporte que facilitarían la distribución de la ayuda.

Por otro lado, utilizando el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), se ha determinado que el refugio temporal con mayor prioridad es el World Trade Center (WTC), debido a su capacidad para albergar a la población damnificada. Que también se considera una buena propuesta para un CEDI.

Analizando ambos resultados y las necesidades de una contingencia, se concluye que la ubicación óptima para el CEDI sería la Ex Hacienda de Temixco, con el WTC como refugio principal. Esta ubicación permitiría maximizar la eficiencia de la cadena de suministro, minimizando los costos de transporte y garantizando un acceso rápido y seguro en situaciones de contingencia. La implementación de esta ubicación sugerida contribuirá a mejorar la distribución de alimentos durante contingencias en el estado de Morelos y proporcionará una respuesta humanitaria más efectiva en momentos de crisis.

La distancia entre la Ex Hacienda de Temixco y el WTC es de 11.36 km, lo cual resulta ventajoso ya que se puede acceder a través de la autopista de una forma rápida y segura.

El uso adecuado de las herramientas matemáticas permite la toma de decisiones fundamentadas para el establecimiento de instalaciones en situaciones caóticas, como es el caso planteado en este trabajo.

Referencias

- [1] Thomas, A. & Kopczak, L, From logistics to supply chain management: the path forward in the humanitarian sector, Fritz Institute, 2005.
- [2] Sheu, J. "Challenges of emergency logistics management", Transportation Research Part E 43,. 2007, pp. 655–659.
- [3] Arroyo, P., Gaytán, J. y Mejía, C, Retos para el desarrollo de estrategias de apoyo ante desastres naturales, Logística y cadenas de suministros: tendencias y desafíos en México, 2006.
- [4] Soto-dela Vega, Vival-Viera, J.G. & Vitor-Toso, E.A. "Metodología para localización de centros de distribución a través de análisis multicriterio y optimización" DYNA 81, 2014, pp. 28-35
- [5] Ares, F. Modelo de localización. Localización final, Business plan de una empresa de transporte de

mercancías, Barcelona, 2003.

- [6] Urango-Licona, O.D., Pérez Ortega, G. & Romo-Morales, G. “Aplicación de las técnicas de centro de gravedad y AHP para la localización de un centro de distribución de productos industriales en Colombia” *Revista CEA*, 1(2), 2015, pp. 79-97.
- [7] Gobierno del Estado de Morelos, Programa Operativo de Protección Civil del Volcán Popocatepetl del Estado de Morelos, Coordinación Estatal de Protección Civil, 2018.
- [8] Gobierno del Estado de Morelos, SINAPROC, CENAPRED y Coordinación Estatal de Protección Civil, Plan Popocatepetl, 2019.
- [9] CENAPRECE. Manual de atención a la salud ante desastres: refugios temporales. México: Subsecretaría de Prevención y Promoción de la Salud. S/F.
- [10] Ballou, R. H. *Business logistics/supply chain management: Planning, organizing, and controlling the supply chain*. Prentice Hall, 2004.
- [11] Lapierre, S. D., & Ruiz, A. Location analysis in supply chain management. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 2013, pp. 1-16.
- [12] López-Serrano, S.C., Chung-Alonso, P. & Ramírez-Rivera, M.P. Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método multicriterio para la localización óptima de estaciones intermodales. *Economía, sociedad y territorio*, 21, pp. 315-358. Epub 04 de octubre de 2021.
- [13] Irreño, C.A.B. Aplicación práctica del proceso de análisis jerárquico (AHP), para la toma de decisiones. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 5, 2018 pp. 91-100.
- [14] Osorio-Gómez, J.C., & Orejuela-Cabrera, J.P. El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, 39, pp. 247-252.

Capítulo 8

Simulación de políticas de inventario de una empresa textil

Samuel Domínguez Rosales, Lourdes Loza-Hernández, Agustín Bustos
Rosales, Sergio Vázquez Aranda

Resumen—Este trabajo presenta un modelo de simulación de sistemas dinámicos para validar que las políticas de inventario de producto terminado propuestas para una empresa del sector textil ofrecen un nivel de servicio mayor al que se tiene actualmente. La empresa utiliza una política de inventario de revisión continua con un punto de reorden y tamaño de lote para gestionar sus productos, con la aplicación de esta política se ha observado que continuamente tienen faltantes de productos para satisfacer la demanda, es por eso por lo que se propone la utilización de una política de inventario de revisión periódica, con el objetivo de aumentar el nivel de servicio que se ofrece a los clientes finales. Para comprobar la mejora en el nivel de servicio se diseñó un modelo de simulación de dinámica de sistemas que contempla tanto las políticas de inventario de producto terminado como las de materia prima, abarcando los eslabones de aprovisionamiento, almacenamiento de materias primas y producto terminado, producción y ventas de la cadena de suministro, se realizó la simulación de las políticas que se utilizan actualmente y las políticas propuestas, obteniendo como resultado que con las políticas propuestas se tiene un nivel de servicio del 82 por ciento el cual es una mejora significativa en comparación con el 56 por ciento que se tiene actualmente; además, se observó que hay productos que han tenido un sobre stock debido a la utilización de la política de inventario actual, mientras que con la aplicación de la política propuesta se logra una disminución de la cantidad de inventario que se almacena.

Palabras Clave—simulación; dinámica de sistemas; políticas de inventario.

Introducción

El control del flujo de materias primas desde los proveedores, manufactura y hasta los clientes que demandan productos terminados, es un factor crucial que es reconocido por las altas gerencias de las empresas, por lo tanto, resulta de gran importancia en decisiones estratégicas debido a la inversión total que resulta tener inventarios de materia prima, producto en proceso y productos terminados, siendo en la mayoría de las empresas estos inventarios una potencial área de mejora. En este trabajo se compara por medio de simulación el nivel de servicio que ofrecen a los clientes finales la política de inventario de revisión continua, que es la que utiliza actualmente la empresa, con la política de inventario de revisión periódica, que es la que se propone como mejora, con el fin de identificar cuál de las dos políticas tiene un mejor funcionamiento para el caso de estudio.

La modelación de los sistemas dinámicos ha sido de gran utilidad hoy en día, ya que es posible realizar un análisis según la complejidad del sistema en cuanto al comportamiento de las variables que influyen en un determinado proceso o actividad. Entendiendo entonces la dinámica de sistemas como una herramienta para controlar y manejar de forma eficiente todos los sistemas y operaciones por medio de simulaciones que permitan ver el comportamiento y los cambios del proceso en el tiempo. Esto lleva a que, por medio de la dinámica de sistemas, sea posible conocer el comportamiento de todo lo que influye en la administración del inventario para mejorar la productividad, disminuir costos y aumentar la ventaja competitiva empresarial.

El contenido del trabajo está en el siguiente orden, en esta primera parte se da la introducción y contexto del trabajo; en la segunda parte se dan los conceptos generales de las políticas de inventario de revisión continua y revisión periódica y los conceptos de sistemas de simulación de sistemas dinámicos; en la tercera parte se menciona la revisión de literatura hecha para la realización de este trabajo; la cuarta parte muestra el desarrollo del trabajo; en la quinta parte se describen los resultados obtenidos y finalmente, en la sexta parte se dan las conclusiones obtenidas.

Marco Teórico

Políticas de inventarios

Cuando un inventario se revisa de forma continua quiere decir que la cantidad de producto en inventario se revisa cada que hay algún movimiento en este; sus características son las siguientes [1, 11]:

Cuando el nivel de existencias cae por debajo de un punto determinado, llamado punto de reorden, se debe colocar un pedido por una nueva cantidad de producto que es fija.

El tiempo de pedido será en función de la demanda que es aleatoria.

El nivel de inventario al cual debe colocarse un nuevo pedido es especificado como punto para un nuevo pedido.

El sistema de revisión periódica se da en intervalos de tiempo iguales, por ejemplo cada semana, cada mes, cada dos meses, etc.; el tiempo para adquirir un nuevo pedido coincide con el inicio de cada intervalo de tiempo, sus características son [1, 11]:

1. El inventario se revisa en intervalos de tiempo fijos.
2. Se debe llegar a un nivel de inventario que cubra la demanda hasta el siguiente punto de revisión.
3. La cantidad de pedido es variable y depende de la cantidad de demanda.
4. Dinamica de sistemas

La dinámica de sistemas (DS) es una herramienta que se basa en la construcción de modelos que nos permite abordar situaciones complejas, aplicando la observación del todo y la relación con cada una de sus partes. Es una metodología ideada para resolver problemas concretos, fue creada en la década del 50's por el profesor Jay W. Forrester y se le denominó dinámica industrial, pero a lo largo del tiempo se fue adaptando para la aplicación a diferentes problemáticas. Hoy en día, los campos de aplicación de la dinámica de sistemas son muy variados y amplios. Actualmente, podemos hablar de tres grandes ámbitos de aplicación: ámbito empresarial, ámbito medio ambiental y ámbito social. Algunas de las aplicaciones que han experimentado la dinámica de sistemas, además del ámbito industrial y urbano, se ha empleado en sistemas sociológicos donde se han modelado desde aspectos teóricos, hasta cuestiones de implantación de la justicia. Otra área de aplicación es la de los sistemas ecológicos y medioambientales, en donde se ha aplicado tanto a dinámica de población, como de difusión de la contaminación. También, se ha implementado para definir estrategias para el suministro de recursos energéticos, entre otros [2].

La metodología de dinámica de sistemas es la siguiente [3, 12]:

1. Definición del problema.
2. Elaboración de la hipótesis dinámica.
3. Análisis de relaciones de causalidad (diagrama causal).
4. Formulación del modelo (diagrama de Forrester).
5. Análisis y evaluación del modelo.

El planteamiento del problema es la primera fase del proceso de construcción del modelo dinámico, en donde una de sus principales actividades es explorar el área de estudio y

definir las preguntas que van a orientar el estudio. La hipótesis dinámica busca relacionar lo teórico con una situación ideal. Esta normalmente se presenta por medio de un diagrama causal, en donde es posible relacionar todas las variables. Este diagrama presenta el conjunto de relaciones entre los elementos, presentando información concreta de los flujos y niveles, siendo así, una herramienta útil que permite conocer la estructura de realimentación del sistema por medio de bucles de realimentación en donde se causa un efecto directo o indirecto sobre las variables de estudio del modelo.

Diagrama causal

Los diagramas causales son una herramienta indispensable en la dinámica de sistemas, ya que ilustran la estructura de realimentación del sistema al ser una representación conceptual, también sirven para identificar los mapas mentales de las personas u organizaciones. Los diagramas causales son fundamentales para la dinámica de sistemas, pues además de lo anterior, sirven de guías para la elaboración y comprensión de los modelos. Al diagrama causal también se le suele llamar hipótesis dinámica [4].

El diagrama causal también se conoce con el nombre de diagrama de influencia. Se utiliza generalmente en la primera fase de la elaboración de un modelo a través de DS, puesto que puede simplificar la ilustración de este. En la Figura 1 aparece el diagrama causal correspondiente a un modelo elemental de gestión de un inventario. La variación del inventario está afectada por los cambios debidos a la producción (con una tasa de producción) y al número de pedidos. Es evidente que un aumento de la producción implica un aumento de inventarios, por otro lado, un aumento en el número de pedidos corresponde con una disminución del inventario [5].

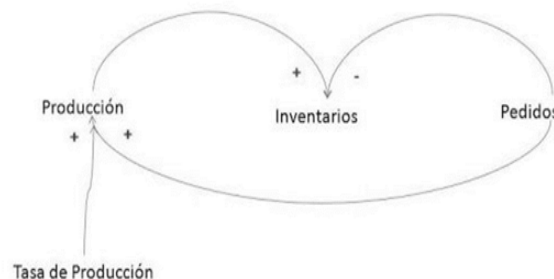


Figura 1. Diagrama de Forrester

El diagrama de Forrester, también conocido como diagrama de flujos, se genera a partir del diagrama causal, y permite que el modelo pueda ser implementado en un ordenador para su posterior simulación. Cada uno de los elementos que aparecen en el diagrama causal es representado por medio de variables que pueden ser: niveles, flujos y variables

auxiliares [5].

Variables de nivel: estas variables representan el estado del sistema y aportan información básica para la toma de decisiones, se representan por medio de un rectángulo con un nombre en su interior, un ejemplo de esta variable es la cantidad de personas de una ciudad en un momento determinado, esta variable no es constante y cambia con el tiempo debido a variables de flujo.

Variable de flujo: estas variables representan la modificación de las variables de nivel por medio de flujo, por ejemplo, la variable de nivel de personas de una ciudad se modifica debido a la variable de flujo de entrada de nacimientos y la variable de flujo de salida de defunciones.

Variables Auxiliares: describen los procesos intermedios para la toma de decisiones. La figura 2 muestra el diagrama de Forrester para un modelo elemental de gestión de inventarios, en este diagrama se tiene una variable de nivel que representa la cantidad de inventario que se tiene a lo largo del tiempo, se tiene una variable de flujo de entrada que es la producción, una variable de flujo de salida que son los pedidos y una variable auxiliar que marca la tasa de producción.

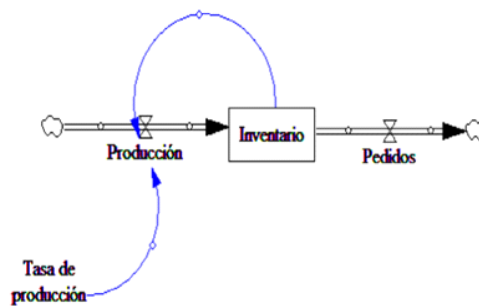


Figura 2. Software Vensim

Vensim es un software de simulación de potencia industrial para mejorar el rendimiento de los sistemas reales. El rico conjunto de funciones de Vensim enfatiza la calidad del modelo, las conexiones a los datos, la distribución flexible y los algoritmos avanzados. Este software contiene las herramientas necesarias para crear diagramas causales y diagramas de Forrester, lo que facilita el diseño de los modelos de simulación dinámica.

Medidas de desempeño

Nivel de servicio: es un indicador que muestra la probabilidad de que haya suficiente stock disponible para satisfacer la demanda de un producto. Un alto porcentaje de nivel

de servicio implica que la compañía es capaz de abastecer casi la totalidad de la demanda generada para un determinado producto.

$$NS = \frac{DEMANDA - PRODUCTOS FALTANTES}{DEMANDA}$$

Stock promedio: es el volumen medio de existencias que se almacenan en la instalación a lo largo de un periodo de tiempo concreto, usualmente un año. Esta métrica permite que el responsable logístico cuente con información objetiva de la cuantía de stock promedio almacenada en la instalación durante el período seleccionado.

$$STOCK PROMEDIO = (STOCK INICIAL + STOCK FINAL)/2$$

Revisión de Literatura

Para la realización de este trabajo se buscaron trabajos relacionados a la simulación de dinámica de sistemas de inventarios y cadenas de suministro, a continuación se hace referencia a los más relevantes.

En el trabajo de S. Jaén [4] se da una revisión de cómo se forman los diagramas causales teniendo en cuenta los errores que se deben de evitar, se dan ejemplos de como usar las variables y ejemplos de realimentaciones en lo diagramas. X. Canela por su parte [6], muestra cómo se simuló en el software Vensim el modelo de Wilson para la gestión de inventarios, para el cual al realizar el diagrama causal en un principio se pensó que el problema sería muy simple de simular, ya que solo están presentes las variables de existencias, compras, stock de seguridad y ventas, pero al momento de crear el modelo en el software Vensim se vio que para simular de forma correcta el modelo, es necesario añadir más variables, tales como el ritmo de las ventas, número de pedidos y cantidad óptima de pedido, además de conocer también datos como los días útiles, la cantidad de ventas anuales, el costo de pedir y el costo de mantener en inventario, por lo que se comprobó que la dinámica de sistemas es bastante útil para simular este modelo, aunque también a medida que deseamos conocer más información acerca del modelo, es necesario incluir nuevas variables y utilizar más herramientas del software como la opción DELAY (demora) o RANDOM (aleatorio) que son útiles para simular la demanda tomando en cuenta la aleatoriedad.

R. M. Chavez Guillén [7] desarrolla dos modelos computacionales para el manejo de inventarios mediante la utilización de la dinámica de sistemas a través del software Ithink, donde se simularon políticas de inventarios de revisión continua y revisión periódica, el modelo demostró que mediante el manejo de las órdenes de compra se mantiene el sistema sin caer en pedidos pendientes obteniendo los resultados esperados. M. Xu [5]

presenta la aplicación de la metodología de dinámica de sistemas con modelos matemáticos relacionados con la gestión de inventarios, en esta aplicación se utilizó el software Vensim para el estudio de los modelos de inventarios lineal, exponencial, modelo logístico, modelos de disolución y modelo de Wilson. Con el estudio de estos modelos se vio lo útil que es la dinámica de sistemas para la simulación de modelos de inventarios, además de que se tiene la referencia de la utilización del software.

En el trabajo de Agudelo y López [3] se estudia el proceso de gestión de inventarios por medio de la dinámica de sistemas, la cual permite conocer el comportamiento de las variables de acuerdo a sus relaciones, se presenta una revisión de modelos dinámicos relacionados con el inventario, dando la posibilidad de analizar diagramas causales y de Forrester, variables, criterios y parámetros que influyen en cada sistema, y llegan a la conclusión de que los modelos deben de tomar en cuenta factores referentes a las necesidades de los clientes como lo son la demanda, tiempo de espera, producción, nivel de servicio, pronósticos de la demanda.

En Paredes Rodríguez y Osorio Gómez [8] se evalúa el impacto que tiene la implementación de una política de inventario (R, S) en el flujo de caja de una red de distribución, se involucra el funcionamiento de la cadena de suministro de artículos ferreteros, conformada por un detallista y un fabricante la cual se simula con la metodología de dinámica de sistemas. Con los resultados del estudio se valida el impacto positivo que tiene la política sobre la liquidez de la red y también se identifica la importancia que tienen parámetros como la demanda, el periodo de revisión y la capacidad de producción.

E. Alonso et al. [9] en su trabajo realizaron la simulación de los eslabones de cadena de suministro de aprovisionamiento, producción y distribución tomando como base la dinámica de sistemas a un caso de estudio, el cual es una empresa que fabrica envases de plástico, donde los resultados muestran tres diferentes escenarios que son ejecutados a través de una interfaz de usuario, permitiendo observar el comportamiento de las utilidades, las ventas de producto terminado y el uso de resina en la fabricación de los envases.

Desarrollo del Trabajo

Política de inventario actual

El trabajo se desarrolló para una empresa de manufactura del sector textil, la cual ha presentado faltantes de producto terminado continuamente, lo que afecta directamente a la satisfacción de sus clientes; esta empresa actualmente gestiona sus inventarios de producto terminado mediante una política de revisión continua con una cantidad de pedido (Q) y un punto de reorden determinado intuitivamente de sus 39 principales productos de ventas en el mercado, además la demanda para cada mes la calcula con base al prome-

dio de sus ventas históricas. La Tabla 1 presenta los datos de cantidad de pedido y punto de reorden para los 39 productos analizados.

Tabla 1. Datos de cantidad de pedido y punto de reorden

Producto	Cantidad de pedido (pzs)	Punto de reorden (pzs)	Producto	Cantidad de pedido (pzs)	Punto de reorden (pzs)
1	5	10	21	60	120
2	10	15	22	30	60
3	20	15	23	100	200
4	10	25	24	80	160
5	15	30	25	10	20
6	10	20	26	6	13
7	100	160	27	10	20
8	25	50	28	10	20
9	30	60	29	50	100
10	80	160	30	50	100
11	40	70	31	38	75
12	160	320	32	70	140
13	40	80	33	70	140
14	25	50	34	45	90
15	20	40	35	60	120
16	20	35	36	15	30
17	25	45	37	28	55
18	30	60	38	25	50
19	110	220	39	30	60
20	40	80			

Fuente: Elaboración propia.

Política de Inventario propuesta

La política propuesta es de revisión periódica y se basa en un pronóstico de demanda mensual realizado para los 39 productos, a partir de eso se realiza un plan maestro de producción (MPS) para un año, donde se va solicitando periodo por periodo la cantidad de producción requerida para satisfacer el pronóstico de la demanda. Por ejemplo, el

producto 12 el cual es el más vendido tiene un inventario inicial de 410 piezas y un pronóstico de demanda de 573 piezas, esto indica que se debe solicitar a producción 163 piezas para satisfacer la demanda pronosticada, la Tabla 2 muestra los pronósticos de los 39 productos.

Tabla 2. Pronósticos mensual de los 39 productos

Producto	Pronóstico (Pzs)	Producto	Pronóstico (Pzs)
producto 1	22	producto 21	200
producto 2	20	producto 22	90
producto 3	39	producto 23	85
producto 4	25	producto 24	78
producto 5	70	producto 25	62
producto 6	57	producto 26	19
producto 7	242	producto 27	37
producto 8	58	producto 28	23
producto 9	38	producto 29	128
producto 10	211	producto 30	76
producto 11	115	producto 31	34
producto 12	573	producto 32	252
producto 13	107	producto 33	333
producto 14	101	producto 34	65
producto 15	38	producto 35	75
producto 16	34	producto 36	27
producto 17	32	producto 37	31
producto 18	82	producto 38	57
producto 19	445	producto 39	80
producto 20	82		

Fuente: Elaboración propia.

Diseño del modelo de simulación

El modelo de simulación se diseñó en el software Vensim se comenzó identificando las variables que forman el diagrama causal como se muestra en la figura 3.

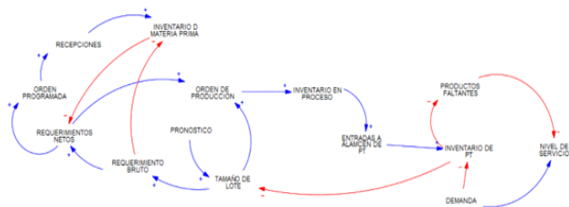


Figura 3. Diagrama causal del modelo diseñado. Fuente: Elaboración propia.

Las relaciones de causalidad del diagrama presentado muestran como las variables de inventario de materia prima, inventario en proceso e inventario de producto terminado se ven afectadas por variables de entrada y salida, por ejemplo, el inventario de materia prima se ve afectado negativamente por la variable de requerimientos brutos, esto indica que los requerimientos brutos disminuyen la cantidad de materia prima, por el contrario en inventario de materia prima también afecta negativamente la variable de requerimientos netos, esto indica que entre más inventario de materia prima existe hay menos requerimientos netos; este bucle de variables representa la planificación de requisitos de materiales (MRP) que se calcula para los materiales.

Por otra parte, la variable de tamaño de lote representa el cálculo del MPS para los producto terminados, como se observa en el diagrama la variable de pronóstico tiene un efecto de aumentar el tamaño de lote a fabricar, al mismo tiempo la variable de inventario de producto terminado disminuye el tamaño de lote; estas tres variables determinan la cantidad que se solicitara a fabricar en la orden de producción y todo este flujo de material llegará al inventario en proceso y posteriormente ingresará al almacén de producto terminado, con el cual se atenderá la demanda de los clientes.

El diagrama de Forrester se muestra en la figura 4 y se forma de 3 variables de nivel que son los inventarios de materia prima, inventario en proceso e inventario de producto terminado; cada una con sus variables de flujo de entrada y salida, además de que el modelo también incluye 7 variables auxiliares:

Nivel de servicio.

Productos faltantes.

Pronóstico.

Tamaño de lote.

Requerimientos brutos.

Requerimientos netos.

Orden programada.



Figura. 4. Diagrama de Forrester del modelo diseñado. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente a la elaboración de los diagramas de causalidad y de Forrester, las variables se relacionan con sus ecuaciones matemáticas para que el modelo dinámico simule de manera correcta el funcionamiento del proceso, un ejemplo de esto (figura 5) se tiene para la variable de nivel de inventario de producto terminado, a la cual se le colocó un valor inicial de 410 piezas, y la operación que calcula su valor es (entrada de producto terminado – demanda) como se ve en la figura 5.

Para las demás variables la configuración de ecuaciones en Vensim es como sigue:

Inventario de en Proceso: se registra el valor inicial de inventario y la ecuación es recepciones – requerimiento bruto.

Recepciones: son igual a la orden programada.

Orden programada: es igual a los requerimientos netos.

Requerimientos netos: la fórmula es una condicional Si Entonces otro caso (Inventario en proceso < requerimiento bruto, ABS (Inventario en Proceso - requerimiento bruto), 0).

Requerimiento bruto: tamaño de lote * cantidad requerida de materia prima.

Inventario en proceso: se registra el valor inicial en 0 y la ecuación es orden de producción – al almacén.

Orden de producción: la fórmula es una condicional Si Entonces otro caso (requerimientos netos > 0, 0, tamaño de lote).

Tamaño de lote: la fórmula es una condicional Si Entonces otro caso (Inventario producto terminado < pronóstico, ABS (Inventario producto terminado - pronóstico), 0).

Pronóstico: se registra el valor de pronóstico para el producto.

Inventario producto terminado: se registra el valor inicial del inventario de producto terminado y la ecuación es (entrada de producto terminado - demanda).

Entrada producto terminado: es igual a la variable al almacén que es igual a la orden de producción.

Productos faltantes: la fórmula es una condicional Si Entonces otro caso (inventario de producto terminado <0, ABS (inventario producto terminado),0).

Demanda: la ecuación es Entera (RANDOM NORMAL (min, max, media, desviación estándar, semilla)) esta ecuación es para generar los valores aleatorios que representan la demanda simulada para el modelo.

Nivel de servicio: la fórmula es una condicional Si Entonces otro caso ((demanda-productos faltantes) /demanda<0,0,(demanda-productos faltantes)/demanda).

Resultados

Se realizó la simulación de la política de inventario actual, para el producto más vendido que es el número 12 para 12 meses, como ejemplo de los cálculos realizados para los 39 productos. El número de veces que se repitió la simulación se calculó de acuerdo a la ecuación 3 [10], los datos de entrada son: pronóstico de 573 piezas, punto de reorden 320 piezas, cantidad de pedido 160 piezas, inventario inicial de producto terminado de 410 piezas, inventario inicial de materia prima de 210,883 m², dando como resultado un nivel de servicio promedio de 22.98 %, esto indica que en efecto se tienen bastantes faltantes de producto lo que provoca un bajo nivel de servicio a los clientes finales.

$$n=(\sigma/\varepsilon * Z_{\alpha/2})^2$$

Donde:

n : número de repeticiones.

σ : desviación estándar.

ε : error permitido.

Posteriormente se realizó la simulación para el mismo producto con la política de inventario propuesta de revisión periódica, los datos de entrada son: pronóstico de 573 piezas, inventario inicial de producto terminado de 410 piezas, inventario inicial de materia prima de 210,883 m², dando como resultado un nivel de servicio promedio de 79.37 % lo cual es una mejora significativa en comparación con el nivel de servicio de la política actual.

La demanda se simuló generando números aleatorios de acuerdo a la distribución de probabilidad, para el caso del producto 12 se utilizó una distribución normal con media de 415 y desviación estándar de 178.

Al realizar las simulaciones para los 39 productos se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de nivel de servicio para cada política de inventario.

Nivel de Servicio					
Producto	Actual	Propuesto	Producto	Actual	Propuesto
1	18.81%	45.22%	21	39.11%	41.51%
2	39.76%	85.35%	22	29.24%	65.32%
3	40.82%	80.42%	23	99.93%	92.99%
4	60.77%	95.84%	24	100.00%	97.47%
5	27.83%	76.87%	25	16.20%	84.98%
6	77.30%	92.40%	26	26.15%	77.68%
7	45.74%	97.18%	27	19.80%	75.99%
8	55.61%	96.40%	28	53.78%	86.85%
9	59.86%	92.08%	29	51.31%	96.47%
10	73.75%	98.29%	30	95.12%	96.43%
11	48.41%	62.50%	31	98.54%	95.17%
12	22.98%	79.37%	32	49.96%	98.49%
13	59.46%	81.52%	33	55.07%	99.24%
14	28.69%	64.40%	34	98.22%	98.47%
15	68.91%	80.71%	35	99.92%	98.71%
16	43.17%	40.64%	36	100.00%	100.00%
17	62.36%	54.21%	37	100.00%	98.05%
18	23.44%	23.86%	38	39.13%	93.10%
19	52.32%	91.99%	39	59.76%	97.03%
20	25.46%	50.77%			

Fuente: Elaboración propia.

El nivel de servicio general que se obtuvo utilizando la política de inventario propuesta es de 82 % en comparación con el 56 % que se tiene con la política actual.

Por medio de la simulación también se revisó el indicador de stock promedio, para conocer la cantidad en pesos de stock promedio disponible o faltante en el periodo de un año, tanto para el proceso actual como para el propuesto, tomando como ejemplo nuevamente el producto 12 con el proceso actual se obtuvo un stock promedio de -\$ 2,520,293.00 esta cantidad negativa indica que se tuvieron productos faltantes en stock para satisfacer la demanda del mercado, por lo que esta cantidad se puede interpretar como la cantidad

de ventas perdidas debido a los faltantes de productos, en comparación con el proceso propuesto, el cual tiene un stock promedio de \$ 213,360.00 esta cantidad evidentemente mejora a la del proceso actual debido a que permite satisfacer la demanda con casi un 80 % de nivel de servicio.

Otro punto para este análisis de resultado se tiene con el producto 24, en la Tabla 3 se ve que el nivel de servicio de la política actual es del 100 % mientras que con la política propuesta es del 97.47 %, sin embargo en figura 6 se ve que el stock promedio que se tiene con la política actual es de \$ 1,014,759 mientras que con la política propuesta este stock promedio se reduce a \$193,096.38 que es una gran diferencia, esto indica que la política propuesta ofrece un nivel de servicio bastante bueno al mismo tiempo que reduce la existencia de inventario.

STOCK PROMEDIO \$					
Producto	Actual	Propuesto	Producto	Actual	Propuesto
1	-\$ 143,000.00	-\$ 14,608.75	21	-\$ 969,789.33	-\$ 835,809.33
2	-\$ 58,759.50	\$ 37,123.25	22	-\$ 319,806.67	-\$ 141,885.33
3	-\$ 249,310.33	\$ 29,152.00	23	\$ 717,141.63	\$ 67,177.38
4	-\$ 49,573.58	\$ 32,216.27	24	\$ 1,014,759.00	\$ 193,096.38
5	-\$ 541,534.00	\$ 29,986.00	25	-\$ 471,821.17	-\$ 1,879.17
6	\$ 854,084.00	\$ 1,052,706.00	26	-\$ 87,418.83	-\$ 4,585.17
7	-\$ 218,458.33	\$ 138,098.33	27	-\$ 481,455.00	-\$ 15,210.00
8	\$ 22,817.67	\$ 42,311.50	28	\$ 13,357.50	\$ 50,115.00
9	\$ 11,229.17	\$ 20,392.17	29	\$ 114,660.00	\$ 134,257.50
10	\$ 406,536.67	\$ 357,700.00	30	\$ 294,645.00	\$ 279,142.50
11	-\$ 282,795.33	\$ 2,605.17	31	\$ 294,615.75	\$ 56,199.00
12	-\$ 2,510,293.33	\$ 213,360.00	32	\$ 32,494.13	\$ 166,526.21
13	-\$ 157,080.00	\$ 271,245.33	33	\$ 124,832.83	\$ 316,038.75
14	-\$ 565,488.00	-\$ 90,757.33	34	\$ 119,491.00	\$ 51,743.33
15	\$ 93,016.00	\$ 59,546.67	35	\$ 195,301.00	\$ 49,938.33
16	-\$ 149,585.33	-\$ 109,237.33	36	\$ 378,314.00	\$ 390,822.00
17	-\$ 114,986.67	-\$ 135,314.67	37	\$ 274,434.00	\$ 38,266.00
18	-\$ 587,561.33	-\$ 729,446.67	38	-\$ 1,794,045.00	\$ 6,467.08
19	\$ 336,093.33	\$ 743,120.00	39	-\$ 30,262.92	\$ 79,746.88
20	-\$ 277,456.67	-\$ 37,566.67			

Figura 6. Resultados de stock promedio para cada política de inventario.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó una prueba de hipótesis para dos medias con un nivel de significancia del 95 %, para validar que se mejora el nivel de servicio usando la política de revisión periódica propuesta, la hipótesis nula y alternativa quedaron como sigue:

H_0 : el nivel de servicio de la política de revisión periódica propuesta es menor o igual que el de la política actual.

H_1 : el nivel de servicio de la política de revisión periódica propuesta es mayor que el de la política actual.

Al aplicar la formula con los datos $x_1 = 0.5556$, $x_2 = 0.8164$, $\sigma_1 = 0.2705$, $\sigma_2 = 0.1996$, $z_\alpha = 1.6$ da como resultado $z = 4.844853679$ el cual es mayor que z_α , por lo que se concluye que, como $z > z_\alpha$, por lo tanto, no existe evidencia suficiente para decir que el nivel de servicio de la política propuesta es menor o igual que el de la política actual, por lo que se acepta la hipótesis alternativa de que el nivel de servicio de la política propuesta es mayor que el de la política actual.

Conclusiones

Es importante que las empresas de manufactura tengan presente que la política de inventario que manejan puede ser mejorable en el sentido de cumplir con la satisfacción de sus clientes y al mismo tiempo, mejorar las existencias de productos en sus almacenes.

La simulación mediante dinámica de sistemas es una opción bastante útil al momento de comparar diferentes escenarios dentro de problemas de la cadena de suministro como son los inventarios.

La realización de los diagramas causales es útil para identificar como se relacionan las variables dentro de un sistema, como lo es una política de inventario derivada de un sistema de producción, ya que ayuda a identificar los parámetros más críticos como son demandas, cantidades de productos necesarias para producir o almacenar, nivel de servicio, tamaño del inventario.

Mediante la realización de este trabajo se comprobó lo útil que es la simulación para validar si una política de inventario mejora el servicio al cliente, en este caso se validó que una política de revisión periódica permite alcanzar un nivel de servicio del 82 % al mismo tiempo que se mejoran sus cantidades de inventario almacenadas tanto de producto terminado como de materia prima, lo cual beneficia no solo económicamente a la empresa sino también su servicio al cliente.

Este trabajo muestra una aplicación de métodos cuantitativos como herramienta para la solución de problemas reales y apoyo en la toma de decisiones del personal dedicado a este tipo de actividades de las áreas involucradas.

Referencias

- [1] R. H. Ballou, "Logística Administración de la Cadena de Suministro", 5a ed. Mc Graw Hill. 2004.
- [2] E. de Leo, D. Aranda, y A. Addati Gastón, "Introducción a la Dinamica de Sistemas," vol. 4575, Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (UCEMA), Buenos Aires, 2020. <https://www.econstor.eu/handle/10419/238364>
- [3] D. A. Agudelo Serna y Y. M. López Rivera, "Dinámica de sistemas en la gestión de inventarios". Ing. USBMed, vol. 9, no. 1, pp. 75–85, 2018, doi: 10.21500/20275846.3305.

- [4] S. Jaén, "Ayudas para la elaboración de diagramas causales". Aprende en Línea, Universidad de Antioquia, 2017.
- [5] M. Xu, "Modelos de gestión de existencias de una empresa a través de dinámica de sistemas", Perú: Universidad de Jaén, pp. 1–82, 2014.
- [6] X. Canaleta, "Estudio desde el punto de vista de teoría de sistemas del modelo de Wilson para la gestión de inventarios". Enginyeria i Arquitectura La Salle Universitat Ramon Llull, Barcelona, España. 2018
- [7] R. M. Chavez Guillén, "Dinamica de sistemas", Diagramas causales, pp. 1–49, 2010, [Online]. Available: http://www.educaunica.galeon.com/cursos/silabo_diapositiva/Causal.pdf.
- [8] A. M. Paredes Rodríguez y J. C. Osorio Gómez, "Simulación dinámica de una política de inventario R, S en una cadena de suministro de artículos ferreteros", Rev. Ing. Univ. Medellín, vol. 20, no. 39, pp. 185–211, 2021, doi: 10.22395/rium.v20n39a11.
- [9] E. Alonso et al., "Escenarios en la Cadena de Suministro de una empresa de envases de plástico", No, vol. 20, no. 1, pp. 510–538, 2018.
- [10] R. E. Walpole, R. H. Myers, y S. L. Myers, "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias". Novena Edición. Editorial Pearson. 2012.
- [11] Silver, E. A., Pyke, D. F., & Thomas, D. J., "Inventory and Production Management in Supply Chains". Fourth Edi, Editorial Wiley. 2017
- [12] R. . Ramirez. A, Fernandez J. "Análisis de la toma de decisiones en el manejo de inventarios utilizando dinámica de sistemas". X Congreso Latinoam. Din. Sist., pp. 1–49, 2012.

Capítulo 9

Comparación de modelos de programación para localización de instalaciones logísticas: P-mediana y modelos de cobertura

Agustín Bustos Rosales, José Alejandro Ascencio Laguna, Alma Rosa Zamora Domínguez, José Alfonso Balbuena Cruz, Lourdes Loza Hernández

Resumen—Los problemas de localización de instalaciones se aplican a una amplia gama de situaciones, generalmente relacionados con la toma de decisiones estratégicas, ya que consideran niveles importantes de inversión por lo que cualquier cambio implica niveles de costo altos para una organización. En el presente estudio se retoman las experiencias a partir de aplicaciones del modelo P-mediana como un método que busca optimizar costos totales de transporte y modelos usados para resolver problemas de decisión de distinta índole como puede ser brindar un nivel de servicio aceptable a los usuarios potenciales por medio de un modelo de cobertura. El primer caso consistió en una terminal intermodal en el estado de Puebla, el área de influencia de la terminal comprendía varios municipios cercanos al área metropolitana de la ciudad de Puebla. El objetivo era encontrar la ubicación que minimizara el costo total de distribución de la carga potencial de la zona. El segundo ejercicio se refiere a localización de instalaciones de salud. Al ser servicios de primera necesidad social, en la que se busca la mejor accesibilidad para la población que se busca atender, se empleó un modelo de cobertura máxima para lograr abarcar a la mayor población posible dadas limitaciones presupuestales para abrir un número determinado de instalaciones. Esos problemas requirieron de un enfoque diferente, por lo que se tuvo que decidir qué modelo de localización de instalaciones sería el más adecuado, surgiendo la necesidad de identificar las implicaciones de usar un modelo diferente para cada familia de aplicaciones. Se hace una reflexión respecto a usar el enfoque de optimizar costos cuando se busca mejorar el nivel de servicio y al contrario, usar el modelo de cobertura cuando se busca minimizar costos. Con lo que se

enfatisa la importancia de seleccionar el enfoque adecuado dependiendo del problema que se busca resolver.

Palabras Clave—localización de instalaciones; costo de transporte; tiempo máximo de recorrido; p-mediana; cobertura máxima

Introducción

Los problemas de localización de instalaciones consideran la situación en que se debe ubicar una instalación, o bien, un cierto número de instalaciones. La selección de la ubicación se realiza a partir de un conjunto predeterminado de ubicaciones potenciales para dar servicio a un conjunto de clientes. La selección de ubicaciones se realiza de tal manera que se optimice un criterio o un conjunto de criterios dados.

El problema de localización de instalaciones se relaciona con la toma de decisiones estratégicas en las que se consideran niveles considerables de inversión. Por ejemplo, el ubicar un hospital en un lugar incorrecto implica costos muy elevados no solo para los inversionistas, sino también para todos aquellos que tengan relación con él, como puede ser el caso de trabajadores, usuarios y proveedores.

Los problemas de localización de instalaciones se aplican a una amplia gama de situaciones, generalmente relacionados con la toma de decisiones estratégicas, ya que consideran niveles importantes de inversión por lo que cualquier cambio implica niveles de costo altos para una organización.

El presente trabajo muestra dos casos en los que se indica la ubicación óptima de distintas instalaciones, como son:

- Localización de centro intermodal de distribución. Este estudio fue realizado para el gobierno del Estado de Puebla. El objetivo era encontrar la mejor ubicación de una terminal intermodal de tal manera que, una vez cubiertos criterios mínimos de aceptación, se minimizaran los costos totales de transporte, para lo que se usó el modelo de P-mediana.
- Localización de instalaciones de salud. Este estudio se realizó para un municipio de alta marginación en el estado de Querétaro. El objetivo fue encontrar la mejor ubicación de nuevas instalaciones de salud que permitieran brindar un nivel de servicio aceptable a la población. Para esto, se usó el modelo de cobertura máxima.

En ambos estudios, al tener un enfoque diferente, se tuvo que decidir qué modelo de localización de instalaciones sería el más adecuado.

La forma en que se presenta el estudio es la siguiente. En el segundo capítulo se presentan los modelos de localización-asignación más usados en la actualidad. En el tercer se muestran algunas de las principales aplicaciones para dichos modelos. Finalmente, se hace una com-

paración de solución bajo los enfoques distintos que motivan a los modelos de localización.

Modelos de localización

Los problemas de localización buscan encontrar la o las mejores ubicaciones para instalaciones como almacenes, centros de distribución, centros de producción, estaciones de emergencia (como estaciones de bomberos u hospitales), puertos, etc. En situaciones referentes a centros de producción, distribución, almacenes, entre otras que generan valor logístico, se busca atender la demanda de mercancías de tal manera que el costo total de la cadena de suministro (adquisición, producción y distribución) sea mínimo.

Por otro lado, en instalaciones donde se prestan servicios básicos como centros de salud, escuelas, mercados, entre otros, la demanda a satisfacer está formada por la población que potencialmente pudiera requerir de los servicios ofrecidos en dichas instalaciones. En [1] se encontró que las personas buscan cercanía hacia los servicios básicos, por lo que si existen dos o más centros que pudieran ofrecerles un mismo servicio, optarán por aquél al que puedan llegar al menor costo (no necesariamente monetario). Esta situación se acentúa en los problemas de localización de instalaciones de emergencia a gran escala, en la que una persona puede no ser atendida inmediatamente si su instalación designada más cercana está ocupada atendiendo otras solicitudes. En estos casos una alternativa sería crear una cola para las demandas y servir las cuando su instalación más cercana esté disponible. Sin embargo, en estas situaciones, la espera por el servicio en un hospital saturado o la diferencia entre asistir a un centro más lejano puede resultar en riesgo de muerte, por lo que los minutos de diferencia en los tiempos de llegada es crucial. Esto plantea la necesidad de desarrollar modelos de localización de cobertura que permitan cubrir la demanda con varias instalaciones para que una persona que lo requiera pueda ser atendida lo más pronto posible.

En la literatura existen varios documentos como [2, 3, 4, 5, 6, 7] que analizan problemas de localización y técnicas de solución. La investigación sobre los problemas de localización se centra principalmente en dos tipos de modelo de los que se derivan los demás: los problemas de p -mediana (p -MP) y los problemas de cobertura. Los problemas de cobertura pueden clasificarse como problemas de cobertura de conjuntos (SCP) y problemas de localización de cobertura máxima (MCLP).

El p -MP tiene como objetivo encontrar las ubicaciones de p instalaciones entre n ubicaciones candidatas de tal manera que la distancia total ponderada entre todas las demandas y sus instalaciones más cercanas se minimice. Este tipo de modelos es ampliamente utilizado para ubicar plantas, fábricas, almacenes o estaciones de emergencia para atender/satisfacer la demanda de otras plantas, almacenes o locaciones de incidentes. La popularidad de su uso se debe a que garantiza obtener el mínimo costo total de distribución.

Por otro lado, para el problema de cobertura, más que minimizar el costo total de distribución, se busca la oportunidad de respuesta a la demanda. Dicha oportunidad en la atención se busca ya sea atendiendo la mayor cantidad de demanda (cobertura máxima) con un número determinado de instalaciones o bien, buscar tener el menor número de instalaciones para atender una demanda predeterminada (cobertura de conjuntos).

En ambos casos, el problema de localización de cobertura tiene la limitante de un presupuesto designado. Para una red de abastecimiento, la localización de instalaciones está pensada para optimizar en función de distintos objetivos. El objetivo más buscado es el que se trata de maximizar la utilidad después de impuestos. Sin embargo, para efectos de simplicidad, se puede suponer que toda la demanda debe satisfacerse olvidando los impuestos sobre las utilidades.

Los principales modelos que caen en el enfoque de priorizar el costo total mínimo son:

- Modelo gravitacional
- Modelo p-mediana.

Ambos modelos buscan obtener el mínimo costo, la principal diferencia entre ellos es que el modelo gravitacional se basa en localizaciones en un plano cartesiano XY y la ubicación se estima a partir de la media ponderada de los puntos X y Y de cada cliente; mientras que en el modelo p-mediana se identifican las ubicaciones candidatas para localizar en ellas un número p de centros de distribución, para posteriormente estimar para cada una de ellas los costos totales de distribución y, finalmente, seleccionar aquellas que permitan tener el mínimo costo total.

Sin embargo, en aplicaciones en donde la distribución no corre a cargo de la empresa, sino que el usuario es quien se traslada para satisfacer sus necesidades, lo más importante es que el usuario no incurra en costos excesivos. Los modelos característicos para este enfoque al usuario son los siguientes:

- Modelo p-centro
- Modelo de cobertura de conjunto
- Modelo de cobertura máxima

En estos tres modelos se busca que el costo (que puede ser medido también en unidades de tiempo o distancia) en que incurre el cliente cumpla con alguna condición especial. De acuerdo con esa condición es que se pueden diferenciar dichos modelos y ver en qué condiciones es más pertinente su aplicación.

- En el modelo p-centro se busca que el usuario que tenga que costear el mayor costo (o recorrer más distancia o tiempo), pague en el menor costo posible, de ahí que se conozca también como criterio minimax.

- En el modelo de cobertura de conjunto, el objetivo es cubrir a la totalidad de usuarios. Se basa en una matriz de alcanzabilidad que indica qué cliente pudiera ser atendido por un punto candidato a centro de atención. A partir de esta matriz se desarrolla el modelo de costo para identificar la ubicación de las instalaciones. Cabe mencionar que la matriz de factibilidad puede estar conformada a partir de un umbral de costo, pero se pueden agregar criterios que indiquen si un candidato puede o no atender a un cliente en particular.
- En el modelo de cobertura máxima, se parte de un número p de centros de atención candidatos y con un umbral de costo (distancia o tiempo) del que los usuarios no deben sobrepasar. Una característica es que, con ese umbral, puede darse el caso que, para un número determinado de instalaciones, no todos los clientes sean atendidos, por lo que los centros serán ubicados de tal manera que se atienda a la mayor cantidad de usuarios posible.

Aplicaciones con enfoque contradictorio

Como es de esperarse, al buscar la mejor ubicación para una aplicación empresarial o de una cadena de suministro completa, minimizar el costo total de distribución es el enfoque más adecuado, pero puede haber otros criterios en función de las necesidades que se buscan satisfacer. En las aplicaciones consideradas se usó el modelo de P-mediana para minimizar el costo, mientras que la otra aplicación cuyo objetivo fue el de no sobrepasar una distancia o tiempo máximo de recorrido por parte de los usuarios, el modelo usado fue el de cobertura máxima. Cabe mencionar que éste segundo modelo puede resultar en mayores costos por construcción de instalaciones y de traslado en sentido inverso.

Aplicación de modelo con enfoque al nivel de costo

Esta aplicación se desarrolló en [8] y se centró en el análisis de una terminal de transporte multimodal como actividad inicial del nodo que opere como un factor de atracción de demanda de servicios logísticos conexos, los cuales, a su vez, actuarían como aliciente adicional para la detonación de actividad de la zona.

El objetivo es estimar los flujos y el número de servicios multimodales potenciales (contenedor en ferrocarril), a partir de los flujos de movimiento de carga observados en el autotransporte.

Para realizar lo anterior se utilizó el método localización por p -mediana, el cual busca minimizar el costo total de transporte. Para poder aplicar este método se discriminaron municipios de acuerdo con los siguientes criterios:

- Disponibilidad de servicios ferroviarios por municipio en Puebla
- Existencia de carga potencial en municipios de Puebla y Tlaxcala
- Ubicación de grandes empresas industriales y comerciales por municipio en Puebla y Tlaxcala.

Esta discriminación de municipios se hizo a partir de las bases de datos del Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional [9] que en su momento realizaba la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SICT). Esto permitió identificar las ubicaciones candidatas para la localización de la terminal intermodal.

El objetivo es estimar los flujos y el número de servicios multimodales potenciales (contenedor en ferrocarril), a partir de los flujos de movimiento de carga observados en el autotransporte.

Una vez que se conoce la ubicación de los puntos de origen y destino antes mencionados, el siguiente paso consiste en encontrar una localización central que minimice el Costo Total de Transporte (CTT), éste se supone proporcional a la distancia recorrida y al volumen o peso de los materiales trasladados hacia o desde la instalación, por lo que puede expresarse, como:

$$CTT = c_i v_i d_i \quad (1)$$

Donde:

- c_i es el costo unitario de transporte correspondiente al punto i (éste puede diferir o no con el tipo de material)
- v_i es el volumen o peso de los materiales movidos desde o hacia i y
- d_i es la distancia entre el punto i y el lugar donde se encuentra la instalación.

Para calcular el costo total de transporte fue necesario estimar las cantidades movidas entre cada punto y cada una de las posibles ubicaciones de terminales durante un año. El producto $c_i v_i$ constituye el peso w_i , o importancia que cada punto i , tiene en el emplazamiento de la instalación, de forma que a mayor peso w_i más cercana se habrá de encontrar la instalación del punto correspondiente.

Cabe mencionar que debido a que se considera que la terminal movería carga contenerizada, se esperaría que el costo por tonelada – kilómetro fuera el mismo, independientemente del tipo de mercancía a transportar, el origen o destino de la carga y ubicación de la terminal multimodal. Es por esto que la ecuación utilizada para la selección de la mejor ubicación se simplificó de la siguiente manera:

$$CTT = v_i d_i \quad (2)$$

Debido a que la totalidad de carga potencial debería ser movida desde la terminal hacia el destino final (o en sentido contrario) independientemente del lugar en que la terminal sea instalada, ésta tenderá a acercarse a la opción (municipio) que genere más carga, de tal manera que las distancias en que esta carga tenga que ser movida, se minimice.

Así, con esta ecuación, la selección de la mejor ubicación de la terminal multimodal a nivel municipal para el estado de Puebla queda definida bajo el criterio de la menor cantidad de toneladas – kilómetro movida.

Para medir las distancias se utilizó el software ArcView, el cual es un sistema de información geográfica que permite obtener distancias existentes entre dos puntos georeferenciados. Esta aplicación muestra las distancias euclidianas entre las posibles ubicaciones de las terminales (para lo que se empleó el criterio de existencia de infraestructura ferroviaria) y los puntos generadores de carga en Puebla y Tlaxcala (de acuerdo con los criterios de potencial de carga y empresas grandes registradas).

En la Tabla I se muestran aquellos municipios que cumplieron con los criterios previamente establecidos, ordenados de acuerdo con la cantidad de toneladas –kilómetro movida, la que a su vez nos permite jerarquizar dichos municipios de acuerdo con el método de centro de gravedad.

Una vez que se identificaron las ubicaciones potenciales, la demanda de los centros de consumo y las distancias entre cada uno de ellos, el siguiente paso fue identificar el costo total de distribución correspondiente a cada candidato, para seleccionar la ubicación que ofreciera el costo mínimo.

Con respecto a la ubicación de la terminal en cuestión, de acuerdo con los resultados en el estudio, se recomienda que ésta se realice en el municipio de Puebla, debido a la gran concentración de carga potencial y de empresas grandes, la cual minimizaría el movimiento de carga en autotransporte, con sus respectivas disminuciones en el costo de transporte. De no ser posible la instalación de la terminal dentro del municipio de Puebla, es recomendable ubicar la terminal en los municipios adyacentes como pueden ser, en orden de conveniencia: Coronango, Cuautlancingo, Cholula o Amozoc.

Tabla 1. Jerarquización por costo menor de posibles ubicaciones para instalar una terminal intermodal

Ubicación	Jerarquía	Costo en proporción sobre jerarquía 1
Puebla	1	1
Coronango	2	1.4
Cuautlancingo	3	1.41
San Andrés Cholula	4	1.45
Amozoc	5	1.65
Huejotzingo	6	1.93
San Jerónimo Tecuanipan	7	2.01
Cuautinchán	8	2.14
San Martín Texmelucan	9	2.33
Tepeaca	10	2.38

Aplicación de modelo con enfoque al nivel de servicio

Con base en la jerarquización de los problemas prioritarios obtenidos a partir de la metodología PIAR [1, 10, 11, 12] se identificó que los servicios preferentes a los que hay que resolver sus problemas de acceso en la microrregión de San Ildefonso Tultepec son: la salud, el transporte y la educación, los cuales en conjunto agrupan el 81% de los problemas de acceso. Particularmente, el servicio de salud acumula el 54% del total de los problemas de acceso mencionados por los informantes clave; en segundo lugar, es el transporte con el 15%, y como tercer sector prioritario se tiene a la educación con el 12% del total. Los demás problemas de acceso se distribuyen en los servicios relacionados con el agua potable, cuestiones administrativas, venta de artesanías (tener un mercado) y, por último, el acceso a mercados, carreteras y drenaje.

Con el perfil de acceso obtenido anteriormente, se generaron mapas de la cobertura del servicio de salud, para tener con mayor claridad qué instalaciones de salud deben ser mejoradas en el problema de acceso de falta de personal médico calificado y de medicinas.

Las instalaciones de salud más utilizadas son el Centro de Salud de Amealco y el Centro de Salud conocido popularmente como “La Ermita”. El hecho de que se tengan limitantes con el personal médico y las medicinas ocasiona que la cobertura de dichas instalaciones de salud en la microrregión sea como se muestra en la figura 1.

Por lo tanto, se puede concluir que las familias rurales de la microrregión buscan la atención de salud en la instalación más equipada o donde pueden recibir dicha atención,



Figura 2. Red de trabajo para la zona de estudio

Para efectos de impedancia se consideró la longitud de los diversos tramos carreteros que componen la red de caminos.

De acuerdo con [9] se estableció que los tiempos meta a instalaciones de salud son de 60 minutos a pie si es una casa de salud, o de 30 minutos en vehículo para el caso de un centro de salud. Con base en esto se considera una impedancia conservadora de 5 kilómetros, que es un poco mayor a la distancia promedio que se espera camine una persona en una hora (4 km/h).

Cabe mencionar que se considera una velocidad un poco mayor para poder subsanar la deficiencia relativa a los caminos establecidos en la Red Nacional de Caminos IMT-INEGI, la cual no incluye el conjunto de brechas por las que la gente suele caminar para hacer más corto su trayecto.

En el Informe de Planificación Integral aplicado en [6], se muestra que las instalaciones de salud más utilizadas son el Centro de Salud de Amealco y el Centro de Salud conocido popularmente como “La Ermita”.

El hecho de que se tengan limitantes con el personal médico y las medicinas ocasiona que la cobertura de dichas instalaciones de salud sea insuficiente, esto aunado a la distribución y frecuencia de las rutas de transporte, las cuales están basadas en la cabecera municipal y no en la comunidad de San Ildefonso Tultepec, por lo que desde muchas localidades es necesario realizar transbordos.

De contar con un sistema de transporte con frecuencias suficientes o con una coordinación adecuada, se podría abarcar una mayor cobertura en tiempo o distancia, para ejemplificar esto, se modificó la impedancia de 5 km a 10 km. Con esta distancia es posible que todas las comunidades estuvieran dentro del tiempo meta, para lo cual la ubicación con el menor costo por distancia sería precisamente la instalación actual de “La Ermita”.

Esto nos dice que “La Ermita” está situada en una posición estratégica dentro de la región de San Ildefonso, como se puede apreciar en la figura 3.



Figura 3. Ubicación ideal para una impedancia de 10 km en “La Ermita”

Sin embargo, el diseño de rutas de transporte, que conecta a las comunidades con la cabecera municipal y no necesariamente con la población de San Ildefonso, hace necesario el transbordo de unidades, lo que representa un doble tiempo de espera de unidades de transporte, esto aunado al tiempo que se invierte en caminar desde los hogares hasta alguna parada de transporte. Por esta razón, además de que se espera una velocidad media de entre 4 y 5 km/h, el umbral considerado de tiempo a partir del hogar más lejano hacia algún centro de atención médica se redujo a 5,000 metros.

Con este nuevo umbral de distancia, podemos observar que contar con solamente una instalación para muchas comunidades provocaría que numerosas comunidades quedarán fuera de su área de influencia. Para ese umbral de distancia la ubicación idónea quedaría en la comunidad de Loma de los Blases, por lo que se puede considerar que el centro de salud ya instalado en San Ildefonso Tultepec está bien situado dada su cercanía con dicha población.

En la figura 4 se ve una propuesta de cuatro centros para el mismo umbral de 5 km. Con esta configuración se podría dar atención a la totalidad de las comunidades, por lo que ésta sería la más recomendable.



Figura 4. Ubicación ideal para una impedancia de 5 km y cuatro centros de servicios de salud

Solución esperada con otro modelo

A manera de sensibilizar sobre la selección de que modelo es más adecuado para un determinado tipo de problema, se considera la solución al mismo usando enfoques diferentes para identificar cambios presentados respecto al óptimo de cada enfoque.

Enfoque social en lugar de minimizar costos

Al buscar la mejor ubicación con un modelo que no busque minimizar el costo total, se puede ejemplificar el resultado esperado con un modelo de cobertura de conjuntos o de cobertura máxima.

Si tomamos en cuenta que la ciudad de Tehuacán es la más alejada del centro de distribución propuesto por el modelo de p-mediana, que estaría ubicado en la ciudad de Puebla.

En la figura 5 que se muestra a continuación, se observa que la distancia entre Puebla y Tehuacán es de casi 130 Km. Con esto, un umbral de distancia máxima a recorrer para atender a los clientes que fuera menor a ésta, la solución tendría que moverse a otros municipios como Amozoc o Cuautinchan, los cuales están a una distancia de alrededor de 110 Km. En la Tabla 3.1 se muestra que el costo total de transporte saldría 1.65 veces más caro si se sitúa en Amozoc y más del doble si se va a Cuautinchan, por lo que la solución ahora sería en Amozoc.

En caso de que se usara una distancia de recorrido menor a 100 Km como umbral, ni Amozoc ni Cuautinchan, que de la Tabla mencionada son las dos ciudades más cercanas a Tehuacán, podrían atender a clientes de esta última ciudad, lo que haría necesario abrir un nuevo centro de distribución que cumpliera con esta restricción de distancia máxima de recorrido.

Al abrir un nuevo centro de distribución, el costo total de distribución se vería afectado por dos situaciones:

1. El costo total de transporte disminuiría al tener menores distancias a recorrer.
2. El costo de instalación y operación de terminales aumentaría puesto que ahora serían dos centros de distribución en lugar de uno.

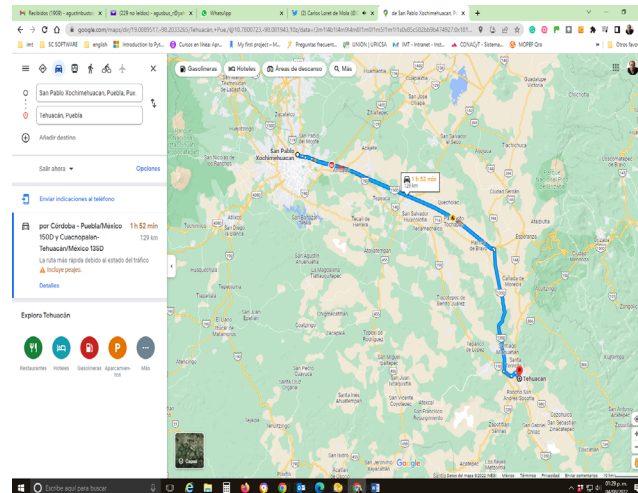


Figura 5. Ruta Puebla – Tehuacán

Enfoque financiero sobre enfoque social

Estos modelos dan como resultado la mejor ubicación para una instalación que se planea usar y, una vez que se han identificado las ubicaciones idóneas, se da un proceso de asignación, el cual generalmente se realiza con un criterio de minimizar los costos de los arcos.

Con esta filosofía, es de esperarse que si se buscara minimizar los costos de transporte para que los usuarios lleguen a las instalaciones de salud, el resultado sería el de ubicar un centro de salud en cada comunidad, lo cual en la mayoría de las ocasiones (como en el caso de ejemplo) es imposible, debido a restricciones presupuestales.

Sin embargo, si se usara el modelo de minimización de costo de P-mediana con un solo centro de atención, el resultado de la ubicación mostrada en la figura 2, tiene como ventajas un menor costo de instalaciones y un menor costo total de transporte a partir de una sola instalación. Sin embargo, la desventaja principal es que los usuarios más alejados tienen que recorrer grandes distancias, las cuales no son razonables para el tipo de servicio prestado por el esfuerzo económico y de tiempo requeridos.

Conclusiones

En el presente estudio se presentaron algunos de los principales métodos usados para la localización de instalaciones. Estos problemas son conocidos como de localización-asignación puesto que indican el mejor lugar para localizar instalaciones además de que asignan a que usuarios deben atender dichas instalaciones. Se encontró que los distintos métodos se pueden clasificar en función del objetivo que buscan cumplir:

- Métodos que buscan obtener el menor costo total.
- Métodos que buscan mejorar el nivel de servicio.

Se tomó un modelo de cada tipo, el modelo de P-mediana y el de cobertura máxima, respectivamente.

Se encontró que los métodos que buscan optimizar (minimizar) el costo total son ideales para encontrar la mejor ubicación de instalaciones logísticas como terminales intermodales, centros de distribución de producto terminado o de insumos, etc.

Por otro lado, los de cobertura de conjuntos sirven más para centros de atención de distintos servicios, como pudieran ser centros de salud, centros educativos, centros de atención de emergencia, etc., por lo que son de gran aplicabilidad en logística humanitaria.

El usar métodos distintos puede provocar que se tengan ubicaciones que no necesariamente ofrezcan el menor costo total de distribución o que no cumplan con el nivel de servicio requerido.

Referencias

- [15] A. Balbuena, A. Bustos, A. Zamora, A. Ascencio. El Transporte rural en los municipios más pobres de México. [Publicación técnica 442]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2015.
- [16] <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt442.pdf> M. Karatas, N. Razi, N. & H. Tozan. "A Comparison of p-median and Maximal Coverage Location Models with Q-coverage Requirement". Procedia Engineering. 149. pp. 169-176. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.652>
- [17] P. Murali, F. Ordoñez, & M. Dessouky. "Facility location under demand uncertainty: Response to a large-scale bio-terror attack". Socio-Economic Planning Sciences, 46(1), pp. 78-87. 2012.
<https://ideas.repec.org/a/eee/soceps/v46y2012i1p78-87.html>
- [18] A. Antunes. "Location Analysis Helps Manage Solid Waste in Central Portugal". Interfaces, 29(4), pp. 32-43. 1999.
<http://www.jstor.org/stable/25062502>
- [19] J. Berry, W. Hart, C. Phillips, J. Uber, & J. Watson. "Sensor placement in municipal water net-

- works with temporal integer programming models". *Journal of water resources planning and management*, 132(4), 218-224. 2006. <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282006%29132%3A4%28218%29>
- [20] C.S. ReVelle, H.A. Eiselt, Location analysis: A synthesis and survey, *European Journal of Operational Research*, Volume 165, Issue 1, 2005, Pages 1-19, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.032>.
 - [21] Meskarian R, Penn ML, Williams S, Monks T A facility location model for analysis of current and future demand for sexual health services. *PLoS ONE* 12(8). 2017 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183942>
 - [22] C. Martner, C. Morales, A. Herrera, A. Bustos. Demanda potencial de servicios multimodales para un nodo multimodal del estado de Puebla. [Informe de investigación]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2006.
 - [23] Gutiérrez, J.L., Soria, J. Casanova, W. Estudio estadístico de campo, del autotransporte nacional. Documento técnico 81. Insituto Mexicano del Transporte. 2020.
 - [24] A. Balbuena, A. Bustos, A. Zamora, A. Ascencio. Planificación Integral del Acceso Rural. Estudio piloto en la microrregión de San Ildefonso Tultepec, Amealco, Querétaro. [Informe de investigación]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2016.
 - [25] A. Balbuena, A. Ascencio. Planificación Integral del Acceso Rural. Zona norte del municipio de Amealco. [Informe de investigación]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2016.
 - [26] A. Bustos, A. Balbuena, A. Zamora, A. Ascencio. Modelo de cobertura en los servicios de salud en la microrregión de San Ildefonso Tultepec, Amealco. [Informe de investigación]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2016.

Capítulo 10

Diseño de modelos de inventario para una empresa productora de arneses en la región sur de Sonora, México

Ernesto Alonso Vega Telles, Alfredo Bueno Solano, María del Pilar Lizardi
Duarte, Berenice Patrón Arayo

Resumen—La empresa bajo estudio. es una empresa de nivel internacional que se dedica a la fabricación de arneses, para lo cual requiere materia prima; constantemente se enfrenta al problema relacionado con la carencia de materiales para cubrir la producción semanal, o bien en otros casos el material se tiene en exceso lo que genera altos costos de inventario y falta de espacio en el mismo. Por ello se llevó a cabo la presente investigación con el objetivo de diseñar un modelo de inventario enfocado en los productos con mayor impacto de la empresa, con el fin de mantener un nivel de inventario óptimo y lograr así mejorar el control de la materia prima evitando problemas por desabasto o sobre inventario de esta. La metodología implementada fue la establecida por Causado (2015) así como el uso de herramientas de soporte como el software SAP ERP 2016 y Excel 2013. Por medio de SAP fue que se obtuvo el listado de productos relevantes para la empresa en términos de costos y demanda, y de cada uno de ellos se realizaron los cálculos pertinentes con el diseño de un modelo de inventarios (cálculo de cantidad económica de pedido, inventario de seguridad, punto de reorden, costos totales), obteniendo como resultado una propuesta para mantener un nivel de inventario óptimo.

Palabras Clave—Inventario; política de inventario; almacén; modelo de inventarios

Introducción

El automóvil se precisa como un transporte con motor implementado generalmente para el traslado de personas o mercancías [1]. Donde con la llegada del auto, aparece a su vez la industria automotriz, la cual está compuesta por diversas empresas dedicadas a pro-

ducir y comercializar vehículos terrestres de autopropulsión entre los que se encuentran los automóviles de pasajeros, autobuses, camiones, equipos agrícolas y otros vehículos comerciales [2]. Por lo tanto, es una industria que requiere de una gran cantidad de personal, por lo que genera prosperidad económica y trabajo en las diversas regiones donde esta se posicione.

En el año 2012 la producción automotriz a nivel mundial superó los 84 millones de vehículos incluyendo furgonetas, camiones y autobuses. De esta forma este sector ocupa a alrededor de 9 millones de trabajadores y generó 50 millones de puestos de trabajo incluyendo los indirectos. En general, se calcula que el valor de la producción de esta industria equivale a una sexta economía mundial [3].

A nivel global, la industria automotriz tiene un gran impacto en la economía. México es uno de los países en los que dicha industria se volvió clave para su desarrollo. El sector genera más de 960 mil empleos, de los cuales alrededor de 100 mil corresponden a la industria automotriz terminal y un poco más de 860 mil al sector de autopartes, carrocerías y remolques. Esto se refleja en que más de 3.5 millones de mexicanos son beneficiados directamente por la industria automotriz [4].

En Sonora se encuentra el clúster automotriz más grande de América para la región Asia-Pacífico. El cual se destaca por estar conformado por más de 80 empresas, entre ellas Ford, HBPO, Continental, Delphi, IGB, Benteler, Magna, Gear, Faurecia, ITT Industries, entre otras, las cuales generan alrededor 60 mil empleos directos y se producen aproximadamente 440 mil vehículos al año, de los cuales el 88 por ciento eran Ford Fusion y el resto Lincoln MKZ, teniendo como mercado principal a los Estados Unidos, Brasil, Corea del Sur y China [5].

La industria automotriz llegó a Sonora posicionándose fuertemente, ya que así como hay empresas que fabrican automóviles de igual forma hay empresas que fabrican sus partes o componentes. Por lo que, Sonora cuenta con empresas dedicadas a la elaboración de arneses; dentro de las que se encuentran Prestolite de México y PKC Group de México en Nogales, y Grupo Yazaki S.A. de C.V. en San Luis Río Colorado, Navojoa, BÁCUM, Etchojoa, y Obregón. Prestolite se dedica a la manufactura de cables y arneses automotriz industrial, y PKC Group diseña, manufactura e integra sistemas eléctricos de distribución, electrónicos y componentes para la industria automotriz.

La empresa bajo estudio es uno de los proveedores de arneses más importantes en todo el mundo, fabricando arneses para marcas de automóviles destacadas como: Ford, Honda, Mazda, Toyota, Kia, Volvo, Volkswagen, Chrysler, Nissan, Jaguar, entre otros. Llegó a México en el año 1982, iniciando operaciones en Cd. Juárez, Chihuahua, México. Actualmente el grupo estableció plantas dentro del estado de Sonora, los clientes principales de esta región son FCA, FIAT Chrysler y Ford.

Para la fabricación de un arnés se requiere de una gran variedad de componentes, dentro

de los que se destacan principalmente cables, terminales, conectores, cintas, entre otros [6]. Para obtener la materia prima requerida para la elaboración del arnés se requiere de la gestión de proveedores, donde la forma de trabajar con ellos es con base en los requerimientos de producción de la organización, considerando los pedidos solicitados por los clientes.

Como cualquier organización, el grupo bajo cuenta con su cadena de suministro, esta comienza con los proveedores que mandan los insumos a través de un transportista. Este transportista se encarga de mover la materia prima hasta el almacén. El material en almacén se traslada a las plantas de producción donde se fabrica el arnés. Una vez terminado el arnés se empaqueta y se distribuye a los clientes. En la Figura 1 se presenta la cadena de suministro de la empresa bajo estudio.

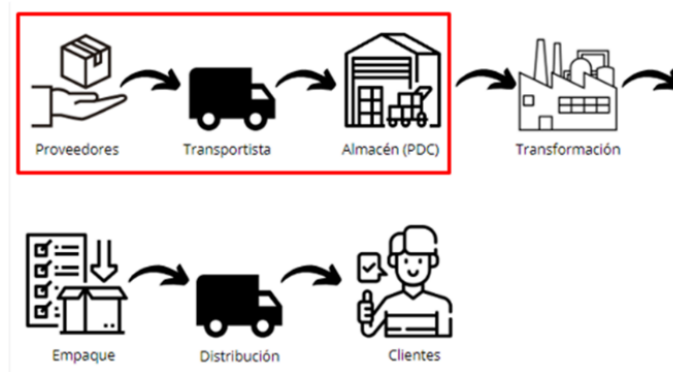


Figura 1. Cadena de suministro empresa bajo estudio. Fuente: Elaboración propia 2022.

En la Figura 1 se enmarcaron en color rojo los procesos de la cadena de suministro que tienen un impacto en el área bajo estudio y hacia dónde va enfocado el proyecto. Procura-
miento (expeditación) es un área con contacto directo con proveedores, ya que es el área encargada de pedir el material y dar seguimiento para que el proveedor emita la cantidad de componentes solicitados de acuerdo con el requerimiento de producción, además tiene contacto con tráfico para rastrear o monitorear donde se encuentra el material en tiempo y forma, así mismo se da seguimiento para asegurar que el producto solicitado se reciba en almacén, se descargue y se agregue al inventario.

La empresa cuenta con sus proveedores definidos, sin embargo, los materiales solicitados para la producción de los arneses van cambiando debido a que ciertos insumos se convierten en obsoletos o estos son sustituidos por otros de acuerdo a los modelos de arneses requeridos. Esta situación tiende a darse cada año en el mes de septiembre, ya que es cuando los clientes comienzan con la fabricación de los modelos del año siguiente. Por ejemplo, en septiembre del año 2022 comenzó el cambio de materia prima, dejando de lado los insumos utilizados en la producción de los arneses para los modelos de autos 2022, y se introducen los insumos requeridos para la fabricación de arneses correspon-
di-

entes a los modelos del año 2023. Si bien, todavía se elaboran arneses para modelos de autos de años pasados, hay algunos que salen del mercado y por ende se descontinúa la producción de dichos modelos.

Cabe mencionar que una de las principales deficiencias en la empresa bajo estudio, se relaciona con que esta no tiene definida la cantidad de pedido de insumos a solicitar a los proveedores, sino que el volumen de pedido suele variar cada semana en función a las solicitudes de producción, e incluso en ocasiones no coincide los requerimientos que marca el sistema a proveedor con los existentes de inventario físico en planta. Lo que propicia la presencia de altos volúmenes de materia prima en estado crítico.

Así mismo, un factor adicional a considerar es que cuentan con proveedores ubicados en diversas zonas geográficas del mundo, por lo que estos tienen definidos diferentes tiempos de entrega, llegando a tardar hasta dos meses entre la colocación de la solicitud de la orden y su recepción, además de los riesgos que se corren, como la pérdida de material, accidentes en tránsito, etc. Además de las situaciones que se pueden presentar durante la producción, como la sobreproducción, desperdicio de material, entre otras.

Dichas deficiencias se presentan a partir de que la cantidad de piezas a solicitar a los proveedores se genera de acuerdo con las necesidades de producción. Sin embargo, en diversas ocasiones no se consideran los riesgos mencionados anteriormente, y sólo se ordena lo que se necesita sin contar con un inventario de seguridad que permita mitigar los impactos negativos que puede generar la fluctuación de la demanda.

Derivado de la situación descrita anteriormente, la problemática a abordar fue la razón por la que la empresa carece de un modelo de inventarios, y esto ocurre en su Pacific Distribution Center y se presenta cuando se genera sobre inventario en ciertos insumos. Se sabe, debido a que constantemente se genera una necesidad de expedir material para que este llegue antes de que ocurra un paro producción en planta, lo que se traduciría en una reducción significativa en los ingresos de la organización. Basándose en esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿De qué manera se puede lograr que la empresa tenga un inventario óptimo, que le permita cubrir en su totalidad sus necesidades sin caer en faltante o sobre inventario?

Objetivo

Diseñar un modelo de inventario para los productos de mayor impacto de una empresa elaboradora de arneses en la región sur de Sonora, México, que permita eficientar los controles de inventarios de la materia prima y con ello evitar caer en faltantes o en la generación de sobre inventario.

Marco Metodológico

En el presente apartado, se presentan diversas metodologías referentes al desarrollo de modelos de inventarios, con la intención de compararlas entre sí y con base a ello definir la ruta metodológica a implementar en la presente investigación para el alcance del objetivo y resultados esperados. Para cada una de estas se describen los pasos que conlleva su correcta implementación.

En primer lugar, se estudió la metodología propuesta por Causado 2015, bajo el título “Modelo de inventarios para el control económico de pedidos en una empresa comercializadora de alimentos”, la cual consiste de seis pasos descritos a continuación según [7].

Recopilar la información: Como primer momento, se recolectan los datos necesarios del objeto en estudio, esto mediante la aplicación de diversas técnicas como la observación directa, consulta histórica de datos y desarrollo de entrevistas al personal involucrado.

Aplicar el método ABC: Con la finalidad de identificar los ítems a analizar, se procede a la aplicación del método ABC. Para ello se requiere organizar los productos de acuerdo a su valoración siendo este de mayor a menor porcentaje de valoración, determinando con ello el total acumulado de productos en estudio, así como el porcentaje de aportación de cada ítem al total acumulado. Categorizando como clasificación A, a los ítems de mayor importancia y por ende se seleccionan como objetos de estudio.

Calcular el tamaño de lote óptimo (EOQ): para cada producto en estudio: Considerando los artículos clasificación A, se procede calcular el tamaño de lote óptimo para lo cual se requiere determinar la demanda con la que cuenta cada uno de los productos, así como los costos asociados a la emisión de pedido y mantener en inventario.

Calcular el costo total del inventario: A partir del cálculo del tamaño óptimo de pedido por producto, se determinó el costo total de mantener el inventario al año, estando este conformado por los costos totales de ordenar y mantener en inventario.

Calcular el número óptimo de pedidos: Con el objetivo de identificar el número de emisiones de órdenes requeridas durante un año, se calculó el total de pedidos a realizar, tomando en cuenta tanto la demanda anual del producto como el tamaño del lote óptimo

Calcular el punto de reorden: como último paso del método se calculó el punto de reorden considerando el tiempo de entrega de cada proveedor y la demanda durante el tiempo de entrega de cada producto.

Una segunda metodología analizada fue la establecida por [8], utilizada para el diseño e implementación de un sistema de inventarios, aplicando la simulación Montecarlo. A continuación, se describen cada una de las fases que la conforman:

Analizar la situación actual de inventarios: En la fase inicial, se investigó sobre el manejo y gestión de inventarios de la empresa en estudio, siendo posible por medio de aplicación de entrevistas a los encargados de operaciones de inventarios.

Analizar la situación actual de la previsión: Aunado a la revisión actual de inventarios, se investigaron los métodos actuales para el proceso de aprovisionamiento.

Analizar la situación actual de planeación a corto y mediano plazo: Se indagó por medio de entrevistas el manejo del proceso de planeación a corto y mediano plazo en relación a las estrategias a implementar para el aprovisionamiento de los insumos requeridos.

Recopilar datos y variables importantes: Se identificaron las variables críticas que influyen en el control de inventario, además se recuperaron datos sobre cada una de estas.

Seleccionar el modelo de inventario: Tomando en cuenta la información recabada de las fases anteriores, se determinó el modelo de inventario adecuado, mediante reuniones con los ejecutivos de la empresa, considerando el modelo de inventario que más se ajuste a su realidad y se aplicaron criterios que apoyen el modelo seleccionado.

Simular el modelo seleccionado: Implementando el software Excel se diseñó el menú aplicativo, se crearon interfaces de captura de datos de pronósticos de productos, se crearon Tablas de cálculos de datos intermedios, así como Tablas dinámicas y se aplicaron macros para seleccionar cliente, generar pronósticos y con ello actualizar Tablas dinámicas.

Identificar ventajas y desventajas: Por último, la metodología finaliza identificando ventajas y desventajas del modelo de inventario aplicado, para lo cual se desarrollaron análisis de tipo cualitativo y cuantitativo mediante la simulación Montecarlo.

Por último, se estudia la metodología publicada por [9]. en el artículo denominado “Diseño de un sistema para la gestión de inventarios de las pymes en el sector alimentario”, la cual se encuentra conformada por los siguientes pasos.

Revisión bibliográfica: Se consultaron diversas fuentes de información bibliografía acerca del contexto y los retos que presentan las pymes con la aplicación de las TIC en la gestión de inventarios.

Recolección de datos: Se elaboró un cuestionario con el fin de recolectar las variables relevantes de la cadena de valor del inventario aplicando este a diversos puestos de trabajo como lo es gerencia, contabilidad y supervisión de producción de la empresa en estudio.

Revisión de datos: Se tabuló la información recolectada en las entrevistas y se verificó el nivel de inventario.

Pronóstico de la demanda: El pronóstico de demanda se calculó con el modelo de suavizamiento exponencial, que es la técnica de pronóstico más común y parte integral de casi todos los programas de pronóstico por computadora.

Aplicación del modelo EOQ: Se realizó el cálculo del EOQ para obtener la cantidad

óptima de pedidos a ordenar, así como del tiempo de ciclo y del punto de reorden.

Diseño y programación de Software: Se determinó un tipo de Software que permita gestionar la información con efectividad y administrar los datos de forma rápida, confiable, segura, en tiempo real y trazable; para que cada operador pueda tenerlo en su Smartphone y a través de este monitorear el inventario.

Resultados

En el presente apartado, se muestra evidencia de los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, el cual para su cumplimiento se implementó el procedimiento fundamentado en [7], siendo por medio de este que se obtiene el modelo de gestión de inventario para la empresa bajo estudio, dando con ello cumplimiento al objetivo y a su vez respuesta al planteamiento del problema abordado.

Para una mejor comprensión e interpretación del procedimiento implementado, se muestra la siguiente figura, en la cual se representan a manera de diagrama la secuencia de pasos que conforman al mismo.



Figura 2. Diagrama del método empleado para el desarrollo del proyecto.

Fuente: Elaboración propia 2022

Información recopilada de la empresa bajo estudio

En este primer paso del método, como resultado se generó una lista de los diferentes ítems utilizados en el proceso bajo estudio, identificando un total de 20 número de partes diferentes, para lo cual se muestra la siguiente Tabla de los mismos.

Tabla 1. Catálogo de productos

Núm. de parte	Nivel de servicio	Demanda anual
74359016	80%	227280

74598855	80%	226512
74359015	80%	224160
74599007	80%	237420
74597665	80%	235260
74593373	80%	217260
74593374	80%	216720
74359027	80%	230400
74593375	80%	214170
74599200	80%	224400
74358146	80%	164340
74599008	80%	232200
74597656	80%	231900
74593245	80%	163980
74597656	80%	231900
74599009	80%	223200
74599006	80%	231120
74598734	80%	233280

Fuente: elaboración propia, 2022

Como se puede observar en la Tabla anterior, es posible identificar una muestra representativa del total de los productos que conforman el catálogo de ítems en estudio. A su vez, para cada uno de estos se muestra información pertinente sobre el número de parte, así como el nivel de servicio estipulado por parte de la organización para cada componente siendo este del 80% en la mayoría de sus artículos y por último el detalle de requerimiento anual del componente, cabe mencionar que la demanda registrada es de carácter dependiente, ya que esta depende de los requerimientos de arneses solicitados por el cliente.

A su vez, es importante mencionar que la demanda considerada para efectos de la investigación es la correspondiente al año 2019, siendo esto por decisiones propias de la dirección puesto que los datos de requerimientos referentes al año 2020 y 2021 mostraban discrepancias derivadas de los efectos provocados por la pandemia COVID-19.

Análisis de la clasificación ABC

Tomando en consideración la información recopilada en el paso anterior, se procedió a realizar un análisis de clasificación ABC al total de ítems en estudio, con el propósito de identificar aquellos de mayor valor (importancia) para la organización. Para ello, se recabaron datos asociados al precio de adquisición de cada uno de los productos; Sin embargo, por efectos de políticas de confidencialidad con la empresa bajo estudio se omite dicha información

En la Tabla 2 se muestra a manera de resumen los resultados obtenidos de dicho análisis.

Tabla 2. Análisis de clasificación ABC

Zona	Total, de ítems	% de inversión	% acumulado
A	6	78.80%	78.80%
B	10	14.90%	93.7%
C	18	6.3%	100%
		100%	

Fuente: elaboración propia, 2022

De acuerdo con los resultados estipulados anteriormente, es posible observar que la zona de clasificación A, se encuentra conformada por un total de seis ítems, los cuales representa un 78.80% del total de la inversión en almacén, mientras que en relación a la categoría B y C, estas se conforman de 10 y 18 ítems respectivamente.

Una vez realizado el análisis de clasificación ABC e identificado los ítems de mayor importancia para la organización, en acuerdo con el planeador de compras y directivos de la organización, se consideraron estos como productos estratégicos para el diseño de los modelos de inventario encada uno de estos, mismos que se encuentran enlistados a continuación.

1. 74359016._ Subensamble L8640MM.
2. 74598855._ Arnés multimedia 928mm.
3. 74599007._ Arnés “airbag pigtail” FPB90-1Y.
4. 74597665._ Arnés de puente 5840mm.
5. 74359015._ Arnés de puente 6443mm.
6. 74593374._ Pretensor del retractor del conductor.

Para cada uno de estos, se procedió a recabar datos precisos relacionados con la descripción de cada componente, proveedor, nivel de servicio, costo de ordenar, costo de mantener y estándar. Con dicha información se desarrollaron fichas técnicas pertinentes a cada ítem tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Ficha Técnica ítem 74359016

Número de parte: 74359016			
Descripción: Subensamble L8640MM.			
Proveedor: Aptiv International Operations			
Nivel de servicio	Costo de ordenar (USD)	Costo de mantener en inventario (USD)	Std. Pack.
80%	\$3.58	\$0.97	100

Fuente: elaboración propia, 2022

En relación al ítem 74359016, este pertenece a un subensamble L8640MM, el cual es suministrado por la empresa Aptiv International Operations, y registra costos por emisión de orden de \$3.58 dólares y \$0.97 dólares por mantener en inventario, a su vez tiene registrado un número estándar de paquete de 100 unidades, haciendo referencia al tamaño de lote que maneja el proveedor para el surtimiento de requisiciones.

Mientras que para el caso del componente 74598855/Arnés multimedia 928 mm sus datos se registran en la ficha técnica en la Tabla 4:

Tabla 4. Ficha Técnica ítem 74598855

Número de parte: 74598855			
Descripción: Arnés multimedia 928 mm.			
Proveedor: Aptiv International Operations			
Nivel de servicio	Costo de ordenar (USD)	Costo de mantener en inventario (USD)	Std. Pack.
80%	\$3.30	\$0.89	80

Fuente: elaboración propia, 2022.

Cómo se puede observar, el ítem 74598855 de igual forma es surtido por el proveedor Aptiv International Operations, la organización maneja un nivel de servicio deseado del 80%, con costos de ordenar por \$3.30 dólares y de mantener en inventario de \$.89 dólares, estableciendo un estándar pack por 80 unidades.

Cabe mencionar que, la información implementada para el desarrollo de cada una de las fichas técnicas fue extraída directamente de la base de datos de inventarios emitida por el programa SAP implementado en la organización bajo estudio; Además se siguió la misma lógica de constructo para los cuatro ítems restantes pertenecientes a la familia de productos estratégicos.

Cálculo de inventario de seguridad por ítem

Para el cálculo del inventario de seguridad se implementaron las fórmulas mostradas a continuación:

$$1. S = z * \sigma L$$

$$2. \sigma L = \sqrt{L} * \sigma$$

Donde:

S = Inventario de seguridad

Z = Factor de seguridad (valor Tabla z)

σL = Desviación estándar de la demanda durante el tiempo de entrega

L = Tiempo de entrega

σ = Desviación estándar de la demanda

Para ello, en un primer momento se consideró la demanda semanal de cada uno de los ítems en estudio, y con ayuda de software Excel se calculó la desviación estándar de la demanda de cada producto durante el tiempo de entrega, obteniendo este por medio de SAP, mientras que el nivel de servicio dependía del proveedor por lo que dicho dato fue proporcionado por parte de la organización, donde dichos resultados se muestran a continuación (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Desviación estándar anual y diaria

Número de parte	Desviación estándar anual	Desviación estándar diaria
74359016	1774.21	354.84
74598855	1931.33	386.26
74599007	1643.04	328.60
74597665	1351.78	270.35
74359015	1736.97	347.39
74593374	2081.18	416.23

Fuente: elaboración propia, 2022.

En la Tabla 5 se analiza que, los valores resultantes de la desviación estándar son altos, esto debido a que la empresa ordena material a los proveedores en cantidades altas derivado de la cantidad de arneses que se producen, así mismo se sabe que la demanda guarda un comportamiento variable, por lo que constantemente hay incrementos o decrementos en los requerimientos de material, siendo esto una razón importante para el cálculo del inventario de seguridad.

Considerando lo mencionado anteriormente, la gerencia decidió que el modelo de inventarios se desarrollara tomando en cuenta el nivel de servicio real del proveedor que suministra cada número de parte, así como dos escenarios posibles en caso de que el nivel de servicio de proveedor en un futuro llegue a aumentar o disminuir. En la Tabla 6 se presenta una muestra de los resultados de inventario de seguridad.

Tabla 6. Inventario de seguridad para número de parte 74359016

NP	σ_L	Nivel de servicio	Z	S
		80%	1.28	643
74359016	501.82	70%	1.04	522
		90%	1.65	829

Fuente: elaboración propia, 2022.

El resultado obtenido del inventario de seguridad propuesto para el número de parte 74359016, fue de 643 piezas en el escenario real (80% de nivel de servicio), mientras que bajo un escenario con un 70% de nivel de servicio, el inventario de seguridad tiende a decrementar a 522 piezas, por contraparte en el segundo escenario favorable de incremento en el nivel de servicio, este resulta ser de 829 piezas, esto debido a las condiciones

que conlleva el manejar niveles de servicio alto, es decir a mayor nivel de servicio, mayor el número de partes disponibles en inventario para hacerle frente a la aleatoriedad que se pudiese presentar en la demanda por parte del cliente.

A su vez, bajo el mismo contexto en el cálculo para el producto con número de parte 74598855 los resultados muestran que este tiene una desviación estándar diaria de 386.26 unidades, lo que conlleva a una desviación estándar durante el tiempo de entrega de 546.26. Por lo que considerando niveles de servicio del 80%, 70% y 90% el número óptimo en inventario como piezas de seguridad resulta ser de 670, 569 y 902 unidades respectivamente, tal y como se muestra en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7. Inventario de seguridad para número de parte 74598855

NP	σL	Nivel de servicio	Z	S
		80%	1.28	670
74598855	546.26	70%	1.04	569
		90%	1.65	902

Fuente: elaboración propia, 2022.

Al igual que en la generación de las fichas técnicas por producto, se calculó el inventario de seguridad para los seis productos pertenecientes a la categoría A, según el modelo de clasificación ABC.

Cantidad económica de pedido por ítem

Una vez calculado el inventario de seguridad para cada uno de los ítems, se procedió con la determinación de la cantidad económica de pedido (EOQ). Para esto, se diseñó un formato formulado en una hoja de cálculo de Excel, donde se utilizó la siguiente fórmula:

$$3. Q = \sqrt{((2DCo/Cm))}$$

Donde:

Q = Cantidad económica de pedido

D = Demanda anual

Co = Costo por ordenar

Cm = Costo de mantener en inventario

La información referente a la demanda anual, costo por ordenar y mantener en inventario, se consideró la recabada en los pasos anteriores, por lo que se sustituyeron cada uno de dichos valores en la hoja de cálculo, generando los siguientes resultado, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Cálculo de cantidad económica de pedido por ítem.

Número de parte	EOQ	Std. Pack.	EOQ propuesta
74359016	1297.51	100	1300
74598855	1295.32	80	1360
74599007	1326.14	150	1350
74597665	1320.1	150	1350
74359015	1288.58	100	1300
74593374	1267.01	150	1350

Fuente: elaboración propia, 2022.

En la Tabla 8, se puede observar la determinación de la cantidad económica de pedido por ítem, siendo esta la cantidad a ordenar que permite un mayor ahorro para la organización. Cabe mencionar que los resultados fueron ajustados debido a la restricción impuesta por los proveedores en cuanto al tamaño de paquete estándar que manejan estos. Como lo es el caso del ítem 74359016, donde la cantidad de producto a ordenar es de 1298 unidades, sin embargo, dada las restricciones estipuladas es necesario ordenar 1300 unidades, mientras que para el producto 74598855 su volumen de orden ideal es de 1296 por lo que se ajusta a órdenes de 1360 unidades.

Cálculo del costo total de inventario por ítem

Al igual que para el cálculo de la cantidad óptima de pedido para cada uno de los ítems en estudio, se desarrolló una hoja de Excel en la cual mediante la fórmula que se presenta a continuación se define el costo total de inventario.

$$4. CT = (D/Q * Co) + ((Q/2 + S) * Cm)$$

Donde:

CT = Costo total

D = Demanda anual

Q = Cantidad económica de pedido

Co = Costo por ordenar

Cm = Costo de mantener en inventario

S = Inventario de seguridad

Los costos resultantes por ítem se enlistan a continuación, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Cálculo de costo total de inventario por ítem.

Número de parte	Costo total (USD)
74359016	\$1,874.77
74598855	\$1,752.96
74599007	\$1,528.89
74597665	\$1,400.55
74359015	\$1,397.67
74593374	\$899.64

Fuente: elaboración propia, 2022.

Los costos totales de inventario resultado del diseño del modelo de inventario, consideran diversos factores involucrados en su fórmula de cálculo. Se identifican que los costos totales por número de partes se registran dentro de un rango que va de los \$899.64 dólares como mínimo hasta los \$1,874.77 como máximo. Esto debido a los costos de adquisición de cada uno de los materiales, así como el volumen que se utiliza de estos en la producción de productos terminado y el costo agregado de las piezas correspondientes al inventario de seguridad como medida de mitigar la posibilidad de caer en desabasto de materiales y con ello un paro en la continuidad en las diversas líneas de producción.

Cálculo de número óptimo de pedidos por insumo

Considerando la demanda anual registrada durante el año 2019 para cada uno de los productos bajo estudio, así como la cantidad óptima de pedido, se procedió a la obtención del número óptimos de pedidos a emitir al proveedor en el transcurso de un año, para ello se implementó la siguiente fórmula:

$$5. N=D/Q$$

Donde:

N = Número óptimo de pedidos

D = Demanda anual

Q = Cantidad económica de pedido

Donde a su vez, los resultados se plasmaron a manera de matriz en la siguiente Tabla.

Tabla 10. Cálculo de número de pedidos óptimo por ítem

Número de parte	EOQ propuesta	Número óptimo de pedidos al año
74359016	1300	175
74598855	1360	167
74599007	1350	176
74597665	1350	175
74359015	1300	173
74593374	1350	161

Fuente: elaboración propia, 2022.

De acuerdo a los resultados mostrados en la matriz anterior, se puede ver que el número óptimo de pedidos está dentro de un rango que va de los 161 a los 189 pedidos al año, sin embargo, como la empresa realiza sus pedidos con una periodicidad semanal y esta a su vez labora un total de 51 semanas al año, fue necesario realizar un ajuste en para determinar el número de pedidos que se deben de emitir al proveedor en cada una de las semanas, indicando dicho ajuste a continuación.

Tabla 11. Cálculo de número de pedidos óptimo por ítem

Número de parte	Número óptimo de pedidos Al año	Número óptimo de pedidos por semana	Requerimiento semanal
74359016	175	4	5200
74598855	167	4	5440
74599007	176	4	5400
74597665	175	4	5400
74359015	173	4	5200
74593374	161	4	5400

Fuente: elaboración propia, 2022.

En la empresa bajo estudio, cada inicio de semana se emite a los proveedores los requerimientos de material, siendo esto mediante un sistema que le indica directamente la cantidad de piezas que se necesitan, por lo que el requerimiento semanal obtenido, resulta ser la cantidad propuesta a emitir en la solicitud a proveeduría para cada uno de los ítems. Por mencionar un ejemplo de ello, se recomienda emitir un total de cuatro pedidos por semana del ítem 74359016 estando conformado cada una de estas órdenes por 1,300 unidades, lo que conlleva a requerir un total de 5,200 unidades durante la semana. Mientras que para efectos del ítem 74598855, de igual forma se emiten cuatro órdenes de 1,360 unidades es decir 5,440 unidades por semana.

Cálculo de punto de reorden por insumo

El penúltimo paso del procedimiento implementado fue el cálculo del punto de reorden para cada uno de los ítems en estudio, donde se emplearon las fórmulas mostradas a continuación:

$$6. R=m+S$$

$$7. m=d*L$$

Donde:

R = Punto de reorden

m = demanda media (promedio) durante el tiempo de entrega

d = demanda promedio diaria

L = tiempo de entrega

S = inventario de seguridad.

Se calculó la demanda promedio diaria dividiendo la desviación estándar anual entre 5, puesto a que la desviación estándar anual se obtuvo de las desviaciones semanales durante un año, y en la empresa en estudio, se trabajan un total de cinco días por semana. A su vez el tiempo de entrega de cada uno de los proveedores que surten los distintos tipos de productos, es un dato otorgado por la dirección. Por lo tanto, el desarrollo de los cálculos fue realizado mediante formato de Excel en el cual se implementó la fórmula previamente mencionada. El consenso de resultados es posible consultarlos a mayor detalle a continuación.

Tabla 12. Punto de reorden número de parte 74359016

Número de parte: 74359016				
Nivel de servicio	L	m	S	ROP
80%	14	8717.59	642.33	9360
70%	14	8717.59	521.89	9240
90%	14	8717.59	828.01	9546

Fuente: elaboración propia, 2022.

Para el cálculo del punto de reorden en cada uno de los ítems, se consideraron al igual que en la determinación del inventario de seguridad, tres diversos escenarios con niveles de servicio variables desde el 70% hasta el 90%, donde el resultado bajo las condiciones actuales de la organización contemplando un 80% en su nivel de servicio se obtiene como resultado un punto de reorden de 9,360 unidades. Traduciendo esto a que cuando el nivel de inventario disponible en el almacén de materia prima del ítem 74359016 sea igual a 9,360 unidades es momento de emitir una orden de compra al proveedor.

Bajo el mismo contexto se calcularon los puntos de reorden para el resto de ítems, generando el siguiente registro:

Tabla 13. Cálculo del Punto de reorden por ítem

Número de parte	ROP
74598855	9,388
74599007	9,702
74597665	9,514
74359015	9,227
74593374	9,067

Fuente: elaboración propia, 2022.

Análisis del modelo de inventario propuesto

Considerando los elementos que intervienen en el modelo de inventarios se diseñó un formato por cada uno de los ítems en estudio, contemplando los diferentes escenarios de nivel de servicio, así como sus respectivos costos, inventario de seguridad, número de emisiones de ordenes por año, punto de reorden y la cantidad económica de pedido.

Dicho formato se puede observar a continuación.

MODELO EOQ			
Número de parte: 74359016 (Subensamble L8640MM)			
Demanda anual (D)	227280	Cantidad económica de pedido (EOQ)	1300
Desviación estándar (d)	1774.21		
Costo de ordenar (USD)	\$3.58	Inventario de seguridad	643
Costo de mantener (USD)	\$0.97		
		Punto de reorden	9360
Tiempo de entrega en días (L)	14		
Nivel de servicio	80%	Número óptimo de pedidos	175
Valor Z	1.28		
Std. Pack	100	Costo total	\$ 1,874.77

Figura 3. Modelo EOQ para número de parte 74359016. Fuente: Elaboración propia 2022

La ficha anterior muestra en particular la propuesta de modelo de inventario para el ítem con número de parte 74359016 considerando un nivel de servicio del 80% una cantidad económica de pedido de 1,300 unidades por orden, a su vez se propone mantener un inventario de seguridad a la mano de 643 unidades, así mismo se establece un punto de reorden de 9,360; Un número óptimo de pedidos al año de 175 lo que genera un costo total de \$1,874.77 dólares.

Conclusiones

En el presente estudio se propuso una solución basada en la metodología de [7], donde se seleccionaron los productos estratégicos para la organización, siendo estos los de mayor impacto en la empresa bajo estudio por medio de la metodología de clasificación ABC. Así mismo se identificó el tipo de modelo de inventario que requiere implementar la organización para la gestión de inventarios de acuerdo a las características del producto y condiciones por parte del proveedor. Con ello se cumple el objetivo de diseñar un modelo de inventario para productos de mayor impacto de la empresa elaboradora de arneses, que permita efficientar los controles de inventarios de la materia prima y con ello evitar caer en faltantes o en la generación de sobre inventario.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos del proyecto se presentaron a manera de propuesta a la empresa bajo estudio, por lo que se recomienda su implementación durante el año 2023 con el fin de que la empresa pueda observar el impacto positivo en cuanto a la gestión de inventario se refiere.

Referencias

- [27] Pérez, J. (2014). Tipos de automóviles. <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/malcval/files/2014/05/VEHiCULOS-AUTOMoVILES.pdf>
- [28] Cimatic (2021). ¿Qué es la industria automotriz? Sitio web: <https://cimatic.com.mx/cual-es-la-industria-automotriz/>
- [29] Basurto, R. (2013, septiembre). Estructura y recomposición de la industria automotriz mundial. Oportunidades y perspectivas para México. Revista Economía UNAM. <https://www.elsevier.es/es-revista-economia-unam-115-articulo-estructura-recomposicion-industria-automotriz-mundial--S1665952X13722047>
- [30] Zozaya, J. (2022, 10 de febrero). La importancia de escuchar a la industria. Revista Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/la-importancia-de-escuchar-a-la-industria/>
- [31] El Universal (2020, 17 de julio). Sector automotriz, importante para el desarrollo económico de Sonora. El Universal. <https://www.eluniversal.com.mx/estados/sonora-sector-automotriz-importante-para-el-desarrollo-economico-del-estado>
- [32] Tapia, A. (2016). Diseño de arneses eléctricos para General Motors [informe de actividades profesionales de ingeniería, Universidad Autónoma de México]. Consultado el 6 de septiembre de 2022.
- [33] Causado, E. (2015). Modelo de inventarios para control económico de pedidos en empresa comercializadora de alimentos. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 163-177.
- [34] Montenegro, R. (Febrero de 2011). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7871/3/CD-3478.pdf>
- [35] Amaya, L. F., Carreño, D. A., Ruíz, E. T., & Tiboche, F. J. (2019). Diseño de un sistema para la gestión de inventarios de las pymes en el sector alimentario. Revista Industrial, 113-132.

Capítulo 11

Modelación de la cadena de suministro agrícola del limón persa basada en eventos discretos con Simio®

Mildred Virginia López Segura, Constantino Gerardo Moras Sánchez , Magno Ángel González Huerta, Sergio Javier Acosta Beltrán, Gregorio Fernández Lámbert, Alberto A. Aguilar Lasserre

Resumen—La gestión de la cadena de suministro integra los procesos de producción y logística en varios niveles relacionados con el tamaño y ubicación de las plantas o centros de distribución, el diseño mismo de la cadena de suministros, producción, transporte, inventario, y también rutas de vehículos [1]; es la búsqueda de coordinación para de obtener el mejor rendimiento del negocio sin dejar de lado las necesidades del cliente[2]; en esta dirección se analiza la gestión de la cadena de suministro en la comercialización de productos agrícolas. Este artículo propone modelar la cadena de suministro de una empresa empacadora de limón persa, a través de la simulación de eventos discretos a fin de evaluar el nivel de servicio; que se entenderá como la capacidad de la empresa de satisfacer la demanda del producto para exportación a los mercados principales, EUA-Canadá y Europa. Para facilitar la toma de decisiones y analizar alternativas que permitan la satisfacción de la demanda; se construye un modelo de simulación de eventos discretos donde se analizan diferentes escenarios y se evalúan opciones de ¿Cómo gestionar el almacén y centros de distribución para mejorar la capacidad de satisfacción de la demanda? Con el modelo planteado se logra tener control de las variables, inventario inicial, y tamaño de orden de los centros de distribución, la cantidad producida, de manera que se pueda comparar y optimizar el proceso sin ningún costo y sin los riesgos que un experimento real genera a la empresa.

Palabras Clave—Simulación de Eventos Discretos; Cadena de Suministro Agrícola; Limón Persa; Nivel de Servicio.

Introducción

La agricultura representa una de las actividades económicas con la mayor contribución al desarrollo general de un país; es una fuente de crecimiento económico de la economía nacional [3] y como fuente de subsistencia, constituye el sustento del 86% de la población rural mundial [4]. Las exportaciones de frutas, han tenido un efecto particularmente importante en el aumento del empleo y del ingreso familiar de los hogares rurales, lo que ha reducido la migración del campo a la ciudad [5], además de constituir un aporte importante a la reducción de la pobreza, incluso más que otros sectores.

Sin embargo, los procesos de la cadena de suministro agrícola se caracterizan por la estacionalidad de la producción, y una alta susceptibilidad del rendimiento con respecto a las variaciones climatológicas por lo que existe la necesidad de que los países en desarrollo definan y estructuren estrategias y políticas para impulsar y fortalecer el desarrollo tanto de la agricultura como de los territorios rurales, de manera que haya una utilización plena y sostenible de los recursos naturales.

La complejidad en la comprensión de la gestión de este tipo de cadena de suministros está dada por la presencia de incertidumbre en el rendimiento de la cosecha, la demanda, los tiempos entre pedidos, además de algunos otros aspectos. En este tipo de cadena de suministros se puede dar el riesgo de no alcanzar a cubrir las necesidades del mercado, y por lo tanto no entregar a tiempo el producto lo que representa una pérdida económica y quizá la pérdida de clientes, esto hace evidente la necesidad de una adecuada estrategia, aspecto esencial de la gestión, que satisfaga las prioridades competitivas de la empresa, haciendo eficiente y efectiva la administración de los recursos y buenas relaciones entre proveedores y clientes. Se propone un modelo de simulación en Simio® que permite optimizar la gestión de ciertos parámetros en el sistema y por lo tanto minimice los riesgos antes mencionados.

La complejidad en la comprensión de la gestión de este tipo de cadena de suministros está dada por la presencia de incertidumbre en el rendimiento de la cosecha, la demanda, los tiempos entre pedidos, además de algunos otros aspectos. En este tipo de cadena de suministros se puede dar el riesgo de no alcanzar a cubrir las necesidades del mercado, y por lo tanto no entregar a tiempo el producto lo que representa una pérdida económica y quizá la pérdida de clientes, esto hace evidente la necesidad de una adecuada estrategia, aspecto esencial de la gestión, que satisfaga las prioridades competitivas de la empresa, haciendo eficiente y efectiva la administración de los recursos y buenas relaciones entre proveedores y clientes. Se propone un modelo de simulación en Simio® que permite optimizar la gestión de ciertos parámetros en el sistema y por lo tanto minimice los riesgos antes mencionados.

Para el análisis de la cadena de suministro se han utilizado diversos métodos de simulación, la gestión de la cadena es clave para el éxito de cualquier organización y destaca

como una de las herramientas más utilizadas para el análisis de los procesos de la gestión de la cadena de suministro, el uso de la simulación desde distintos enfoques se ha abordado por diferentes autores y se tienen opiniones diferentes al respecto; [6] considera que el modelamiento con simulación usa tres métodos: por eventos discretos, basado en agentes y dinámica de sistemas, a su vez [7] hacen un estudio comparativo de estos tres métodos con el fin de facilitar la elección del más conveniente, aunque sin tener en cuenta que ciertos sistemas del mundo real requieren el empleo simultáneo de varios métodos de simulación para poder representar correctamente la problemática dada, en cambio [8] consideran que la mejor manera de modelar diferentes partes de un sistema es usar simultáneamente varios de los métodos descritos (modelo híbrido), sugiriendo que se debe seleccionar el o los métodos idóneos después considerar a detalle el sistema a modelar y los objetivos del estudio a realizar con simulación.

El enfoque de eventos discretos se ha abordado en investigaciones como la presentada por [12] quienes analizan el ciclo productivo de una empresa colombiana productora de flores, [13] por su parte construyen un modelo híbrido de optimización y simulación que representa la nueva cadena de suministro de trigo canadiense, y [14] desarrollan un modelo de simulación de un caso de estudio de la vida real de un sistema de producción y distribución de dos niveles para productos agroalimentarios, estos modelos tienen el objetivo final de identificar estrategias eficaces que dan solución a disintos problemas de la gestión de la CS de ciertos productos agrícolas; el enfoque de agentes e híbrido se muestra en trabajos como el de [15] quienes presentan un modelo de simulación basada en agentes y por eventos discretos, además de un Sistema de Información Geográfica como plataforma de experimentación de la logística de operación de una cadena de fabricación/distribución de pequeña escala, o el realizado por [16] que desarrolla un Sistema de soporte de decisiones basado en modelos basado en agentes para la programación de producción agregada reactiva en la cadena de suministro de café verde.

El uso de simulación para evaluación, y optimización de la cadena de suministro se realiza desde hace ya varios años, el número de simulaciones es vasto, así como variado el enfoque utilizado, sin embargo, para mantener breve este análisis del estado del arte se ha limitado a algunos de los trabajos más recientes y específicamente a los modelos basados en las técnicas de dinámica de sistemas, eventos discretos y basados en agentes desarrollados para cadena de suministro agrícolas.

Para el desarrollo del modelo se describen en la sección dos de este artículo, los dos principales procesos que intervienen en la cadena de suministro, el primero correspondiente a los proveedores, el proceso de clasificación, empaque y almacenamiento del producto; y el segundo el concerniente a la generación de pedidos y el tamaño de éstos. Se describen las variables que interienen, así como los elementos del modelo de simulación. En la sección tres se muestran los resultados del modelo con su respectiva discusión y por último las conclusiones.

Metodología

El objetivo de esta investigación es modelar la cadena de suministro agrícola del limón persa, por lo que se establece utilizar la simulación de eventos discretos como herramienta para simular el comportamiento del nivel de servicio de la cadena de suministro del caso de estudio y analizar cómo se puede mejorar la coordinación, según los parámetros establecidos para estos procedimientos. La metodología propuesta para el desarrollo del modelo de simulación de eventos está basada en la propuesta por [17], con una adaptación al contexto de éste trabajo, consta de ocho etapas que se muestran en la Figura 1; en este diagrama se puede observar cada etapa del desarrollo del modelo y sus principales actividades descritas brevemente.

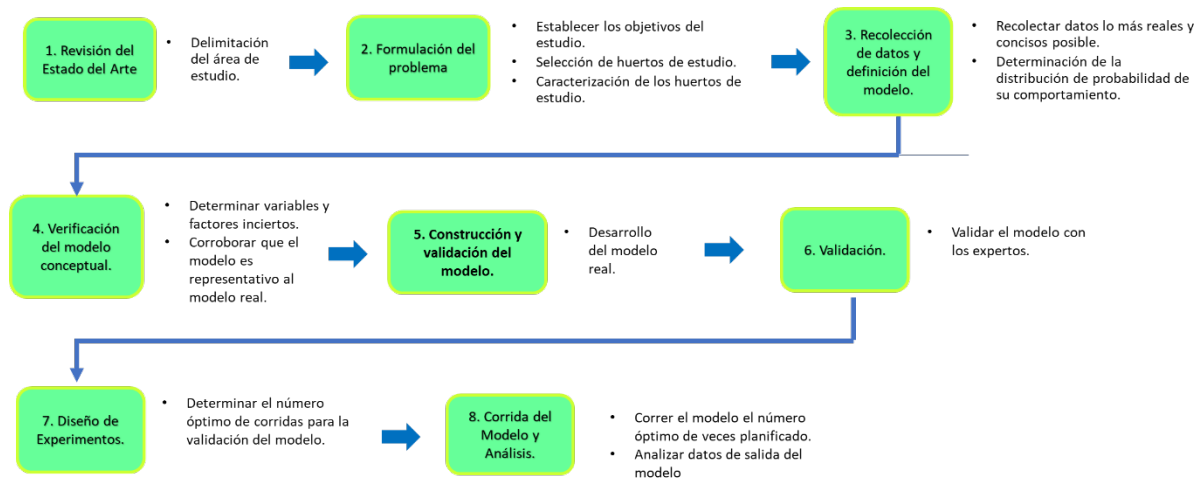


Figura 1. Metodología para la modelación de la Cadena de Suministro Agrícola del Limón Persa

2 Cadena de Suministro Agrícola del Caso de Estudio

El caso de estudio es una empresa exportadora de limón persa ubicada en el estado de Veracruz, México; este trabajo plantea las condiciones de operación propicias para el análisis propuesto. En un contexto general, [18] reportan, desde el enfoque de la cadena de suministro, tres eslabones importantes: producción en huerto, industrias procesadoras, distribuidores y clientes finales definidos por el Mercado Nacional e Internacional (Figura 2).



Figura 2 Cadena productiva de limón persa. Fuente: Adaptación de [19].

A fin de modelar los actores y procesos de la cadena de suministro para poder evaluar posteriormente su capacidad de satisfacer la demanda, se emplearon los objetos de modelamiento ofrecidos por el software Simio®, que fue seleccionado por tener una interfaz amigable con el usuario, así como permitir la modelación de manera intuitiva, facilitando la modelación de la cadena de suministros del caso de estudio. Se resumen los eslabones de la cadena de suministro, tal cual fueron modelados.

Variables del Modelo

Las variables que se consideran para la modelación se encuentran detalladas en la Tabla 1

Tabla 1. Variables y Factores Inciertos CS Limón Persa.

Nombre	Definición
Cantidad de Producto Lle- gada	Variable
Cantidad de Órdenes 10Lb EUA/CAN	Variable
Cantidad de Órdenes 40 Lb EUA/CAN	Variable
Cantidad de Órdenes 10Lb Europa	Variable
Tamaño de las Órdenes	Variable
Nivel de Servicio	Variable (Indicador de desempeño)
Demanda	Factor Incierto
Rendimiento Huerto	Factor Incierto

Las variables consideradas se refieren a la cantidad de producto que llega a la planta por parte de los proveedores (dado en kg), la cantidad de órdenes de la presentación de 10 y 40lb de ambos clientes (descrito en la siguiente Tabla), EUA-Canadá y Europa, así como el tamaño de esas órdenes (kg).

Tabla 2. Cajas 10 y 40lb, descripción para ambos clientes.

Presentación	Descripción
Caja de 10lb EUA-Can	Empacada manualmente pieza por pieza para garantizar el 100% de la calidad, con etiqueta para cada limón en calibres de 54, 48, 42 y 36, en pallets de 180 cajas almacenado a temperatura ambiente.
Caja de 40lb EUA-Can	Fruta con o sin etiqueta envasado a granel, en calibres de 110, 150, 175, 200, 230 y 250 en pallets de 54 y 60 unidades.
Caja de 10lb Europa	Caja de una sola pieza, empacado manualmente limón por limón con o sin etiqueta con grado de maduración $\frac{3}{4}$ color verde 90% uniforme, cáscara rugosa, calibres; 63, 54, 48, 42 y 36, en pallets de 216 piezas

Dada la naturaleza de la cadena de suministro que se está simulando nos encontramos con dos factores inciertos de gran impacto que afectan a las variables con las cuales hemos de medir el desempeño de la cadena de suministro, variables como la cantidad de producto que llega de los huertos a la empacadora se ven afectadas directamente por el factor incierto del rendimiento de los huertos, y otro muy importante es la incertidumbre con respecto a la demanda de producto.

Construcción del Modelo de Simulación en Simio®

La representación de la cadena de suministro se realiza para comprender y evaluar el flujo de la cadena de suministro, y el proceso en sí para de esta manera identificar las áreas de oportunidad que pueden ser mejoradas y que optimicen la gestión de la cadena de suministro. Se describen a continuación, de manera breve, los aspectos generales que se consideraron para el desarrollo del modelo de simulación.

Análisis de la situación actual de la empresa

En este primer apartado, principalmente se realiza el reconocimiento del proceso, es decir, identificar los subprocesos que lo conforman, es necesario representar de manera general el flujo del proceso productivo. Las estaciones de trabajo que comprenden esta investigación, así como las actividades que se realizan en las etapas del proceso productivo correspondientes a los eslabones de proveedores y empacadora identificados son mostrados en la siguiente Figura 3.

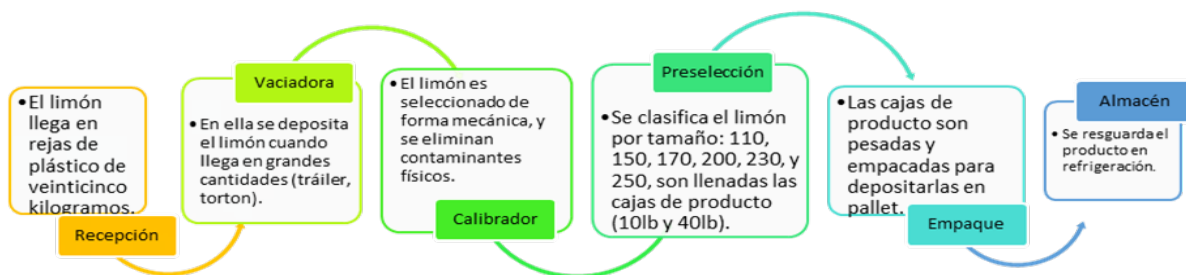


Figura 3. Subprocesos de la planta empackadora, Eslabón: Proveedores- Producción

El eslabón clientes es representado por procesamiento de órdenes y se conforma de la siguiente manera (ver Figura 4).



Figura 4. Subprocesos del Eslabón, Clientes.

El objetivo de la modelación es medir la capacidad de la planta para satisfacer las órdenes de sus dos clientes principales, se modela cada proveedor: externos, de la empresa, y compras, así como cada subproceso del proceso de clasificación y empaque.

Obtención de los datos

Para la aplicación de la metodología y realizar la modelación propuesta, la recolección de información se centró en datos necesarios para la construcción del modelo de simulación en Simio®. Estos datos fueron obtenidos de los registros históricos sobre llegadas de producto que guarda la empresa. Se extraen datos tales como: tiempos entre arribos de fruta a la planta por proveedor, la cantidad en kilogramos del fruto de cada llegada y los tiempos descarga, es decir el tiempo que toma vaciar el fruto de los vehículos de los proveedores a la recepción de la planta medido en minutos; del análisis de estos datos depende la correcta programación de la entidad. Se obtienen, además, a través de una recolección de datos de las máquinas en estudio (y también los procesos que son manuales), los tiempos de procesamiento de cada una de las etapas que forman parte del proceso de producción, y de los registros de operación se extrae la capacidad de las má-

quinas que es medida en kilogramos de limón que pueden ser procesados por cada una de ellas. Tanto para la medición del tiempo de procesamiento como las llegadas de los proveedores los datos fueron analizados con pruebas de bondad de ajuste a través de la herramienta de identificación de distribución individual incluida en el software estadístico para determinar si su comportamiento se ajusta a alguna de distribución de probabilidad teórica conocida, la herramienta permite probar todas las distribuciones y transformaciones, entre ellas la Normal, Exponencial, Gamma, etc. Para la modelación de los pedidos y clientes, se tomaron datos de los registros de pedidos diarios, de un periodo igual a 7 años (2007-2009 y 2018-2021) de los dos clientes principales (Estados Unidos y Canadá, Europa); estos datos corresponden al tamaño del pedido, es decir cuántos kilos de limón son solicitados de cada presentación (10 y 40lb). Éstos datos fueron también analizados con ayuda del software estadístico para determinar si siguen una distribución de probabilidad teórica, con la misma herramienta, sin embargo, no se ajustaron a ninguna, la modelación de esta parte de la simulación se realiza con ayuda de una distribución empírica dentro del software Simio®, que permite simular eventos basándose directamente en los datos registrados, lo cual representa una gran ventaja para modelar eventos lo más apegados a la realidad posible.

Conceptualización del modelo

La estructura del modelo de proceso se realizó de acuerdo con las actividades que se llevan a cabo en la exportadora, la simulación se reporta en dos partes que representan a los actores identificados para la cadena de suministro, el primero corresponde a la simulación de los proveedores, y empacadora; los primeros eslabones identificados de la cadena de suministro y el segundo al eslabón clientes. Se describe el desarrollo de ambos de manera individual.

Proveedores y Producción

En esta parte se modela la llegada de producto de cada proveedor, el proceso de clasificación, empaque y almacenamiento, el modelo completo de estos eslabones es mostrado en la Figura 5.

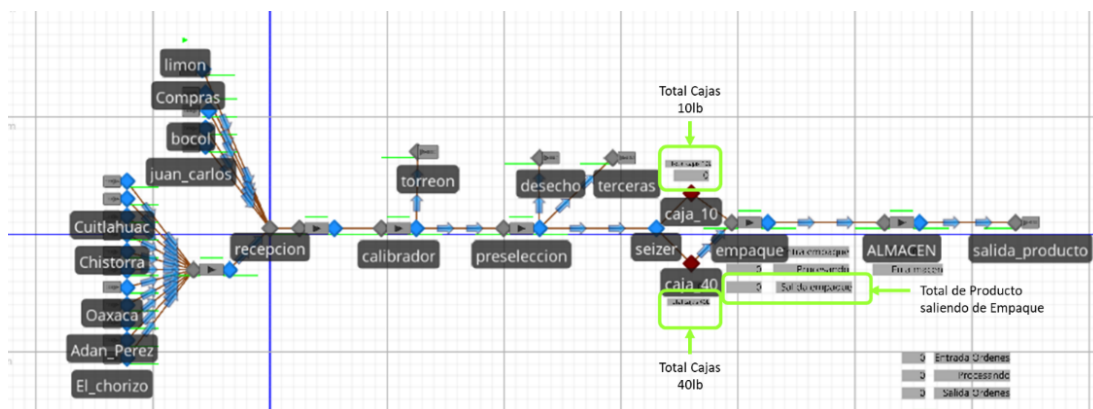


Figura 5. Modelación: Proveedores- Empacado- Almacén.

Los subprocesos que fueron modelados en Simio® se resumen en la Tabla 3 que también muestra el tipo de distribución que se programó.

Tabla 3. Subprocesos modelado en Simio(R) y distribución de probabilidad programada.

Subproceso	Distribución
Vaciadora	Triangular (11.5,13,14.5)
Calibrador	Triangular (7.5,9,10.5)
Preselección	Triangular (83.5,85,86.5)
Empaque	Triangular (14.5,16,17.5)

En las Tabla 4 (a y b), se muestra la cantidad de objetos que se utilizaron para la elaboración de este primer modelo.

Tabla 4a.Objetos utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa (Proveedores y Producción) en Simio®.

Objetos de Simio®	Cantidad	Uso
Source	16	Generación de entidades (kg).
Sink	4	Salida de la entidad.
Server	6	Procesamiento de la entidad.
Combiner node	2	Crea lotes de entidades.
Entity	1	Entidad (kilos de limón).

Tabla 4b. Objetos utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa (Proveedores y Producción) en Simio®.

Objetos de Simio®	Cantidad	Uso
Time Path	2	Tiempo de traslado.
Transfer node	1	Transferencia de entidades.
Connector	27	Conexión entre elementos.
Basic Node	1	Conexión de elementos.
Path	1	Trayectoria.
Status label	12	Etiqueta de estado actual.

Al finalizar la programación de los procesos de la cadena de suministro se programaron diferentes Status Label (ver Figura 6), que permiten visualizar las variables mientras el modelo es simulado para poder comprender el estado actual del proceso de producción.

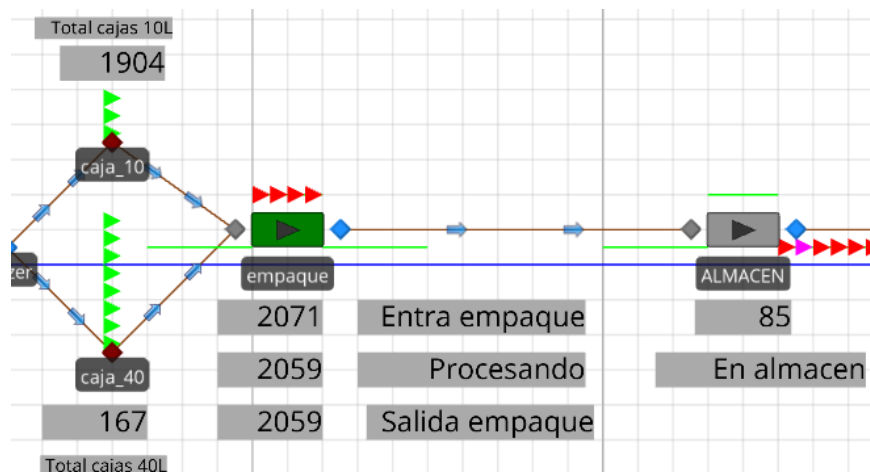


Figura 6. Status Label en el proceso de producción

Cientes

El segundo módulo corresponde a los clientes (tercer eslabón), se simula la llegada de pedidos, es decir la generación de órdenes por parte de los dos principales clientes de exportación, EUA-Canadá y Europa. Se utilizaron dos Model Entity para representar la generación las órdenes de los clientes, éstas se originan en los servidores que representan los clientes principales, EUA/CAN y EUR, las órdenes avanzan al servidor para ser procesadas y posteriormente son eliminadas en el Sink. El modelo cuenta con varios Status Label para poder llevar un contador a tiempo real de las órdenes generadas, en proceso, completadas y además contabiliza el número de cajas de 10 y 40 lb que han sido enviadas a los clientes.

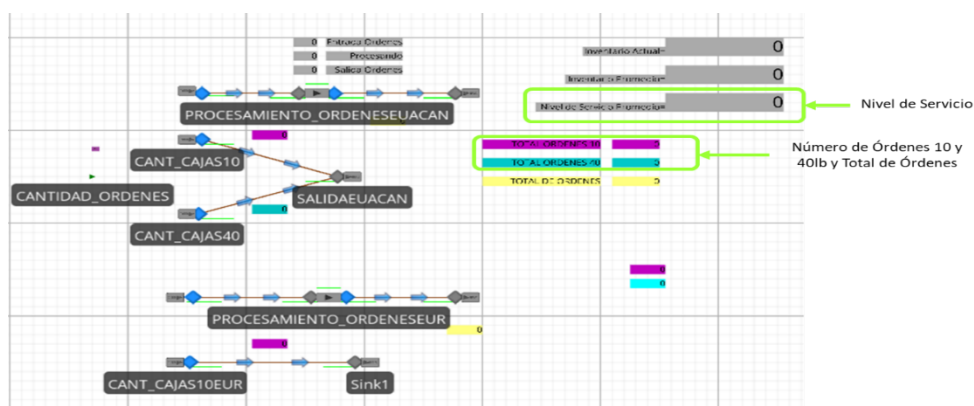


Figura 7 Modelación: Clientes (Generación de Órdenes). Se muestra a continuación un concentrado de los objetos que conforman esta parte del modelo (Tabla 5).

Tabla 5. Objetos utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa, tercer eslabón (Clientes) en Simio®.

Objetos de Simio	Cantidad	Uso
Source	5	Generación de entidades (kg).
Sink	4	Salida de la entidad.
Entity	2	Entidad (Órdenes).
Time Path	3	Tiempo de traslado.
Connector	4	Conexión entre elementos.
Server	2	Procesamiento de la entidad.
Status Label	23	Etiqueta de estado actual.

En la Tabla 6 se muestran las variables que se declararon en la sección Definitions, así como los elementos y eventos que fueron necesarios para la construcción de este modelo anexándose una breve descripción de su uso.

Tabla 6. Variables utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa en Simio®.

Objetos de Simio	Cantidad	Uso
State Variables	4 reales	Para distribuciones.
	11 enteras	Para contadores.

Tal cual se mencionó en la sección anterior, los datos correspondientes a las órdenes de cada cliente (tamaño de orden) no siguen una distribución de probabilidad específica, éstos fueron introducidos en el software como una Tabla de datos que servirá como base para la simulación de la generación de pedidos, ésta es una de las ventajas que ofrece Simio®.

En los Source llamados TIENDA1EUACAN y TIENDA1EUR son generadas las entidades CANTIDAD_ORDENES, es decir las órdenes de los clientes EUA/CANADÁ y EUROPA, la programación del Source sigue tres reglas antes de que la entidad salga de él, en este momento se hace la distinción entre si esta orden corresponde a una caja de 10lb o de 40lb, así mismo se hace la contabilización de cuántas órdenes son creadas de cada tipo, con ayuda de dos StateVariables. La programación es la misma para el Source que genera órdenes del cliente EUROPA. Una vez que es procesada la orden se dirige al Sink SALIDA_ORDENES1 para ser eliminada del sistema.

Validación del Modelo

La validación del modelo de simulación se ha realizado en conjunto durante una reunión de trabajo con los expertos de sistemas de producción, y responsables de la empresa. El producto que es empacado y exportado es un producto natural, y por lo tanto volumen de fruto que es proveído a la empresa tiene una gran variabilidad a lo largo del año, el limón persa (*citrus latifolia*) presenta una temporada alta (de mayo a octubre) y baja (de noviembre a abril) para la cosecha. Durante la temporada alta es posible que la empresa reciba de 130 hasta 300 ton semanales, sin embargo, durante la temporada baja estas cantidades caen de manera significativa, y el producto que entra a la empresa suele ser menor a 80 ton semanales.

A través de dieciséis corridas definitivas del modelo, que fueron determinadas por la fórmula $n \cdot \beta$ (ver Ecuación 1) con un nivel de confianza del 90%, $\alpha=0.10$ y un error $\beta=2500$ kg de limón, los valores generados en las etapas claves del proceso son comparados por los expertos con los valores reales que se presentan normalmente en la planta durante el año.

Ecuación 1 Corridas Óptimas $n \cdot \beta$. Fuente:[17]

$$t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s^2(n)}{i}} \leq \beta$$

El objetivo principal de este modelo de simulación es determinar si la empresa es capaz de satisfacer la demanda de producto, por lo cual las variables de interés para la validación son la cantidad de producto procesada, es decir limón que entra y continúa al proceso para ser exportado, así como las órdenes de ambos clientes que se generan.

Medición del Nivel de Servicio

El objetivo del modelo es una mejor gestión de la cadena de suministro, para ello se programó un control de inventario básico que permita conocer a el inventario actual, promedio y el nivel de servicio promedio que será la métrica de desempeño que nos indica si se es capaz de cumplir con la demanda de los clientes.

A continuación, se muestran los elementos y propiedades utilizadas para la programación del control en la Tabla 7.

Tabla 7. Elementos utilizados para la determinación del Nivel de Servicio.

Objetos de Simio	Cantidad	Nombre en el Modelo	Uso
State Statistic Elements	1	StateInventario	Control de Inventario
Tally Statistic Elements	1	TallyStatNS	Control de Inventario
Properties	2	InventarioInicial, CantidadOrdenada	Control de Inventario

Además, se agregaron dos variables a la programación VarInventario y VarWip, las cuales son utilizadas para realizar el control del inventario.

Al iniciar la simulación el modelo debe verificar el inventario inicial en la planta, para conocer con cuanta materia prima se cuenta al iniciar el proceso de producción y conocer el momento en el que se debe realizar una orden a los proveedores basándose en la cantidad de pedido (órdenes de los clientes y su tamaño) que se tenga. Para la representación gráfica en los Status Label del control inventario se programaron en los servidores PROCESAMIENTO_ORDENESEUACAN y PROCESAMIENTO_ORDENESEUR.

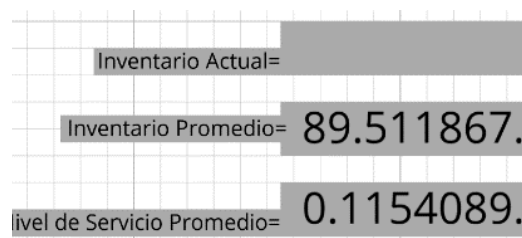


Figura 8. Status Label de control de inventario y Nivel de Servicio.

Ambas partes del modelo en conjunto logran emular el comportamiento real de la cadena de suministro agrícola del limón persa, ésta es abordada desde los proveedores (llegadas de limón a la planta) hasta la atención a las órdenes (pedidos) de los clientes. Cabe

señalar, que tal cual recomienda [8] el modelo reportado en este trabajo es solo uno de los que se desarrollan para la simulación y análisis de esta cadena de suministro, se trabaja de manera paralela en un modelo híbrido basado en agentes y eventos discretos a fin de comparar el desempeño de ambos posteriormente.

Experimentación

El estudio experimental para evaluar el nivel de servicio de la cadena de suministro se ha realizado en dos etapas, en la primera (experimentación manual) se han probado 44 escenarios con valores que van desde 100,000 a 150,000kg para el inventario inicial y variando el tamaño de las órdenes de producto que se generan. En una segunda fase se han lanzado un experimento en SIMIO® también, pero haciendo uso de OptQuest para intentar encontrar los mejores parámetros que permitan un mayor nivel de servicio en la planta maximizando el nivel de inventario que ha de surtir las órdenes de los centros de distribución. El número total de escenarios es de 9, el objetivo es encontrar un rango de valores que permitan optimizar el nivel de servicio pero que sean ejecutables en la realidad por la planta, ya que teniendo en cuenta el entorno inestable de la cadena de suministro agrícola y la naturaleza de la incertidumbre no siempre es posible una optimización al máximo.

Parámetros de los Experimentos

Se diseñó un modelo básico de control de inventario, el cuál sirve como base para comparar la cantidad de producto procesada con respecto a la cantidad de producto que es solicitada por estos clientes.

Este control de inventario maneja los siguientes parámetros (ver Tabla 8):

Tabla 8. Parámetros de la Experimentación.

Variable	Descripción
Inventario Inicial	Cantidad en kg de producto con el que se inicia la experimentación
Tamaño de Orden	Cantidad en Kg de producto que puede ser solicitado en cada orden que se genera.

Se ha considerado el inventario inicial como una de las variables para la experimentación tanto manual como OptQuest, éste consiste en la cantidad de limón con la que arranca el

proceso de la planta, ésta variable es de suma importancia porque representa la materia prima con la que la empacadora funciona, los valores que se establecen obedecen a los valores promedio que se manejan durante el año analizados durante la recolección de datos y considerando la cantidad regular de proveedores tanto externos como de la empresa. La variable del Tamaño de Orden hace referencia a los kilos de limón que son solicitados por los clientes, existe variabilidad en la cantidad de producto que es ordenada por ambos clientes (EUA y Europa), tanto la frecuencia de los pedidos como el tamaño de estos presentan altas variaciones, para la experimentación se consideraron los valores mínimos y máximos que se tienen registrados.

Primer Experimentación

Los valores de los parámetros se establecen tomando en cuenta las condiciones actuales de la empresa, el valor de inventario inicial se establece con base en los registros históricos, la capacidad de procesamiento de la planta, tamaño de orden, este escenario servirá como base para comparar el nivel de servicio de los escenarios propuestos. Se establecen variaciones en los parámetros considerando un aumento y reducción del 5% en el inventario inicial, el tamaño de orden varía 25% en ambos sentidos a partir del promedio de este parámetro.

Se muestran los escenarios y resultados de la primera experimentación (Figura 9):

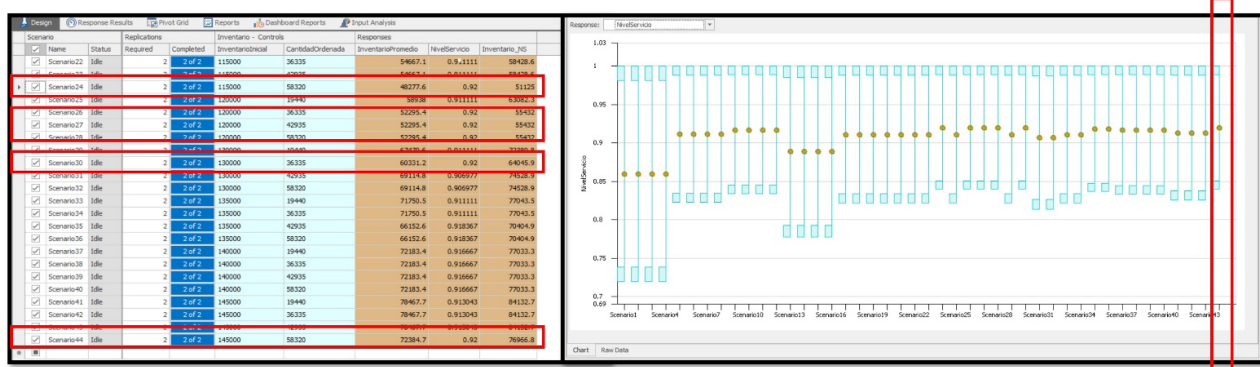


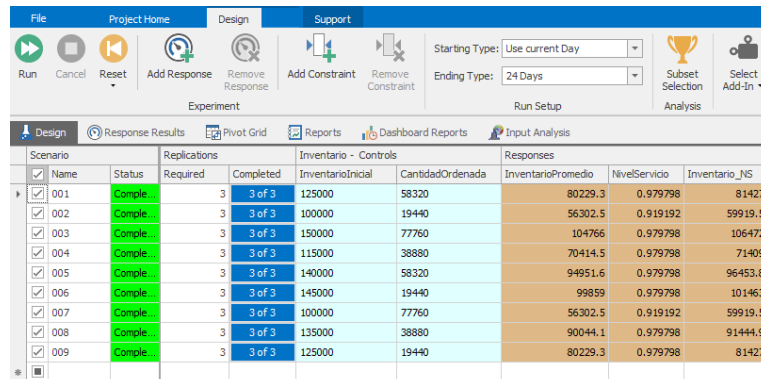
Figura 9. Experimentación y gráfico comparativo de resultados

Notamos que el mejor nivel de servicio se da en los escenarios que tienen un Inventario Inicial igual a 150000. Considerando que el inventario promedio se refiere al producto que está en proceso y procesado, es conveniente seleccionar el escenario con valor mayor, que en este caso corresponde a un inventario promedio de 72,384, y esto da como resultado un nivel de servicio de 0.92 mayor a los otros 43 escenarios.

Opt.Quest

OptQuest® Engine, el software de optimización de OptTek Systems, Inc., incluido en Simio®, reemplaza la inexactitud de prueba y error con un potente motor de búsqueda que señala la mejor decisión, de esta manera se puede determinar rápidamente qué combinación de variables da como resultado el logro del objetivo de mejora de nivel de servicio.

Mediante la implementación de este modelo de simulación, se aumenta el nivel de servicio de la planta empacadora.



Scenario		Replications		Inventory - Controls		Responses		
Name	Status	Required	Completed	InventarioInicial	CantidadOrdenada	InventarioPromedio	NivelServicio	Inventario_NS
001	Complete	3	3 of 3	125000	58320	80229.3	0.979798	81427
002	Complete	3	3 of 3	100000	19440	56302.5	0.919192	59919.5
003	Complete	3	3 of 3	150000	77760	104766	0.979798	106472
004	Complete	3	3 of 3	115000	38880	70414.5	0.979798	71409
005	Complete	3	3 of 3	140000	58320	94951.6	0.979798	96453.8
006	Complete	3	3 of 3	145000	19440	99859	0.979798	101463
007	Complete	3	3 of 3	100000	77760	56302.5	0.919192	59919.5
008	Complete	3	3 of 3	135000	38880	90044.1	0.979798	91444.9
009	Complete	3	3 of 3	125000	19440	80229.3	0.979798	81427

Figura 10. Resultados Opt.Quest.

En la optimización que realiza la herramienta Opt.Quest (Figura 10) notamos que el nivel de servicio más alto obtenido es de 0.979798 y se repite en varios de los escenarios, coincidiendo en que el inventario inicial es mayor al actual, el tamaño de orden parece no afectar el desempeño de la CS en estos casos.

Estos resultados y la elección de los mejores parámetros son discutidos en la sección siguiente.

Resultados y Discusión

El uso de la simulación destaca como una de las herramientas más utilizadas para el análisis de los procesos de la gestión de la cadena de suministro; se aborda desde distintos enfoques y se tienen opiniones diferentes al respecto [8] consideran que la mejor manera de modelar diferentes partes de un sistema es usar simultáneamente varios métodos, simulación de eventos discretos, simulación basada en agentes y modelos híbridos, el desarrollo del modelo de simulación en Simio® de este proyecto atiende a esta opinión.

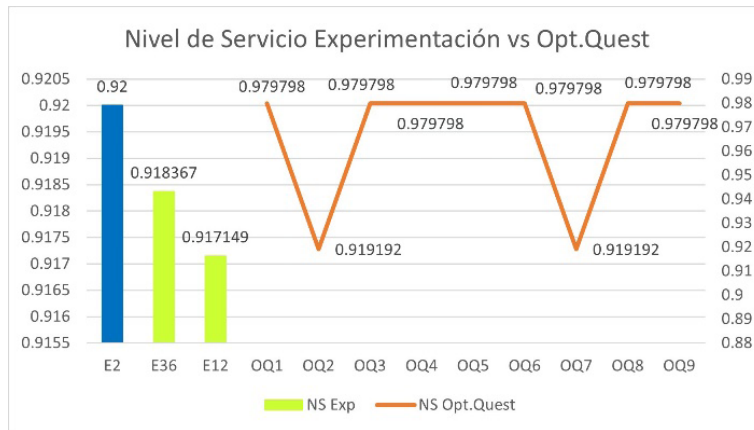


Figura 11 Gráfico de Nivel de Servicio Experimentación vs Opt.Quest.

Al comparar los resultados de ambos enfoques (Figura 11) vemos que el mayor nivel de servicio (0.97) se obtiene de la experimentación que se realiza con OptQuest. El siguiente gráfico muestra una comparación de los niveles de servicio obtenidos con ambos enfoques. El mayor nivel de servicio propone un inventario inicial de 150,000, con un tamaño de orden de 77,760. La parte compleja y real en el ajuste de estos parámetros consiste en la dinámica e incertidumbre presente en el abastecimiento de producto, el inventario inicial depende en su totalidad de la cantidad de limón que cada proveedor puede ingresar a la planta, y esto a su vez depende del rendimiento por hectárea de la cosecha de estos huertos, lo que complica que se alcance el ideal propuesto resultado del análisis y experimentación del modelo.

Durante la temporada alta de cosecha es posible alcanzar un inventario inicial de esta dimensión, los proveedores durante estos meses tienen la capacidad de traer a la empresa suficiente fruto, será entonces este momento cuando la empresa pueda satisfacer efectivamente la demanda de los mercados de exportación. Sin embargo, durante la temporada baja de cosecha, cuando se observa que la entrada de fruto a la empresa registra valores menores a las 80 ton semanales la satisfacción de la demanda representará un reto. Tecnológicamente las plantas procesadoras de la región tienen la capacidad de procesar hasta 60ton de fruto al día, la problemática recae entonces en que exista entrada suficiente de éste. El desarrollo del modelo hace evidente que en el contexto de la cadena de suministro agrícola es necesario hacer frente a la incertidumbre desde el primer eslabón, desde hace algunos años se apunta a la agricultura de precisión, el uso de técnicas y tecnologías que permitan garantizar un rendimiento de cosecha óptimo, no solo en el limón sino de manera general, se presenta como una necesidad actual de la cual depende que los países sean capaces de satisfacer la demanda de alimento de la cual la [20] nos viene hablando desde hace algunos años.

Durante el análisis de datos fue posible observar que si bien los pedidos son constantes guardan una gran variabilidad en cuanto al tamaño de éstos, esta variable pudiera ser controlada acordando con los centros de distribución del extranjero un tamaño óptimo de pedido, sin embargo, en la realidad existe una considerable complejidad que es aportada por la logística de envíos, el producto se exporta a EUA y Europa en contenedores que tienen una capacidad mínima y máxima que no podemos ajustar. Sin embargo, en el caso de estudio el parámetro de Cantidad Ordenada ideal se acerca al promedio actual lo cual representa una ventaja para la aplicación de los resultados obtenidos. El desarrollo del modelo de simulación de la cadena de suministro del limón persa permite a los expertos tener en cuenta los factores de mayor impacto en el buen desempeño de la planta, aquellos permiten una mayor satisfacción de la demanda y por ende un mayor margen de ganancia para la empresa y agricultores. Los expertos consideran que además de estos aspectos, el modelo proporciona a la empresa información que permite una mejor gestión de la compra de embalaje para ambas presentaciones 40 y 10lb para los clientes EUA y Europa, ya que son diferentes cajas las que ambos clientes solicitan, de las simulaciones se puede tener un estimado de la cantidad de producto de cada presentación que es clasificado y empacado, si bien no es propiamente un sistema de predicción de la demanda, en conjunto con la experiencia de los responsables de área conforma una herramienta que permite una mejora más en la gestión de ésta cadena de suministro.

Los resultados reafirman la necesidad del apoyo al campo mexicano, de estudios de los diferentes cultivos agrícolas con el objetivo de optimizar rendimiento y calidad de sus productos. Esta investigación es producto de un trabajo de tesis doctoral que contempla también un módulo de predicción de rendimiento de cosecha, herramienta que atiende la incertidumbre que afecta el aprovisionamiento de producto, de esta manera se promueve la posibilidad de poder ajustar el inventario inicial al ideal identificado en la experimentación reportada en este trabajo.

Conclusiones

Se cuenta ahora con un modelo basado en eventos cuyo desarrollo está respaldado por trabajos diversos de autores como [21] se define un sistema Pull para resolver el problema de secuenciación de unidades homogéneas. La literatura y la práctica abordan habitualmente este problema de un modo Push en el que un sistema inteligente calcula la siguiente unidad que el sistema debe producir en función de lo que tiene disponible. El método propuesto plantea que se alimente la planta con órdenes de fabricación (unidad a unidad, [22] y [23]) the environmental hedging point policy (EHPP quienes analizan y dan solución distintos sistemas de producción abordando problemas de secuenciación de unidades, rendimiento vs trabajo, y sistemas de transporte, coincidiendo en el uso de la simulación y módulos de optimización para dar solución a las diferentes problemáticas. El desarrollo de herramientas que permitan una mejor gestión de la cadena de suministro

y por ende un incremento la satisfacción de la demanda de productos agrícolas cobra mayor importancia año con año, modelos como el aquí presentado son un paso más hacia la agricultura de precisión en México, las previsiones muestran que el mundo no está en vías de lograr el objetivo de hambre cero en 2030, una de las metas es precisamente duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los productores de alimentos, y es aquí precisamente que se hace evidente la importancia de proyectos como el que aquí se presenta acerca del software. Los modelos desarrollados se construyen utilizando el entorno de simulación Simio Student Edition en su versión 15.240.27825 a 64 bit.

Referencias

1. Ivanov D (2021) Supply Chain Simulation and Optimization with anyLogistix, 5th ed. Berlin School of Economics and Law, Berlin
2. Flores Carvajal L (2021) Gestión de la cadena de suministro en la comercialización de productos agrícolas en Ecuador. SUMMA Rev Discip en ciencias económicas y Soc 3:1–23. <https://doi.org/10.47666/summa.3.2.38>
3. Banco-Mundial (2008) Banco Mundial: Agricultura para el desarrollo, Banco Mund. Colombia
4. Perfetti JJ, Balcázar Á, Hernández A, Leibovich J (2013) Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia. Sociedad de Agricultores de Colombia, FEDESA-RROLLO, Colombia
5. Valdés A, Foster W (2010) Reflections on the Role of Agriculture in Pro-Poor Growth. World Dev 38:1362–1374. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.06.003>
6. Grigoryev I (2022) Anylogic in three days: a quick course in simulation modeling., Sixth edit
7. Sarmiento-Vásquez A, López-Sandoval E (2017) Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes. Ing Ind 0:27. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2017.n035.1789>
8. Borshchev A, Grigoryev I (2020) Modeling and simulation modeling. AnyLogic North America
9. Andres B, Sanchis R, Poler R (2016) Modelado y simulación de la cadena de suministro con AnyLogic®. Model Sci Educ Learn 9:57. <https://doi.org/10.4995/msel.2016.3520>
10. Forero-Almanza C, A. Martínez M, Mauricio Herrera M (2017) Modelo de simula-

ción relacionado con la influencia de la fuerza de trabajo en la cadena de suministro del mango en la región del Tequendama. Caso el colegio. *INVENTUM* 12:75–83. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.12.22.2017.75-83>

11. Rojas Palacios MN, Paredes Rodríguez AM, Peña Orozco DL (2022) Dynamic Simulation of the Beneffitis applying a coordination mechanism in a small agricultural producers decentralized supply chain. *Ing y Competividad Rev Científica y Tecnológica* 24:. <https://doi.org/https://doi.org/10.25100/iyc.v24il.10986>
12. Osorio Gutierrez C, Akerman R, García O, Cardenas LM (2021) Evaluación de los procesos de siembra y corte de flores mediante simulación de eventos discretos Assessment of the sowing and cutting flower processes by discrete-event simulation. *Prospectiva* 19:.. <https://doi.org/https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2645> RESUMEN
13. Ge H, Nolan J, Gray R, et al (2016) Supply chain complexity and risk mitigation – A hybrid optimization–simulation model. *Int J Prod Econ* 179:228–238. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.014>
14. Sherine B, Khlaed S. E-K, Noha M. G (2012) Simulation of Agri-Food Supply Chains. *Int J Ind Manufacturing Eng* 6:899–904
15. Giraldo-García JA, Castrillón-Gómez OD, Ruiz-Herrera S (2019) Simulación Discreta y por Agentes de una Cadena de Suministro Simple Incluyendo un Sistema de Información Geográfica (SIG). *Inf tecnológica* 30:123–136. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600123>
16. Pérez-Salazar MDR (2019) Sistema de gestión del conocimiento basado en la integración del enfoque multi-agente y el modelo SCOR para la administración de la cadena de suministro. Instituto Tecnológico de Orizaba
17. Law AM (2015) *Simulation Modeling and Analysis, FIFTH EDITION*, Fifth Edit. Mc Graw Hill, Tucson, Arizona, USA
18. Fernández Lambert G, Aguilar Lasserre A, Azzaro-Pantel C, et al (2015) Behavior patterns related to the agricultural practices in the production of Persian lime (*Citrus latifolia tanaka*) in the seasonal orchard. *Comput Electron Agric* 116:162–172. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.007>
19. Fernández Lambert G (2010) Selección de proveedores basado en sistemas expertos para la gestión de la cadena de suministro de limón persa. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
20. FAO (2017) *El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos*.
21. Maheut J (2015) Estudio de la configuración productiva de una planta de pre-mon-

taje de unidades aplicando parámetros de presencia máxima de opciones. WPOM-Working Pap Oper Manag 6:1. <https://doi.org/10.4995/wpom.v6i1.3408>

22. Sun GE, Guan ZL, Yue L, et al (2014) Research on DBR Production Scheduling System Application Based on Simulation. Adv Mater Res 889–890:1207–1212. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.889-890.1207>
23. Dadashpour I, Bozorgi-Amiri A, Afshar-Bakeshloo M (2020) Integrated Environmental Hedging Point Policy and Carrier Selection Strategy for Unreliable Manufacturing System and Transportation Facing Emission. Environ Model Assess 25:653–664. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09697-8>

Sección 3:

Movilidad y desarrollo sostenible

Capítulo 13

Hacia un Transporte 5.0: una propuesta de cambio en la matriz energética incorporando hidrógeno verde para los remolcadores de alta mar

Lorena Bearzotti, María Isabel Vega, Javier M. Ross, Luciano Nuñez, Mario Contreras

Resumen—La transición hacia una cadena de suministro 5.0 significa muchos retos para los diferentes actores que la componen. Uno de estos retos es el de la sustentabilidad, tema especialmente sensible para el rubro del transporte ya que en su gran mayoría su matriz energética está basada en combustibles fósiles, evidenciándose algunos cambios en los últimos años donde se ha iniciado la búsqueda de nuevos elementos que puedan ser considerados los combustibles sustitos a éstos. En este sentido, el trabajo que se presenta busca desarrollar una propuesta de cambio de esta matriz energética basada en la incorporación de hidrógeno verde a los procesos de transporte, y en particular se presenta el caso de los remolcadores portuarios, como uno de esos actores en este proceso de cambio. Es importante trabajar con estos actores dado que un porcentaje importante de la no sustentabilidad se encuentra en este rubro. Así, se desarrolla un marco conceptual para dicha transición hacia una matriz energética más sostenible en el sector del transporte en Chile, identificando oportunidades y desafíos en el camino hacia la constitución de un Transporte 5.0. El caso de estudio se focaliza en cómo el uso de hidrógeno verde puede ayudar a reducir la huella de carbono generada por los remolcadores de alta mar en el Puerto de Valparaíso. Se examinan las posibles estrategias de implementación y se analizan los beneficios potenciales, tanto para el medioambiente como para la eficiencia operativa de la industria marítima. Complementando esto, también se analiza el diseño de la logística necesaria para el transporte del Hidrógeno verde, desde los centros de producción a los centros de consumo.

Palabras Clave—Transporte 5.0; matriz energética; transición energética; Chile; Energías Renovables, Movilidad sostenible.

Introducción

El rubro del transporte representa un elemento fundamental en los procesos relacionados a los servicios que se prestan en las cadenas de suministro, especialmente aquellas que presentan la característica de globales y cuyos actores pueden estar distribuidos geográficamente a distancias considerables. Su funcionamiento puede afectar los diferentes indicadores que se definan produciendo un impacto en toda la cadena.

Además, este rubro se constituye como un elemento fundamental en las economías de los diferentes países, en particular en Chile es considerado como un elemento estratégico dada la geografía del país, permitiendo la movilidad de bienes y personas. Sin embargo, esta actividad económica, también es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Por ejemplo, según el informe de electromovilidad en Chile [1], el sector del transporte es responsable de casi el 37% de consumo energético a nivel país, siendo responsable de ser el generador de casi el 27% del total de los GEI en Chile, y esto se debe porque casi en un 99% el transporte sigue dominado por el uso de combustibles fósiles. Esta dependencia de los combustibles fósiles no solo genera un impacto medioambiental, sino que también plantea desafíos en términos de seguridad energética y sustentabilidad económica; además de aspectos de resiliencia y responsabilidad social. Entonces, esta alta demanda de energía, junto con la dependencia de los combustibles fósiles, pone en evidencia la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía más sostenibles. En este escenario emerge el hidrógeno verde como una alternativa viable en el proceso de transición de la matriz energética del transporte a combustibles más sostenibles.

La finalidad de este trabajo es desarrollar una propuesta de transición en la matriz energética del transporte en Chile hacia un modelo de Transporte 5.0 que se puede caracterizar por su autonomía, conexión, siendo eléctrico, compartido y optimizado. El Transporte 5.0 no solo permite reducir las emisiones de GEI, sino que también podría contribuir a una mayor eficiencia energética y a la creación de una economía más verde y sostenible.

Transporte 5.0: un nuevo paradigma señalando el futuro

Bajo el concepto de transporte 5.0 se engloba una filosofía basada en la industria 4.0 pero que se torna centrada en el humano [2]. Se presenta como una nueva visión del futuro de la movilidad en donde se incorporan elementos de resiliencia, sustentabilidad, inteligencia y el estar centrado en el humano. Por lo que busca desarrollar sistemas de transporte más sostenibles y eficientes.

Dentro de los elementos del Transporte 5.0 se puede mencionar:

Transporte autónomo (AVG).

Transporte conectado (vehículo a vehículo, vehículo a infraestructura) puede mejorar significativamente la eficiencia y seguridad en el transporte.

Transporte no fósil: busca la descarbonización del transporte.

Transporte compartido: busca reducir el número de vehículos en la calle, reduciendo la congestión y la contaminación, además es brindar opciones de transporte asequibles y convenientes para los habitantes que no tienen acceso a vehículo propio.

Transporte optimizado: con la ayuda de la inteligencia artificial y el análisis de datos, el transporte puede ser optimizado para mejorar su eficiencia y sostenibilidad.

Para lograr un Transporte 5.0 es necesario un enfoque integral que involucre políticas públicas adecuadas, inversión en infraestructura y tecnologías, así como la participación activa de todos los actores relevantes.

Propuesta de cambio en la matriz energética del transporte

Sabiendo que el transporte es un área que consume un porcentaje considerable de energía y que además es una de las responsables por la generación de GEI es imperante trabajar en la transición a fuentes de energía más sustentables y que permitan reducir esos indicadores en una industria tan importante como la del transporte.

Así, el cambio de la matriz energética del transporte podría ser la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables, como la electricidad, el hidrógeno y los biocombustibles. Para llegar a esto es imprescindible la promoción de políticas públicas que incentiven la adopción de vehículos no basados en combustibles fósiles, la construcción de infraestructuras de carga y la implementación de sistemas de transporte público sustentable. Además, se podría fomentar la producción y uso de biocombustibles, como el etanol y el biodiésel, que son menos contaminantes que los combustibles fósiles, así como la generación, distribución y uso de hidrógeno verde.

En cuanto a las políticas públicas, la promoción de las energías renovables en el transporte se podría evidenciar con la obligación de usar una cierta proporción de energía renovable en el sector, o la creación de mercados de certificados de energía renovable.

Esta transición hacia una matriz energética más sostenible y limpia no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire, sino que también reduce la dependencia de los combustibles fósiles y aumentando la resiliencia energética del país.

La implementación de un cambio en la matriz energética del transporte requiere de un esfuerzo coordinado de todos los actores involucrados, incluyendo el gobierno, la industria del transporte, los fabricantes de vehículos, las compañías de energía y la sociedad en general.

Es esencial que el gobierno tome la iniciativa en la promoción del transporte sostenible. Esto puede implicar la creación de políticas públicas, programas de gobierno, la inversión de infraestructura entre otros [3]. Por otra parte, este esfuerzo tiene que ser en colaboración con la industria del transporte y los fabricantes de vehículos, ya que éstas tienen un rol clave en este proceso de transición, ya que pueden contribuir a través de la innovación y de la producción de vehículos que dejen los combustibles fósiles [4].

Y en esta orquestación de actores, las compañías de energía toman un rol relevante al ser las facilitadoras al proporcionar energías renovables para la carga de estos vehículos no fósiles, colaborando en la instalación de infraestructura [5]. Y para que todo este proceso sea exitoso, es fundamental el rol de la sociedad y sus habitantes, comprendiendo y apoyando los beneficios de un transporte sostenible. El logro de este compromiso se basa en campañas de propaganda buscando la sensibilización y educación, así como a través de incentivos que motiven la transición a otros tipos de vehículos fuera de los tradicionales fósiles [6].

Todo proceso de cambio requiere del compromiso de todos los agentes involucrados que desarrollan diferentes roles, sin su integración este cambio no va a funcionar, trayendo consecuencias negativas en el desempeño de la industria del transporte afectando la sustentabilidad y resiliencia de las cadenas de suministro que hoy están con una mirada centrada en el humano y el impacto que se genera en ese actor.

Para este trabajo se van a considerar dos elementos fundamentales, en esta propuesta de transición a una nueva matriz energética, el foco está puesto en el hidrógeno verde como el combustible a ser utilizado, dado que Chile se está posicionando como uno de los productores en la región, el cual va a ser empleado en un área específica del transporte que son los remolcadores en las terminales portuarias, de esta manera un nuevo desafío se plantea, cómo el hidrógeno verde llega a los centros de consumo, dicho de otra manera, se plantea la necesidad de desarrollar una logística para el transporte del origen al destino de este combustible. En las siguientes secciones estos temas, y su integración son abordados.

Caso de Estudio: Uso de hidrógeno verde en los remolcadores en terminales portuarias

La industria del transporte marítimo es uno de los contribuyentes significativos a las GEI, siendo responsables de aproximadamente un 3% de las emisiones globales [10]. Además, este sector juega un papel vital en la economía global, transportando más del 90% del comercio mundial por volumen [11]. A pesar de su eficiencia en términos de emisiones por tonelada-km transportada, la magnitud de su contribución a las emisiones totales de GEI es significativa.

En particular, el Puerto de Valparaíso, es uno de los más activos de América Latina, y no es una excepción a esta problemática. Uno de los actores portuarios que ha sido poco estudiado son los remolcadores de alta mar, indispensables para las operaciones portuarias, siendo una fuente importante de emisiones de GEI. Tradicionalmente, estos remolcadores utilizan motores diesel, que emiten una cantidad considerable de CO₂, además de otros contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado.

En este contexto, se requiere urgentemente un cambio hacia formas más limpias de energía. El hidrógeno verde, producido por electrólisis del agua usando energías de fuentes renovables, emerge como una opción prometedora. Si se usa en celdas de combustibles, el hidrógeno genera electricidad y agua, sin emitir CO₂ ni otros contaminantes.

En este caso de estudio analizamos una estrategia tendiente a convertir estos remolcadores de alta mar para que puedan ser considerados Transporte 5.0, partiendo por el cambio de su combustible, así se explora la viabilidad y las implicancias de reemplazar el combustible tradicional de los remolcadores de alta mar en el puerto de Valparaíso con hidrógeno verde. Se espera con esta acción no solo se reduzca significativamente las emisiones de GEI de estos remolcadores, sino que también contribuya a la mitigación del cambio climático a nivel global y sea un aporte para la configuración de un puerto 5.0, es decir sustentable, resiliente, inteligente y centrado en el humano.

Así esta transición de los remolcadores a remolcadores basados en hidrógeno plantea dos problemas claves, cómo hacer el cambio de sus motores y estudiar su factibilidad, pero también implica el diseño de una red logística que permita la transferencia del hidrógeno verde desde los puntos de generación a los puntos de demanda. Estos aspectos son analizados en las secciones siguientes.

El hidrógeno verde como una opción a los combustibles fósiles

El hidrógeno verde, como fuente de energía renovable y limpia, ha despertado un interés significativo en diversas industrias, incluido el transporte marítimo. Producido mediante electrólisis del agua utilizando energía de fuentes renovables, el hidrógeno verde se destaca como una opción de combustible alternativo con el potencial de transformar completamente la ecuación de las emisiones GEI en el sector [12].

A diferencia de los combustibles fósiles, la combustión de hidrógeno no emite CO₂, sino que simplemente produce agua. Además, si el hidrógeno se produce a partir de fuentes de energía renovables, como la eólica o la solar, el proceso de producción puede ser esencialmente libre de carbono. Esto significa que el uso de hidrógeno verde podría, en teoría, hacer que los remolcadores de alta mar sean neutrales en carbono.

El hidrógeno verde también puede ser producido y almacenado localmente, reduciendo la dependencia de las importaciones de combustibles fósiles y aumentando la resiliencia

energética. Esta característica puede ser particularmente valiosa en lugar como Chile, que tiene una abundancia de recursos renovables pero una dependencia relativamente alta de los combustibles fósiles importados.

No obstante, es importante reconocer que existen desafíos significativos asociados con la transición hacia el hidrógeno verde. Actualmente, la producción de hidrógeno verde es costosa en comparación con los métodos tradicionales de producción de hidrógeno y con los combustibles fósiles. También existen desafíos técnicos asociados con el almacenamiento y transporte del hidrógeno, así como la adaptación o reemplazo de la infraestructura existente [12].

Sin embargo, a medida que la tecnología avanza y la economía de escala entran en juego, es probable que los costos de producción del hidrógeno verde disminuyan significativamente. Además, a medida que los precios de los combustibles fósiles fluctúan y se anticipan que las políticas de precios del carbono se vuelvan más estrictas, el hidrógeno verde puede volverse cada vez más competitivo en término de costos [12].

Por lo tanto, explorar la viabilidad del hidrógeno verde como un combustible alternativo para los remolcadores de alta mar en el Puerto de Valparaíso es una propuesta oportuna y relevante. Este análisis podría abrir el camino para la adopción de esta tecnología, no solo en Valparaíso sino en los puertos de la región y el mundo.

Metodología para la evaluación de la transición

Para evaluar de manera exhaustiva y rigurosa el potencial del hidrógeno verde para reducir las emisiones de GEI en los remolcadores de alta mar, se propone un enfoque de análisis del ciclo de vida (ACV). El ACV es un enfoque sistemático reconocido internacionalmente que evalúa los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida de un producto, proceso o servicio [13].

La metodología del ACV implica varias etapas: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto y, finalmente, interpretación [13]. A continuación, se explican cómo se aplican cada una de estas etapas en el presente caso de estudio.

Definición del objetivo y alcance: el objetivo del estudio es cuantificar las emisiones del GEI asociadas con el uso de hidrógeno verde como combustible en los remolcadores de alta mar en el Puerto de Valparaíso, y compararlas con las emisiones actuales asociadas con el uso de combustibles fósiles. El alcance del estudio incluye todas las etapas del ciclo de vida del hidrógeno verde, desde la producción de la energía renovable necesaria para la electrólisis, hasta la combustión del hidrógeno en los remolcadores.

Análisis de Inventario: se recopilan datos detallados sobre todas las entradas y salidas (por ejemplo, uso de energía, emisiones de GEI) para cada etapa del ciclo de vida

del hidrógeno verde. Los datos se recopilan de diversas fuentes, incluyendo la literatura científica, informes de la industria y bases de datos de ACV.

Evaluación del impacto: se calculan las emisiones totales de GEI para cada etapa del ciclo de vida y se suman para obtener las emisiones totales. Este resultado se compara con las emisiones del ciclo de vida de los combustibles fósiles actualmente utilizados en los remolcadores.

Interpretación: los resultados del estudio se analizan e interpretan en términos de su significado y sus implicaciones. También se identifican y discuten cualquier incertidumbre o limitación del estudio.

Es importante destacar que esta metodología proporciona una evaluación exhaustiva y equilibrada de las emisiones de GEI, considerando todas las etapas del ciclo de vida del hidrógeno verde. Esto es esencial para evitar el desplazamiento de emisiones de una etapa del ciclo de vida a otra, un fenómeno conocido como “cambio de carga”.

Hacia la implementación de remolcadores 5.0 basados en hidrógeno verde

A partir del análisis del ciclo de vida del hidrógeno verde como combustible para los remolcadores de alta mar, se espera poder demostrar una reducción significativa en las emisiones de GEI en comparación con los combustibles fósiles convencionales. Las investigaciones anteriores sugieren que el hidrógeno verde puede ser una alternativa de bajas emisiones de carbón viable [12] [14]. Sin embargo, se debe enfatizar que el alcance completo y la naturaleza exacta de estas reducciones dependen de numerosos factores, incluidos los métodos específicos de producción del hidrógeno verde y las tecnologías de celdas de combustible utilizadas en los remolcadores.

Es importante mencionar que la transición hacia el uso del hidrógeno verde en los remolcadores de alta mar también implica desafíos logísticos y técnicos. Los desafíos incluyen la necesidad de infraestructura para el almacenamiento y transporte del hidrógeno, así como la adaptación de los remolcadores para usar celdas de combustible de hidrógeno [15]. Además, existe el desafío de asegurar un suministro constante y fiable de energía renovable para la producción de hidrógeno verde. En este sentido, el análisis también se debe orientar a las posibles soluciones a estos desafíos y las estrategias para su implementación, lo que se presenta en próximas secciones.

Remolcadores 5.0

El uso de hidrógeno verde como combustible en los remolcadores de alta mar presenta una oportunidad prometedora para la reducción significativa de las emisiones de GEI en el Puerto de Valparaíso y en la industria del transporte marítimo en general. Sin embargo,

es fundamental reconocer y abordar los desafíos logísticos, técnicos y económicos que implica esta transición.

Aunque hoy la producción de hidrógeno verde sigue siendo relativamente costosa en comparación con los métodos convencionales de producción de hidrógeno y con los combustibles fósiles, es probable que los costos disminuyan a medida que la tecnología avance y se alcancen economías de escala. Además, se espera que el hidrógeno verde se vuelva más competitivo a medida que se endurezcan las políticas de precios del carbono y fluctúen los precios de los combustibles fósiles.

A pesar de los desafíos, la transición hacia el hidrógeno verde puede brindar numerosas oportunidades. La creación de nuevos empleos en la industria del hidrógeno verde, la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles importados y la mejora de la calidad del aire local son solo algunos de los beneficios potenciales.

Una hoja de ruta para el desarrollo de la logística asociada con el hidrógeno verde

Uno de los desafíos planteados para el uso de hidrógeno verde en el plan de conversión de los remolcadores de alta mar es el de la logística pensando en su almacenamiento y transporte desde los centros de producción a los centros de demanda.

En esta sección se desarrolla una propuesta de logística para el hidrógeno verde, pensando en cómo se puede llegar al Puerto de Valparaíso y en particular a los remolcadores, pero con el potencial de ser extendido a otros puntos de demanda.

Frente a los desafíos de la sustentabilidad emerge la necesidad de contar con esquemas de producción y consumo sustentables y uno de los pilares para ello son las fuentes de energía renovable y que a la vez sean de bajo impacto ambiental.

En estos recursos energéticos aparece el hidrógeno, ya que es un convector energético y pieza clave para la descontaminación y un auge para la economía del país que lo produce, en este caso Chile.

Por este motivo ya en Chile hay programas de gobierno centrados en la generación de energía limpia, y específicamente en Hidrógeno verde, buscando cambiar el rumbo del aumento de las emisiones y seguir un camino bajo en carbono para el crecimiento y el desarrollo. El propósito de esta sección es desarrollar una propuesta de hoja de ruta para la logística asociada con la gestión del hidrógeno verde desde su obtención de manera sustentable a su entrega en los diferentes centros de demanda, siendo las terminales portuarias uno de los actores que se presenta como de demanda del mismo.

Pensando en la sustentabilidad de los procesos asociados con el hidrógeno verde, uno de los fundamentales es cómo se va producir, en este caso tiene que ser 100% de fuentes renovables, como por ejemplo la energía eólica o solar. Y lo mismo se le va a pedir a

los otros procesos logísticos pensando en el almacenamiento, transporte y distribución. Respecto a lo anterior se han planteado políticas ambientales y desarrollo sustentable, que ha motivado la alianza de diversos países, siendo los pioneros los de la Unión Europea. Es así como tiene especial relevancia la creación de lineamientos claros para el transporte de Hidrógeno Verde y la optimización de los procedimientos asociados, siendo central contar con una logística que responda a la creciente demanda, siendo un foco central contar con flujos de transporte eficaces y eficientes, donde se añade un desafío: los centros de demanda suelen estar lejos de los centros de producción.

Estrictamente pensando en Chile, se espera que en los próximos años la producción de H2V sea para satisfacer la demanda interna y una vez que ésta se encuentre satisfecha comenzar la exportación del mismo.

Se espera para los próximos años generar las condiciones necesarias para desarrollar los procesos e infraestructuras necesarias para la importación/exportación de hidrógeno verde y sus productos derivados, desde Hamburgo y centro de Europa, promoviendo el rápido desarrollo de un mercado autosostenible de hidrógeno en ambas regiones.

De las regiones de Chile, se destaca la de Magallanes (sur) por su potencial en la generación de energía eólica, el que puede cubrir el 13% del requerimiento mundial de H2V. Dejando la planta de generación en Magallanes, se resuelve el problema de la producción sostenible, sin embargo, la distancia a los centros de consume es considerable, así como los puertos principales para la exportación del mismo, lo que abre el desafío de la logística del H2V, para lo cual en esta sección se desarrolla una hoja de ruta tendiente a fijar las ideas principales a ser desarrolladas para poder dar respuesta a este desafío.

Para la problemática asociada con el almacenamiento, se tienen dos opciones, almacenar en estado gaseoso o bien en estado líquido. Almacenar en estado gaseoso es la opción más económica y sencilla de almacenamiento, ya que este puede ser comprimido con el fin de optimizar el espacio y por ende esto aumenta la capacidad de almacenamiento energético de los tanques. Para lograr esto son necesarios grandes niveles de presión al interior del tanque, esto permite lograr eficiencias energéticas entre el 81% al 90% [17]. La otra alternativa es almacenar hidrógeno en estado líquido, para lo cual debe estar en estado criogénico, lo que implica mantener temperaturas a -235 C, lo que implica la necesidad de contar con un gasto energético considerable para poder mantener este líquido a una temperatura tan baja. Como contrapartida, la gran ventaja de este almacenamiento se presenta por la energía que se almacena, pudiendo llegar aproximadamente al doble que si se almacena gaseoso para el mismo volumen.

Por otra parte, una vez producido y/o almacenado el siguiente gran desafío es el transporte del mismo, el que puede ser terrestre, por tuberías, por contenedores y por barco.

En el caso del transporte terrestre está enfocado para distancias cortas ya que se identifican riesgos significativos con un alto impacto producto de posibles accidentes. Para

el transporte en camión se puede optar por cilindros de dihidrógeno en forma de gas de 5-10L o tanques criogenizados con dihidrógeno en forma de líquido.

El transporte por tuberías se presenta como una de las alternativas más eficientes en términos energéticos, ya que de este modo ameritaría directamente la inyección del gas en la red para que sea transportado. Sin embargo, aunque sea una alternativa muy eficiente es necesario analizar su viabilidad por la construcción de tuberías nuevas que estén orientadas al transporte exclusivo de hidrógeno o por otro lado ocupar o reutilizar tuberías actuales.

Económicamente hablando, la reutilización de las redes actuales de tuberías de gas es la opción más viable, dado que requeriría una casi nula inversión, sin embargo, dada la naturaleza diferente de ambos gases se hace necesario estudiar su viabilidad, por ejemplo, una alternativa es el blending, la mezcla de hidrógeno con otros gases para su transporte en tuberías. Otra alternativa es la adaptación de la red vigente, una tercera es la de transportar el gas como gas metano quien comparte comportamiento con el gas natural y por lo tanto no requiere cambios en las tuberías. La última es la construcción de una red completamente nueva destinada al gas hidrógeno, lo que conlleva una gran inversión en el desarrollo de esta infraestructura.

Si bien existe la opción de las tuberías, la baja densidad del hidrógeno sugiere buscar rutas alternativas. En este sentido se pueden utilizar métodos con hidruro metálico, estos son aleaciones sólidas estables que contienen grandes cantidades de hidrógeno, estos pueden ser transportados por medios tradicionales como camiones, trenes, barcos, etc. Luego ya en destino, se puede liberar el gas y transportar la aleación metálica vacía de hidrógeno hasta las plantas de producción nuevamente y reiniciar el ciclo.

Por último, el uso de barco para el transporte de H₂V se orienta más a los procesos de importación y exportación, o bien cuando estamos en presencia de grandes distancias como sería el caso de Chile. Este proceso contempla llevar el hidrógeno en su forma licuada con el fin de maximizar la energía que se transporta, para esto es necesario que los barcos estén adaptados para mantener y transportar el hidrógeno en buenas condiciones y que conserve su estado.

Esto conlleva grandes desafíos para el transporte, pero uno de los más importantes es el diseño del aislamiento de los buques, ya que la diferencia de temperatura entre el líquido y el exterior es muy elevada.

Cómo se ha mencionado previamente en esta sección, el gobierno de Chile ve la producción de H₂V como un objetivo estratégico para el cual ha desarrollado una serie de programas y proyectos que busca potenciar su producción y uso. En este sentido Chile cuenta con un programa de gobierno llamado “Estrategia Nacional de H₂V Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones”. Los estudios previos han demostrado que Chile es un país apto para el uso y creación de H₂V, empezando los trabajos para las creaciones de empresas e industrias que ocupen o produzcan este gas.

En el 2022, Chile presentó “H2V Hidrógeno verde un proyecto país” basado en la estrategia nacional 2020 para la producción de energía. Y también ha credo un plan de gobierno llamado “Plan de Acción Hidrógeno Verde”, cuya finalidad es crear justamente una hoja de ruta.

Una hoja de ruta se entiende como una herramienta que permite a las organizaciones, guiar los procesos de cada industria mediante una planificación que muestra una secuencia detallada de pasos a seguir con el fin de alcanzar los objetivos corporativos y ayudar a analizar los puntos críticos de decisión [16].

La implementación de servicios logísticos en torno al hidrógeno verde en Chile es un proyecto ambicioso y complejo que requerirá una serie de etapas, que se pueden dividir en tres fases: planificación inicial, desarrollo y ejecución y, finalmente, optimización y escalado.

Fase 1: Planificación inicial

1. Investigación y análisis del mercado: Comprender la demanda actual y futura de hidrógeno verde, identificar posibles clientes, evaluar la competencia y realizar un análisis detallado de los recursos naturales disponibles para la producción de hidrógeno verde en Chile.
2. Desarrollo de asociaciones: Buscar asociaciones con empresas de energías renovables, organizaciones de investigación, entidades gubernamentales y otros actores relevantes en la industria del hidrógeno verde.
3. Establecimiento de la normativa y estándares: Trabajar con las autoridades reguladoras para establecer regulaciones y estándares para la producción, almacenamiento, transporte y uso de hidrógeno verde.

Fase 2: Desarrollo y ejecución

4. Construcción de infraestructura: Esto incluirá la construcción de plantas de producción de hidrógeno verde utilizando energía renovable, instalaciones de almacenamiento y sistemas de distribución. Es crucial también la implementación de puntos de recarga para vehículos de hidrógeno.
5. Desarrollo de capacidades: Proporcionar capacitación y educación a los trabajadores y partes interesadas sobre la manipulación segura y eficiente del hidrógeno.
6. Puesta en marcha de operaciones: Iniciar la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde.

Fase 3: Optimización y escalado

7. Evaluación y mejora continua: Monitorear las operaciones de logística del hidrógeno verde, identificar áreas de mejora, implementar cambios y medir los resultados.

8. Expansión de las operaciones: Una vez que las operaciones sean eficientes y rentables, buscar oportunidades para expandir la producción y distribución de hidrógeno verde a nuevas áreas.

9. Innovación y adaptación: Mantenerse al tanto de las tendencias y los avances tecnológicos en la industria del hidrógeno verde para seguir mejorando y adaptándose a las cambiantes demandas del mercado.

Es importante notar que en cada fase de este proceso será necesario tener un enfoque sostenible y respetuoso con el medio ambiente, asegurándose de que las operaciones contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al desarrollo económico sostenible del país.

Conclusiones y Futuros Trabajos

La transición a un Transporte 5.0 conlleva el cambio de la matriz energética vigente, basada en combustibles fósiles en un 90% a una matriz energética basada en energías menos contaminantes en su generación y uso. Sin embargo, esta transición representa un número significativo de desafíos a ser abordados, pero de la misma manera ofrece oportunidades en el sector.

Desafíos

Dentro de los desafíos en esta transición a una nueva matriz energética para el logro de un Transporte 5.0 se pueden identificar las siguientes:

la inversión en infraestructura emerge como un elemento que requiere de fuertes inversiones iniciales con una compensación a largo plazo, de ahí la importancia del compromiso político para la generación de estos cambios [5].

La natural resistencia al cambio, a pesar de los obvios beneficios ambientales y económicos, se puede evidenciar la resistencia al cambio en los consumidores. Para abordar este aspecto es importante la generación de campañas efectivas de educación y sensibilización, así como también incentivos, como baja de impuestos, para facilitar su adopción [7]

La integración de energías renovables, se debe pensar en un sistema integrado de energías que aportan a los diferentes tipos de demanda. Así, se debe gestionar la variabilidad de la producción de energía renovable y garantizar la seguridad y estabilidad de la red [8].

Oportunidades

Por otra parte, este Transporte 5.0 con foco en el tema de la transición de su matriz energética ofrece una serie de oportunidades que impulsan llevar a cabo estos cambios.

Algunas de ellas son:

Al reducir las emisiones por el cambio de la matriz energética, se traduce en un impacto significativo en la calidad del aire de las ciudades, lo que se traduce en mejores condiciones para los habitantes y por ende a mejoras en temas de salud pública [9].

Estímulo económico: la transición al transporte sostenible, puede estimular la economía promoviendo la innovación y la creación de empleos [1].

Ganar el liderazgo en sostenibilidad: Al mostrarse con un enfoque proactivo en el transporte 5.0, Chile puede establecerse como un líder en la región [3].

Conclusiones

El camino al Transporte 5.0 es un proceso complejo y muy profundo que por su propia naturaleza requiere la orquestación de los actores involucrados, ya sean públicos o privados. Siendo esta una meta necesaria y beneficiosa para la ciudadanía y el país. Los elementos que caracterizan esta transición son la digitalización, la inteligencia artificial, la hiperconectividad y la sustentabilidad.

En particular para este trabajo el foco estuvo en la transición de los motores de combustión fósil a los motores no fósiles, lo que le agrega resiliencia a la cadena de suministro

El foco en este trabajo ha estado en la transición hacia el hidrógeno verde en un área bien específica que es el transporte

Trabajos Futuros

Dentro de los elementos a desarrollar en la Agenda de Investigación. Así, es necesario que se lleven a cabo más investigaciones para comprender mejor las barreras que no permiten la masificación de los Vehículos no fósiles.

Por lo tanto, la cooperación entre los actores del gobierno, la industria del transporte, los fabricantes de vehículos, las compañías de energía y la sociedad en general son claves para superar todos los desafíos que los moleste. Además se debe seguir explorando y desarrollando tecnologías innovadoras en el ámbito del transporte sensible.

Además, es necesario seguir desarrollando políticas públicas y regulaciones que apoyen la transición hacia un transporte más sostenibles. Éstas deben ser parte integral de los esfuerzos más amplios para alcanzar los objetivos de la Agenda 2030.

Y la evaluación y seguimiento de los esfuerzos de transición energética son esenciales para asegurar que se está progresando en la dirección correcta y para hacer los ajustes necesarios en el trayecto.

Por lo tanto, el éxito de este cambio solo depende de cómo en su conjunto los actores actúan como una orquesta en post de su objetivo ser 5.0.

De cara al futuro, se recomienda continuar con la investigación y desarrollo en el campo del hidrógeno verde y las celdas de combustible de hidrógeno. También se recomienda explorar las políticas y medidas de apoyo que facilitan la adopción de esta tecnología, como subvenciones o incentivos fiscales para la producción de hidrógeno verde y la adaptación o reemplazo de la infraestructura existente.

Además, se sugiere llevar más estudios de tipo ACV que consideren otras formas de energía renovable para la producción de hidrógeno verde, así como otras aplicaciones del mismo en el sector del transporte marítimo.

En resumen, el hidrógeno verde tiene un gran potencial para desempeñar un papel importante en la mitigación del cambio climático y en la transición hacia un sistema de energía más sostenible y resiliente. Sin embargo, la realización de este potencial requiere de esfuerzos de investigación y desarrollos continuos, así como políticas y medidas de apoyo adecuadas.

De esta manera el Transporte 5.0 ya es una realidad que estamos viviendo y un compromiso para con la sociedad en post de lograr una mejor calidad de vida, reduciendo sus impactos negativos y maximizando la experiencia en todos los sentidos.

Referencias

- [1] Ministerio de Energía. (2021). Estrategia Nacional de Electromovilidad [PDF]. Gobierno de Chile. <https://www.gob.cl/wp-content/uploads/2021/10/estrategia-nacional-de-electromovilidad-2021.pdf>
- [2] Chen, Y., Zhang, H., & Wang, F. Y. (2023). Society-centered and DAO-powered sustainability in transportation 5.0: An intelligent vehicles perspective. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.
- [3] Sperling, D. (2018). Three revolutions: Steering automated, shared, and electric vehicles to a better future. Island Press.
- [4] Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., Vuuren, D. P. V., McCollum, D., & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation?. *Science*, 350(6263), 911-912.
- [5] Outlook, I. G. E. (2020). Entering the decade of electric drive. International Energy Agency.
- [6] Schuitema, G., Anable, J., Skippon, S., & Kinnear, N. (2013). The role of instrumental, hedonic and symbolic attributes in the intention to adopt electric vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 48, 39-49.
- [7] Egbue, O., & Long, S. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy policy*, 48, 717-729.
- [8] Erdiwansyah, Mahidin, Husin, H., Nasaruddin, Zaki, M., & Muhibbuddin. (2021). A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies. *Protection and control of modern power systems*, 6, 1-18.
- [9] World Health Organization (WHO). (2019). Air pollution and child health: prescribing clean air (Summary). 2018. Available in: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/275545/WHO-CED-PHE-18.01-eng.pdf>. Accessed in, 4.

- [10] Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X., & Rutherford, D. (2017). Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015 Detailed Methodology. International Council on Clean Transportation: Washington, DC, USA, 1-38.
- [11] Sirimanne, S. N., Hoffman, J., Juan, W., Asariotis, R., Assaf, M., Ayala, G., ... & Premti, A. (2019, September). Review of maritime transport 2019. In United Nations conference on trade and development, Geneva, Switzerland.
- [12] Taibi, E., Miranda, R., Vanhoudt, W., Winkel, T., Lanoix, J. C., & Barth, F. (2018). Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition.
- [13] ISO-14040, ISO 14040. (2006). Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework.
- [14] Timmerberg, S., & Kaltschmitt, M. (2019). Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines–Potentials and costs. *Applied energy*, 237, 795-809.
- [15] Schlapbach, L., & Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*, 414(6861), 353-358.
- [16] Leitão, A., Cunha, P., Valente, F., & Marques, P. (2013). Roadmap for business models definition in manufacturing companies. *Procedia CIRP*, 7, 383-388.
- [17] Körner, A., Tam, C., Bennett, S., & Gagné, J. (2015). Technology roadmap-hydrogen and fuel cells. International Energy Agency (IEA): Paris, France.
- [18]

Capítulo 14

Estudio de preferencia declarada del servicio BRS del tramo CETRAM Téllez al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles

Héctor Armando Figueroa Urrea, Rafael Ordoñez Gutiérrez, Ahsure Tatiana Flores Pérez, Eduardo Cruz Aldana, Myrna Hortencia Lezama León

Resumen—El presente trabajo muestra un estudio de Preferencia Declarada del servicio de transporte masivo BRS (Bus de Rápido Servicio), en el tramo del CETRAM Téllez en Pachuca, Hidalgo al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles, esto para conocer la demanda potencial de transporte entre dichos puntos, considerando paradas intermedias. El desarrollo urbano actual implica un constante análisis de variaciones en patrones de movilidad debido al cambio repentino de requerimientos. El cambio en la dinámica de la transportación en una región específica se ve fuertemente afectada por el desarrollo de una nueva infraestructura; lo cual modifica radicalmente el comportamiento tanto de la oferta como de la demanda. Un ejemplo claro fue el desarrollo del aeropuerto internacional Felipe Ángeles (AIFA) ubicado en la zona norte del estado de México; el cual generó una reingeniería radical a la movilidad en la región que aún no termina por consolidarse; añadiendo nueva infraestructura a la existente, así como nuevas opciones de transporte a este complejo fenómeno económico y social. Este estudio se realizó a través de la aplicación de una encuesta a una muestra que involucra usuarios de transporte en los diversos municipios por los que se extiende el tramo antes mencionado, la encuesta se aplicó durante dos semanas, de lunes a domingo en tres turnos, para así identificar la demanda potencial del servicio, finalmente se recomienda implementar el servicio BRS por etapas debido a que el incremento en la demanda se dará de forma paulatina conforme al crecimiento de la población y al incremento de actividades económicas en la región involucrada.

Palabras Clave: BRS; Movilidad urbana; Preferencia declarada, Demanda.

Introducción

La movilidad urbana e interurbana desempeñan un papel crucial en el desarrollo económico y social de las ciudades en los tiempos actuales en los que la megatendencia es el aumento de la proporción poblacional en las áreas urbanas. En un mundo cada vez más conectado, la capacidad de los ciudadanos para desplazarse de manera eficiente y rápida se ha convertido en un factor determinante para el crecimiento y la competitividad de las regiones [1]. En este sentido, los aeropuertos desempeñan un papel fundamental al ser los puntos de conexión con el resto del mundo, facilitando el flujo de personas y mercancías, estimulando el turismo y el comercio, y generando empleo en las áreas circundantes [2] [3].

En México, uno de los proyectos de infraestructura más importantes en el ámbito aeroportuario es el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA). Ubicado en el municipio de Zumpango inmerso en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el AIFA ha sido diseñado con el objetivo de aliviar la saturación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) y mejorar la conectividad aérea del país [4]. Este nuevo aeropuerto representa una oportunidad significativa para el desarrollo económico de la región, especialmente en términos de generación de empleo y fomento de la actividad comercial y turística [5], [6].

La conectividad terrestre entre el AIFA y las ciudades circundantes desempeña un papel fundamental para maximizar los beneficios de este nuevo aeropuerto en las que se espera un movimiento considerable de personas. Un sistema de transporte público eficiente y confiable es esencial para garantizar el acceso conveniente y oportuno al aeropuerto, tanto para los pasajeros como para el personal que trabaja en sus instalaciones [7], [8]. Se requiere una red de transporte ordenada, moderna y eficiente. En este contexto, los sistemas de transporte tipo BRS (Bus de Rápido Servicio) se presentan como una solución efectiva y sostenible para mejorar la movilidad y la conectividad entre la Ciudad de Pachuca, en el Estado de Hidalgo, y el AIFA localizado en el Estado de México.

La Zona Metropolitana de Pachuca conformada por los municipios de Mineral de la Reforma, Epazoyucan, Mineral del Monte, San Agustín Tlaxiaca, Zapotlán de Juárez y Zempoala, además de la propia capital del Estado de Hidalgo, es una zona en constante crecimiento, que alberga una población diversa y dinámica. A pesar de contar con servicios de transporte público, la falta de una conexión directa y eficiente con el AIFA limita el acceso de los residentes de Pachuca a las oportunidades económicas y laborales que el nuevo aeropuerto puede brindar [9], [10]. La implementación de una ruta de transporte tipo BRS entre la Terminal Téllez del Sistema de Transporte Masivo Tuzobús de la Zona Metropolitana de Pachuca y el AIFA no solo mejoraría la movilidad de los ciudadanos, sino que también actuaría como un catalizador para el desarrollo económico de la región, generando empleo y estimulando la actividad empresarial [11], [12].

El presente estudio tiene como fin caracterizar el perfil del posible usuario para que, en un futuro, se instaure una ruta de transporte que satisfaga sus requerimientos por medio de una movilidad ordenada, moderna y eficiente que evite congestiones y caos. Para lograrlo, se llevó a cabo un estudio de Preferencia Declarada que consideró los datos demográficos, orígenes y destinos, patrones de viaje, y la capacidad de transporte existente en la zona.

Marco teórico

En la actualidad nunca se había dado una mayor necesidad de comprender lo que ocurre con las redes de transporte; ya sean carreteras, transporte público u otro medio de transporte que apoye a la movilidad de personas y mercancías en entornos cada vez más complicados [13]. Desde finales de los 80's, los estudios de preferencia declarada cobraron interés en el Reino Unido y se han ido perfeccionando y ampliando hasta nuestros días [14]

El desarrollo de encuestas históricamente ha sido una de las herramientas analíticas más fértiles para comprender la movilidad; uno de los estudios más complejos para pronosticar la demanda potencial en un servicio de transporte son las encuestas de preferencia declarada; en las cuales se pregunta a los usuarios de un nuevo servicio inexistente (ruta), con la intención que respondan ciertos atributos que consideren atractivos para usar la nueva ruta basado en requerimientos detectados en una región, con el propósito de identificar demanda potencial del futuro servicio (de transporte). La importancia de estos estudios radica en que es una primera aproximación antes de que se realicen mayores inversiones o se ejerzan altos gastos en etapas posteriores, lo cual hace que este tipo de herramientas sean atractivas para los tomadores de decisiones que requieren sustento estimando la demanda en etapas iniciales [15].

El correcto diseño del instrumento es primordial en la obtención y validación de datos reduciendo al mínimo posibles sesgos, debido a que se pueden presentar errores en la interpretación de las preguntas por parte de los usuarios. Para esto, las preguntas deben integrar los parámetros (atributos), requeridos evitando ambigüedades y siendo muy específicos; además de clarificar instrucciones para que el aplicador facilite al usuario sus respuestas; categorizando o jerarquizando de forma correcta, reduciendo el error de captura en el instrumento. Para esta investigación se identifican tres rubros de análisis en el diseño del instrumento:

- 1) Características del usuario. Identificadores y rasgos específicos edad, género, motivo de viaje, nivel de ingreso, frecuencia de uso, entre otros.
- 2) Necesidades de uso y operación del sistema. Requeridos por la empresa; horario de servicio, frecuencia de paso, tarifas, horario de operación.

3) Necesidades comunes. Aspectos sugeridos del usuario al operador y a la autoridad: tipo de servicio de seguridad, elementos estéticos en la infraestructura.

Un alto nivel de detalle complica que los encuestados estén interesados en responder la encuesta debido a un mayor tiempo requerido para responder [16].

De acuerdo con [17], los estudios de preferencia declarada son una familia de herramientas de métodos de encuestas para medir las preferencias de las personas basado en la toma de decisiones hipotéticas; la aplicación al transporte de personas y mercancías se puede resumir en los siguientes pasos:

- a) Diseñar una situación hipotética en el cual los residentes se les pide seleccionar modos de transportes disponibles (incluyendo el nuevo servicio propuesto); basado en expectativas de costo y tiempos.
- b) Seleccionar una muestra de personas y aplicar el instrumento.
- c) Examinar las relaciones existentes entre las opciones y sus atributos.
- d) Predecir la demanda de cada modo de transporte, incluido el nuevo servicio.

Así mismo, [18] en [19], las características de una encuesta de preferencia declarada son las siguientes:

- a) La reacción de los usuarios ante las diversas alternativas hipotéticas de viaje.
- b) Las alternativas involucran atributos como: tiempo de viaje, frecuencia de uso, confiabilidad del servicio por mencionar algunas, los cuales se presentan como contraste del servicio actual existente.
- c) Usar técnicas de diseño experimental para evaluar las alternativas, de manera que sean independientes entre los atributos.
- d) El diseño del instrumento debe de ser comprensible para los encuestados de manera que sea realista y concuerde con su experiencia real.
- e) Se deben manejar escalas para identificar la preferencia u opciones más atractivas para los usuarios.
- f) Aplicar técnicas cuantitativas para identificar la preferencia de los usuarios.

Estas metodologías parten inicialmente de aplicaciones al marketing que posteriormente se han ido aplicando en otros rubros como lo son la transportación y otras áreas de interés.

Así mismo [18] en [19], menciona que, para establecer las opciones hipotéticas, se requiere que sean tecnológicamente factibles, las cuales se generan a través de cuatro pasos:

- 1) Identificar las opciones de modo de transporte que se incluirán, las cuales deben ser

realistas para evitar el sesgo en la respuesta, considerando todas las que sean posibles.

2) Definición de atributos para cada opción, los cuales deben ser lo más importantes, de preferencia no mayor a cuatro, para evitar el cansancio del encuestado.

3) Identificación de la unidad de medida por atributo, las cuales pueden ser cualitativas o cuantitativas.

4) Especificación de la cantidad y tamaño por atributo, siendo que mientras más niveles tenga un atributo la percepción del usuario es que éste tiene mayor importancia.

Sin embargo, hay que considerar las limitaciones que tiene este tipo de estudios como son las siguientes:

- La información obtenida puede presentar una alta correlación, por lo cual no se observe una diferenciación en el grado de aceptación de las diferentes alternativas.

- Los atributos cualitativos son difíciles de analizar de forma que se pueda identificar su impacto en el estudio, esto debido a su percepción subjetiva, aunque resultan interesantes para los tomadores de decisiones como lo es seguridad, comodidad, etc.

Dificultad para introducir una opción nueva que difiere a la realidad actual, por lo complejo que le resulta al usuario por encontrarse fuera de su contexto, ya que puede ser un servicio que nunca utilizaría, aunque parezca algo atractivo.

[20] Mencionan que en esta época se dispone de una gran cantidad de información relacionada con movilidad y transporte, aunque aún no se comprende el potencial de la misma. Por supuesto se cuestiona la calidad de información y pertinencia en su contexto.

Las nuevas tendencias en la recolección y análisis de datos hacen énfasis en el uso de tecnologías que permitan que el análisis de grandes datos (big data) requiera nuevas técnicas de recolección y manejo de datos como pueden ser sensores, GPS, e incluso redes sociales. Los autores mencionan [20] que los grandes datos no eliminarán a las encuestas, pero estas deben adaptarse a las nuevas técnicas avanzadas de cómputo en la nube y análisis de datos en tiempo real.

La información se ha convertido en pieza clave de la gran mayoría de actividades realizadas, esta misma ofrece una interesante y tal vez única oportunidad de generar ahorros y mejorar la eficiencia operativa del transporte si y solo si se adoptan técnicas adecuadas de interpretación y manejo, así como si se invierte en la tecnología para generarla y gestionarla y lo más importante si se desarrollan las competencias adecuadas en el capital humano para darle sentido a la misma [21].

Metodología

El presente estudio, planteó estimar la demanda del corredor Centro de Transferencia Modal (CETRAM) Téllez en el Estado de Hidalgo, al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA) en el Estado de México, en el periodo marzo-abril 2022, por medio de una metodología cuantitativa, correlacional descriptiva [22], [23], [24], bajo la premisa de desarrollar un trabajo empírico que permita el análisis del comportamiento de los usuarios potenciales en relación a un nuevo servicio de transporte de pasajeros [25], [26].

Para ello se delimitó el presente estudio a razón de siete tipos de actividades:

- 1.- Definir los reactivos a desarrollar en la encuesta. 2.- Definir la población objetivo.
- 3.- Determinar la muestra estratificada con un nivel de confianza de 97.5%.
- 4- Determinar los puntos de recolección de información. 5.-Definir los grupos y horarios de trabajo (Encuestadores). 6.- Capacitar al grupo de encuestadores.
- 7.- Analizar la información a través de un estudio correlacional para eliminar resultados redundantes.
- 8.- Determinar la demanda potencial del CETRAM Téllez en el Estado de Hidalgo, al Aeropuerto AIFA.

Así, al definir los reactivos a desarrollar en la encuesta, se revisaron mediante técnica de consulta a expertos, por un grupo seis docentes del área de Ingeniería en Logística y Transporte de la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, dos empresarios del transporte público de pasajeros en el área metropolitana del estado de Hidalgo y dos especialistas del Sistema Integrado de Transporte Masivo de Hidalgo, con base en la revisión teórica, se construyeron los reactivos, como se puede ver en la Figura 1.

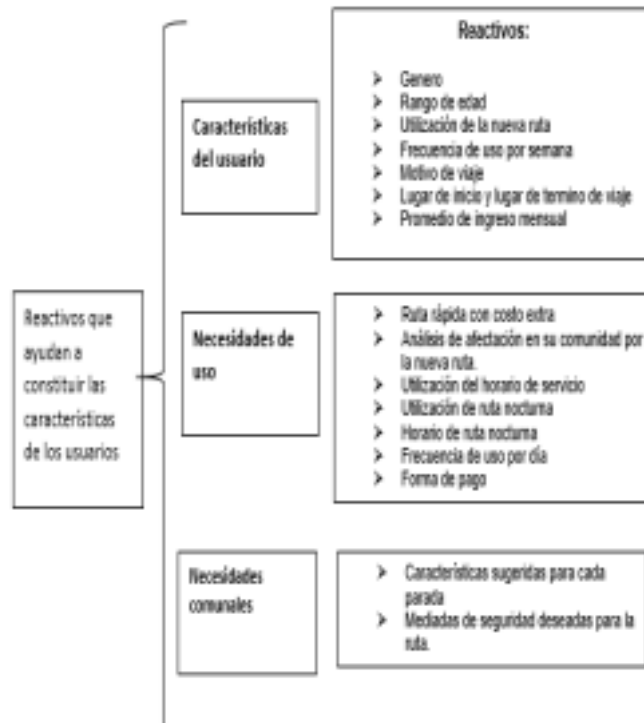


Figura 1. Características de los reactivos. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los reactivos, se identificaron tres necesidades a analizar: las características del usuario, necesidades de uso y comunales.

Posteriormente, se definió la población objetivo, lo anterior a través de la identificación de cada uno de los municipios donde tendría injerencia el proyecto corredor CETRAM Téllez- AIFA, a fin de delimitar las 23 paradas en cada sentido del transporte, como se puede ver en la Figura 2.



Figura 2. Corredor CETRAM Téllez- AIFA. Fuente: Sistema Integrado de Transporte Masivo de Hidalgo (2022).

También se definió junto a los especialistas del Sistema Integrado de Transporte Masivo de Hidalgo (SITMAH), las 9 paradas principales y 23 paradas por cada sentido, ver Tabla 1.

Tabla 1. Principales puntos de parada (DEMANDA)

Principales puntos de parada:
1. CETRAM Tellez
2. Plaza Qubika
3. C5i
4. Acceso Acayuca
5. Acceso Zapotlán
6. Acceso Tolcayuca
7. Acceso Tizayuca
8. Paradas Tizayuca
9. Aeropuerto Santa Lucia

a. Fuente: Sistema Integrado de Transporte Masivo de Hidalgo (2022).

Lo anterior, permitió delimitar primeramente a razón de la población económicamente activa (PEA), y posteriormente a razón del porcentaje de la población a considerar, de acuerdo al análisis del Cuerpo Académico del Programa de Estudios de Ingeniería en Logística y Transportare, así como de los especialistas del Sistema Integrado de Transporte Masivo de Hidalgo, quienes determinaron el grado de influencia, como factor preponderante a fin de interpretar a la Población Económicamente Activa (PEA) a considerar de los municipios cercanos a la ruta estudiada, dando un total de 572,636 personas, esto debido a que son quienes tienen mayor probabilidad de utilizar el servicio debido a sus actividades, cómo se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Población a considerar

Municipio	PEA	% Población Considerada	Población Considerada	% ABS
Pachuca de Soto	200,229	100%	200,229	35.0%
Mineral de la Reforma	133,206	100%	133,206	23.3%
Zempoala	35,902	50%	17,951	3.1%
Zapotlán de Juárez	13,745	50%	6,872	1.2%

Tolcayuca	12,817	50%	6,409	1.1%
Villa de Tezontepec	8,327	50%	4,164	0.7%
Tizayuca	104,852	100%	104,852	18.3%
Zumpango	168,273	10%	16,827	2.9%
Tecámac	328,502	25%	82,125	14.3%
Total	1,005,853		572,636	100.0%

b. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se identificó la muestra a analizar, por medio del plan de muestreo, sobre datos discretos y finitos, como se puede ver en la ecuación (1) [27].

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times (1 - p)}{d^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times (1 - p)}(1)$$

Las características, del plan de muestreo fueron las siguientes, ver Tabla 3.

Tabla 3. Características del muestreo

Características	Valores
1.- Tamaño de la población (N)	572,636
2.- Proporción (p) de la población	0.5
3.- Error estándar (d)	0.035
4.- Nivel de confianza a utilizar en el estudio (1-α)	97.5%
5.- Valor z^2_{α} nivel de confianza (por Tablas)	2.24

c. Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior permitió definir un muestreo de por lo menos 1,022 el cual se redondeó a 1030 encuestas para facilitar la distribución de carga de trabajo en los puntos de levantamiento de información, como se puede observar en la Tabla IV.

Tabla 4. Puntos de recolección de información

Municipio	# Encuestas	Puntos de Recopilación	Encuestadores
Pachuca de Soto	359	11	22
Mineral de la Reforma	239		
Zempoala	33	2	4
Zapotlán de Juárez	13	1	4
Tolcayuca	12		
Villa de Tezontepec	8		
Tizayuca	188	4	16
Zumpango	31	1	4
Tecámac	147	3	12
TOTAL	1,030	22	62

d. Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Una vez definida la planeación, se capacitaron dentro de las instalaciones de la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH) a los 62 encuestadores, tomando como prioridad un mínimo de 1030 encuestas durante las dos semanas que duro el estudio.

El tiempo solicitado para cada encuestador fue de 4 horas al día, y se cubrieron dos semanas de lunes a domingo, con un horario de 7 am a 7 pm; se obtuvieron un total de 3215 encuestas de las cuales se eliminaron 570 por mal llenado, quedando un total de 2645 encuestas validadas, y solamente 730 externaron ser usuarios potenciales frecuentes del sistema.

Una vez delimitada la demanda objetivo dentro de la encuesta (730 personas), se contabilizaron la cantidad de viajes potenciales a realizar por semana; pudiendo realizarse entre semana (lunes a viernes), por días determinados (menos de tres días a la semana), o fines de semana (solo sábado y domingo); obteniendo así la proporción de viajes por día; como se puede observar en la Tabla V.

Tabla 5. Porcentaje de la demanda potencial por día

Día	Usuarios	Porcentaje
Lunes	388	17%
Martes	341	15%
Miércoles	341	15%
Jueves	341	15%
Viernes	388	17%
Sábado	274	12%
Domingo	206	9%
Total	2278	100%

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la encuesta. (los datos fueron ajustados como enteros con un error por redondeo entre +- 1).

Una vez identificada la movilidad por día como se puede ver en la Tabla 5, se procedió a determinar la demanda potencial de usuarios tomando en cuenta la población a considerar; lo anterior se describe al multiplicar la población de 572,636 (en la Tabla II), por el factor denominado porcentaje de usuarios porcentuales el cual se encontró al dividir los 730 usuarios potenciales frecuentes antes mencionados de la muestra entre el total de encuestas obtenidas 2645 lo cual obtiene una proporción del 27.59%.

Los viajeros ocasionales constituyen el 59.65 % de la demanda declarada en las encuestas por lo cual los usuarios potenciales frecuentes constituyen el 40.35 %; este factor multiplica a la proporción total de usuarios potenciales mensuales, resultando así 63,776; finalmente se divide entre 28 días para conocer el valor diario de usuarios.

Cabe mencionar que en esta etapa del estudio se identificaron usuarios potenciales y algunos de los puntos de mayor generación de demanda, de los resultados obtenidos; es notorio que existe un interés por parte de los usuarios hacia este posible servicio debido a la falta de conectividad e integración que existe en la zona, donde los usuarios potenciales manifestaron que también utilizarían el servicio mayormente para hacer viajes entre Tizayuca y CETRAM Téllez

La demanda mensual proyectada (extrapolada al universo) es de 63,776 usuarios. Dando un promedio diario de 2,278 personas a diario. Es notorio que el comportamiento es interurbano, pues los días de mayor demanda proyectada son entre semana teniendo los mayores picos en lunes y viernes con demanda de aproximadamente 388 usuarios y los fines de semana disminuye a 274 en sábado y 206 usuarios en domingo.

También es importante observar que la mayor parte de las personas encuestadas manifestaron utilizar el servicio ocasionalmente en un 59.65%. Sin embargo, es considerable que el número de usuarios manifestó utilizar el servicio por 5 días a la semana; por lo tanto, el presente estudio muestra que dicho corredor presenta características de servicio interurbano con demanda fuerte dentro de la semana.

Además, se observa el sesgo relacionado al periodo de pandemia de la COVID 19 y al periodo de construcción del AIFA, por lo que muchos usuarios eran trabajadores que laboraban en la obra de construcción del aeropuerto, además que está dentro de una zona de escuelas y hospitales que no operaban en su totalidad en el momento de aplicación de la encuesta.

Dentro de las recomendaciones, y de acuerdo a proyecciones de la Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU), en 2020, a través del documento titulado “Planeación Urbana y el Ordenamiento Territorial en la Zona Norte del Valle de México” (con énfasis en el Proyecto Aeroportuario de Santa Lucía) [PTO-ZNVM]; una de las principales problemáticas detectadas fue la movilidad deficiente y fragmentada que se vive en la región.

La problemática detectada por la SEDATU en 2019 a través de las mesas de planeación estratégica participativa fueron las siguientes:

- Falta de interconectividad intermunicipal
- Falta de planificación urbana (PIMUS, PTO, PMDU) · Ausencia de transporte masivo (desconectado y segmentado).

Conclusiones

Acorde con el análisis observado se puede concluir que:

-El corredor tiene un gran potencial en el mediano y largo plazo como integrador de la movilidad de la zona metropolitana de Pachuca; alineado con el plan de ordenamiento territorial de la zona norte del valle de México; sistematizando, masificando e integrando la transportación de la región.

-Debido a la proyección de crecimiento poblacional estimada por la SEDATU en 2020 (300 mil habitantes en municipios circundantes al aeropuerto al 2032), se espera en

la región se considere una opción viable el iniciar el corredor con una demanda baja; esperando que en el mediano plazo el crecimiento incremental del número de usuarios de manera exponencial; por lo cual, se recomienda planear el corredor por etapas e irlo desarrollando.

-El desarrollo de los centros de transferencia modal “CETRAMS” (AIFA, Tizayuca), El clúster del parque industrial PLATAH generará un proceso natural de generación atracción de viajes que impactará directamente en el corredor Tizayuca-Pachuca con un crecimiento poblacional importante, el cual demandará mayores y mejores servicios de conectividad y transporte; donde los sistemas masivos juegan un rol primordial.

- Redundancia de rutas: Se identificaron una gran cantidad de servicios y rutas que comparten gran distancia del recorrido (redundancia), por lo cual se considera como competencia directa al servicio en una gran parte del camino.

El servicio al ser considerado un BRT (autobús de tránsito rápido) Ligero, en su primera etapa, puede operar con el mínimo equipamiento, (solo paradas básicas identificadas), conforme incrementalmente la demanda se deberá mudar a un sistema BRT completo con estaciones.

Se sugiere en su etapa inicial proteger el servicio a través de medidas que eviten la cannibalización del servicio por parte de la competencia como son:

-Carril preferente (semiconfinado) en tramos urbanos. -Corredor señalizado perfectamente (horizontal y vertical).

-Uso de tecnologías de la información y comunicación y aplicaciones.

-Sistemas de cobranza mixto (automatizado y en efectivo).

Cabe mencionar que es un corredor extremadamente largo (40km.) por lo cual, el consumo de combustible es un factor a considerar en la operación. Será de suma importancia el migrar a energías alternativas (eléctrico) en el mediano plazo como opción sustentable.

Es importante seguir monitoreando el corredor y actualizar el estudio sin los sesgos de pandemia y construcción del aeropuerto, utilizando modelos econométricos más sofisticados como logita, probar o panel de datos para validar con mayor calidad la información, la cual en este caso fue a solicitud de la secretaria de movilidad para solo identificar demanda potencial del servicio.

El cuerpo académico de la ingeniería en logística y transporte de la UPMH agradece el apoyo de la secretaria de Movilidad del Estado de Hidalgo y del Sistema Integrado de Transporte Masivo del Estado de Hidalgo por el apoyo brindado para la realización del estudio.

Referencias

- [1] Banister, D. (2020). *Transport and mobility for sustainable cities*, Routledge.
- [2] Bel, G., & Faced, X. (2018). Airports, tourism, and economic development: An analysis of the Spanish case. *Journal of Transport Geography*, 66, 36-43.
- [3] Graham, A. (2018). *Understanding airports: International airports and airport systems*. Routledge.
- [4] Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (2021). Programa Institucional 2021-2024 de la empresa de participación estatal mayoritaria Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles.
- [5] Coronado, J. (2022). Estudio de Impacto Socioeconómico del Nuevo Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles. Gobierno del Estado de México.
- [6] Deloitte. (2023). Nuevo Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles: Evaluación de Impacto Económico. Recuperado de <https://www2.deloitte.com/mx/es/pages/real-estate/articles/nuevo-aeropuerto-internacional-felipe-angeles.html>
- [7] González, F., & Cardozo, O. D. (2020). Transporte público en América Latina y el Caribe: Aspectos clave para su diseño e implementación. Banco Interamericano de Desarrollo.
- [8] Red de Transporte de Pasajeros. (2022). BRS: El transporte público del Valle de México. Recuperado de <http://www.rtp.gob.mx/brs/>
- [9] Gobierno del Estado de Hidalgo. (2021). Pachuca de Soto. Recuperado de <https://www.hidalgo.gob.mx/hidalgo/municipios/pachuca-de-soto/>
- [10] INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- [11] Hogback, A. (2022). The Role of Public Transportation in Economic Development. *Journal of Public Transportation*, 25(2), 27-41.
- [12] O'Connell, J. F. (2021). Economic Impacts of Airports. In *The Routledge Companion to Air Transport Management* (pp. 429-440). Routledge.
- [13] Fox C. (2018) *Data Science for Transport: A Self-Study Guide with Computer Exercises*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72953-4>
- [14] Kores, E. P., & Sheldon, R. J. (1988). Stated preference methods: an introduction. *Journal of transport economics and policy*, 11-25.
- [15] Bonne P., Lee- Gosselin M., Mud J., Madre JL (2009). *Transport Survey Methods Keeping up with a changing world*. Emerald.
- [16] Richardson A., Amp E., Maybug A., (1995). *Survey Methods for Transport Planning*. Eucalyptus Press.
- [17] Kizaki H., Nakatani T., Sato K. (2015). *Stated Preference Methods Using R*. CRC Press
- [18] Ortúzar, J. de D. (2000). *Modelos de demanda de Transporte*. Segunda Ed., Alfaomega, México, D.F.
- [19] Iberas, A., González, F., Dell 'Olio, L., & Moura, J. (2015). *Manual de Encuestas de Movilidad: Preferencias Declaradas*.
- [20] Bonn el, P. Munizaga, M. (2018). Transport Survey methods in the era of big data facing new and old challenge. *Transportation Research Procedia*, 32 (2018) 1-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518301522>
- [21] Fox C. (2018) *Data Science for Transport: A Self-Study Guide with Computer Exercises*. Springer.
- [22] Hernández, R. (2005) *Metodología de la investigación*. 4ta edición, McGraw-Hill, México.
- [23] Angi, M. (2010) *Metodología de la investigación*. Limusa, México, 250-289.
- [24] Torres, Z. and Navarro, J. (2007) *Conceptos y principios fundamentales de Epistemología y de Metodología*. IIEE, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- [25] Richardson A., Ampo E., Mey Burg A., (1995). *Survey Methods for Transport Planning*. Eucaliptus Presos.
- [26] Cruz Aldana, E. & Guerrero Azpeitia, L.A. (2021). Desempeño y competencias directivas en el Auto-transporte Público de Carga en Seco. Una revisión empírica en el centro de México. *Religación. Revista De Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(30), 1-18. <https://doi.org/10.46652/rgn.v6i30.869>
- [27] UNAD (s.f.) *Estadística Básica Unidad 3. Medidas de tendencia central y de dispersión*.
- [28] https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSA/BLOQUE1/AET/01/AEBA/U3/descargables/EBA_U3_contenido.pdf

Capítulo 16

Accesibilidad espacial del nuevo aeropuerto de Tulum. Una cuantificación espacial de los beneficios potenciales del nuevo aeropuerto

Alfonso Herrera García, Abraham Cortés Ronquillo

Resumen— Con la construcción del Aeropuerto Internacional de Tulum (AIT) se pretende mejorar la oferta de infraestructura aeroportuaria para diversificar la demanda de pasajeros en la Riviera Maya. Este complejo aeroportuario está ubicado en un terreno de mil 200 hectáreas, al sureste de la Ciudad de Tulum, en el Estado de Quintana Roo; tendrá una capacidad para atender a 5.5 millones de usuarios anuales. También, tendrá una base aérea militar, que va a fortalecer la seguridad y vigilancia del espacio aéreo nacional. El objetivo de este artículo es estimar los beneficios potenciales de la operación de este aeropuerto, con base en su accesibilidad espacial. Para ello, se establecieron dos escenarios: el primero sin dicha infraestructura y el segundo con ella ya ofreciendo servicio. En ambos casos además de determinar las isócronas de recorrido, se estimaron los cocientes del tiempo de accesibilidad a la localidad entre los habitantes de la misma (C_{vh}). Los resultados indican que la construcción del AIT apoyará al desarrollo de la región, detonando el crecimiento turístico, económico y social, al reducir los tiempos de traslado (38.13 %) hacia sus zonas arqueológicas. Además, su base aérea militar, reducirá los tiempos de traslado para auxiliar a la población civil en casos de desastres y para combatir los incendios forestales. Con la incorporación del aeropuerto ya no habrá localidades con tiempos de traslado mayores a cuatro horas y la mayoría (99.91 %) se ubicarán en sitios con tiempos de traslado menores a tres horas. Los modelos de accesibilidad espacial establecidos, también sirven para detectar las áreas con los mayores tiempos de traslado, y para ayudar a explorar los requerimientos de nueva infraestructura.

Palabras Clave—accesibilidad espacial; aeropuerto; célula de pertenencia; isócrona; sistema de información geográfica; Tulum.

Introducción

La Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) está a cargo de la construcción del Aeropuerto Internacional de Tulum, el cuál será futuro activo de la empresa Grupo Aeroportuario, Ferroviario y de Servicios Auxiliares Olmeca-Maya-Mexica Sociedad Anónima de Capital Variable.

Esta infraestructura (Aeropuerto Felipe Carrillo Puerto) es un proyecto fundamental para el desarrollo económico de la región, en particular en el corredor de Playa del Carmen-Tulum-Chetumal, integrándolo con el sistema carretero actual y con el Tren Maya en construcción.

Con este aeropuerto se pretende mejorar la oferta de infraestructura aeroportuaria para diversificar la demanda de pasajeros en la Riviera Maya; y con ello detonar el crecimiento turístico, económico y social de la región, potenciando el acceso a mayor número de zonas arqueológicas del mundo maya (Figura 1).



Figura 1. Arreglo arquitectónico del Aeropuerto Internacional de Tulum.

Este complejo aeroportuario está ubicado en un terreno de mil 200 hectáreas (polígono de dos por seis kilómetros), al sureste de la Ciudad de Tulum, sobre el municipio de Felipe Carrillo Puerto, en el ejido Chunyaxché, en el Estado de Quintana Roo (Figura 2).

El sitio fue definido con base en un extenso análisis de todas las dependencias involucradas, con objeto de cumplir con todos los requisitos ambientales, arqueológicos y sobre todo de resiliencia.

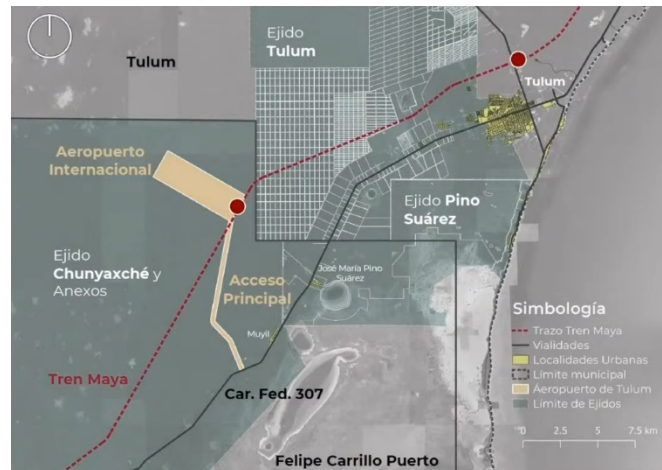


Figura 2. Ubicación del Aeropuerto Internacional de Tulum.

Este aeropuerto internacional tendrá una capacidad para atender a 5.5 millones de pasajeros anuales, con una oferta de alta gama de servicios aeroportuarios; por lo que se convertirá en el segundo aeropuerto más grande de la Península de Yucatán.

Además, esta infraestructura tendrá una base aérea militar polivalente, que va a fortalecer la seguridad y vigilancia del espacio aéreo nacional, auxiliará a la población civil en casos de desastres y atenderá los incendios forestales.

Adicionalmente al aeropuerto, existirá un corredor comercial y de servicios de 10.5 kilómetros de longitud con un ancho de 300 metros, que interconectará la carretera federal 307 con el complejo aeroportuario, para desarrollar una ciudad aeroportuaria e inclusive reordenará el crecimiento urbano hacia ese corredor. El aeropuerto internacional también estará conectado con la infraestructura del Tren Maya.

El aeropuerto tendrá una pista de tres mil 700 metros de longitud por cuarenta y cinco metros de ancho (Figura 3), por lo que será la más grande y de mejor calidad e instrumentación del sureste del país; de esta forma complementará los servicios aeroportuarios existentes en la Península de Yucatán.

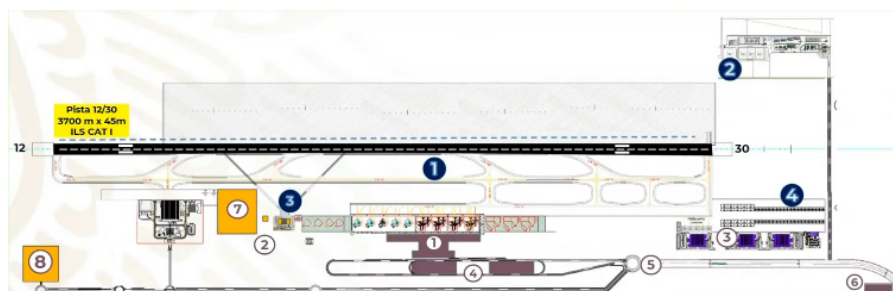


Figura 3. Vista en planta del Aeropuerto Internacional de Tulum.

En la vista en planta del aeropuerto se pueden identificar las siguientes instalaciones:

Lado aire:

- Pista, plataformas y calles de rodaje
- Terminal de combustible (seis millones de litros)
- Servicio de salvamento y extinción de incendios (SEI)
- Plataforma para aeronaves de ala fija y rotativa

Lado tierra:

- Edificio terminal de pasajeros (5.5 millones de pasajeros anuales)
- Torre de control de tránsito aéreo
- Aviación general
- Estacionamientos de pasajeros, empleados, taxis y autobuses
- Vialidades de acceso
- Estación del Tren Maya
- Terminal de carga
- Planta de tratamiento de residuos sólidos

En este proyecto la SEDENA ha estado trabajando desde el 2020. De acuerdo con el programa de trabajo desde finales de 2020 y principios de 2021 se estableció la propuesta conceptual del nuevo aeropuerto. Posteriormente, durante el resto de 2021 se elaboró el anteproyecto y se realizó la selección y adquisición del predio para la obra. Después, en 2022 se realizaron los estudios requeridos y se preparó el proyecto ejecutivo. Ese mismo año se inició la construcción de la base aérea militar y del aeropuerto civil internacional. Además, en el último cuatrimestre de 2022 se inició el equipamiento general. La base aérea militar deberá terminarse en los primeros meses de 2023 y el aeropuerto en diciembre de ese año, incluyendo todo su equipamiento. El programa establece que las pruebas y certificación del aeropuerto se deben realizar en el primer cuatrimestre de 2024. Por lo cual está programado el inicio de su operación en mayo de 2024 [1 y 2].

En cuanto al programa presupuestario, de acuerdo con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), el monto total de inversión fue de \$15,559,272,226.00; este monto considera la suma de la totalidad de recursos destinados a la ejecución del proyecto (incluyendo los recursos fiscales y los que se obtienen de otras fuentes de financiamiento).

En lo que corresponde al lado aire, el programa presupuestario establece como meta física: una pista de operaciones; calles de rodaje de pavimento asfáltico de 10 cm de espesor; plataformas para aviación comercial, general y de carga de pavimento asfáltico, también de 10 cm de espesor; estacionamiento para helicópteros; zona de hangares; señalización; y equipo de ayuda a la navegación.

Para el lado tierra, el proyecto considera un edificio terminal, a base de concreto hidráulico, y una estructura metálica con áreas como: vestíbulo, sala de documentación, punto de inspección, sala de última espera, salas de reclamo de equipaje, migración, aduana, áreas comerciales y áreas de estacionamiento de pavimento asfáltico.

Además, dicho programa señala los beneficios intangibles esperados del proyecto:

- a) Atención oportuna en funciones de vigilancia del espacio aéreo en la frontera sureste.
- b) Atención oportuna y estratégica ante las afectaciones por eventos meteorológicos y desastres naturales [3].

El objetivo de este artículo es estimar los beneficios potenciales de la operación del nuevo aeropuerto de Tulum, para ello se utilizaron los fundamentos de la accesibilidad espacial. En el siguiente inciso se presentan los principios de esta técnica y se aplican al caso de la nueva infraestructura.

Metodología y Aplicación

La accesibilidad espacial

En estudios anteriores han sido evaluadas distintas alternativas para determinar el área de influencia de un aeropuerto [4 y 5], por ejemplo, mediante polígonos de Thiessen, polígonos de distancia media con base en puntos equidistantes en la traza carretera o el método de accesibilidad espacial. Aunque se podría utilizar cualquiera de estos métodos, dependiendo de la información y recursos disponibles, en este artículo se optó por el método de accesibilidad espacial, también conocido como de isócronas de recorrido. Este método es más robusto y preciso que los otros dos, debido a que utiliza más variables en su desarrollo.

El método de accesibilidad espacial mejora la delimitación del área de influencia, debido a que, a diferencia de los otros dos, no supone condiciones de espacio isotrópico, que evidentemente en el mundo real no se presentan dado que existen, por ejemplo, impedancias originadas por la orografía del terreno, las vías de comunicación y las velocidades de operación, y porque suele haber más de un objetivo en la región bajo estudio.

Por otra parte, la técnica de accesibilidad espacial incorpora modelos digitales de elevación (agregando características tridimensionales), así como las velocidades de desplaza-

miento y las características geométricas de la infraestructura carretera. Como resultado de estas consideraciones se obtienen isócronas de recorrido, es decir, áreas que muestran el mismo tiempo de desplazamiento desde uno o varios objetivos de interés.

La finalidad de utilizar este método es delimitar con mayor precisión el área de influencia (que se denominará como “célula o región de pertenencia”) de los aeropuertos bajo estudio, con respecto a los aeropuertos circundantes.

La accesibilidad se calcula a partir de una superficie de fricción; esta consta de una cuadrícula bidimensional, en donde cada celda de la cuadrícula representa la impedancia existente en el terreno para el desplazamiento en esa celda.

Los elementos de impedancia considerados para este estudio fueron la velocidad de desplazamiento, según el tipo de carretera; la pendiente del terreno; y la modalidad de transporte utilizado (vehículo automotor). Dichos elementos condicionantes quedaron plasmados como el valor de impedancia de cada celda; el cual representa el costo de desplazamiento en ella, dicho valor puede ser representado en términos monetarios, de tiempo de viaje, de desgaste del vehículo, etcétera. En particular, para este estudio la accesibilidad fue expresada en términos de “tiempo de recorrido”.

La malla de transporte (tiempo de viaje constante) se ve afectada por la malla de fricción (impedancia) y los resultados quedan representados en imágenes con áreas de igual valor (isócronas) y pueden ser aplicados a objetivos, según convenga, de uno a uno, de uno a muchos o de muchos a muchos.

De esta forma se obtuvo la información del tiempo de desplazamiento, según las condiciones del terreno y la infraestructura carretera hacia los aeropuertos, con respecto a los colindantes.

Una última consideración para los modelos desarrollados se relaciona con la forma en la que se comparan los resultados. Las isócronas de recorrido ofrecen resultados precisamente en términos del tiempo, pero además es conveniente relacionar ese tiempo con la población que se atiende.

Para ello, se propuso estimar el cociente del tiempo de accesibilidad a la localidad entre los habitantes de la misma ($C_{t/h}$). En este caso mientras menor sea el valor, mejor es el resultado; puesto que se requiere de menos tiempo para atender a cada habitante.

También, se puede estimar el cociente de la cantidad de habitantes por localidad entre el tiempo de accesibilidad a dicha localidad ($C_{h/t}$). En este caso mientras mayor sea el valor, mejor es el resultado, dado que se estará atendiendo a una mayor cantidad de personas por unidad de tiempo. Observe que,

$$C_{h/t} = 1/C_{t/h} \quad (1)$$

Aplicación de la metodología

Para estimar los beneficios potenciales de la operación del nuevo Aeropuerto Internacional de Tulum se establecieron dos escenarios: el primero sin dicho aeropuerto (escenario actual) y el segundo con el aeropuerto ya ofreciendo servicio (escenario futuro). En ambos casos además de determinar las isócronas de recorrido se estimaron los valores de $C_{t/h}$.

Es importante mencionar que en particular para la elaboración de los modelos se utilizaron los programas QGIS y ArcMap, versiones 3.16 (Hannover) y 10.2.2 respectivamente. El primero, es un programa libre de código abierto, que se empleó para establecer las células de pertenencia; y el segundo, es el componente principal del conjunto de programas de procesamiento geoespacial ArcGIS, que se utilizó para editar, analizar los datos geoespaciales y dar formato final a los mapas. Para estimar las isócronas de recorrido se utilizó la extensión TTCSM (Travel Time Cost Surface Model) en Arc Map.

Después de armar las capas necesarias y delimitar la zona de estudio en un sistema de información geográfica se obtuvieron los siguientes modelos bajo las consideraciones señaladas antes.

En la Figura 4 se presenta el modelo de las distintas zonas de influencia (líneas negras) de los principales aeropuertos en la Península de Yucatán, delimitadas por sus respectivas células de pertenencia, sin considerar aún al Aeropuerto Internacional de Tulum. Además, en este modelo se estimaron los distintos tiempos de traslado desde los aeropuertos, mediante cinco escalas de colores; y se muestra también la red nacional de caminos [6].

Con objeto de visualizar, cómo se distribuye la población en las distintas zonas de influencia, en la Figura 5 se observa el modelo anterior, pero ahora se le han incorporado en forma georreferenciada las localidades que alojan [7].

En la Figura 6 se muestra el modelo de las distintas zonas de influencia considerando ahora al Aeropuerto Internacional de Tulum; como en el primer modelo, se estimaron los distintos tiempos de traslado desde los aeropuertos y se muestra la red nacional de caminos [6]; y en la Figura 7 se observa el modelo anterior, pero ahora incorporando a las localidades que contiene [7].

Por último, con objeto de realizar análisis más detallados de los efectos de la construcción del aeropuerto de Tulum, en la Figura 8 se muestra un modelo con su célula de pertenencia, cuando aún está sin operar, y en la Figura 9 cuando ya está construido y operando.

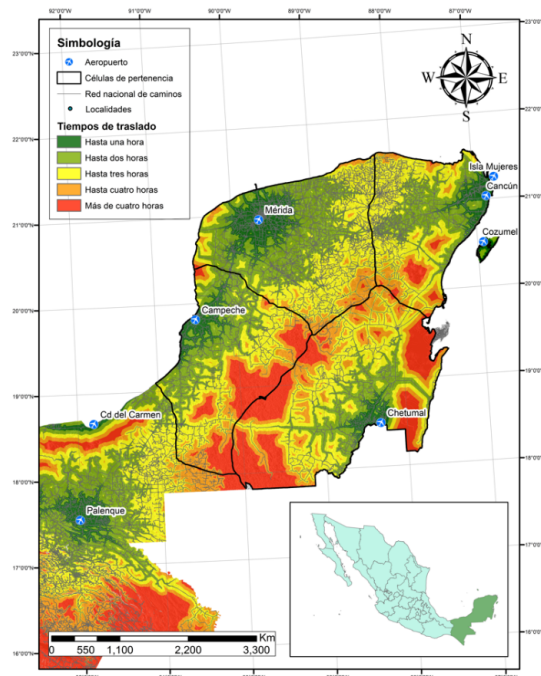


Figura 4. Zonas de influencia de los aeropuertos en la Península de Yucatán sin el Aeropuerto Internacional de Tulum.

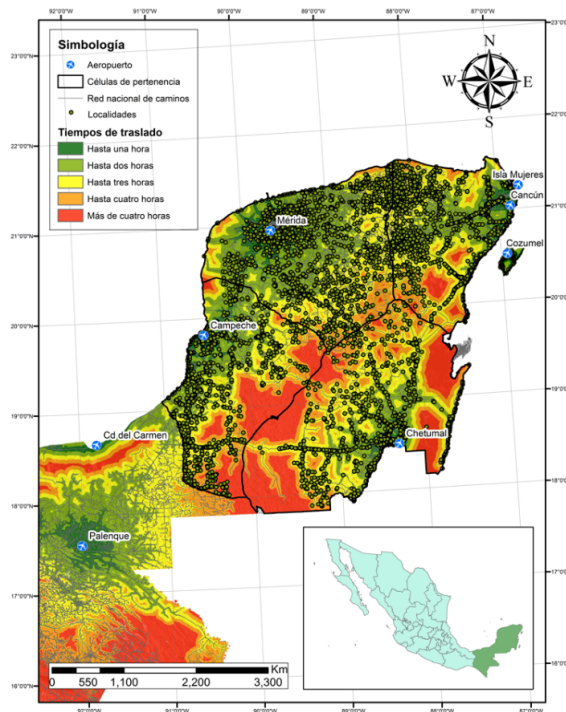


Figura 5. Localidades y zonas de influencia de los aeropuertos en la Península de Yucatán sin el Aeropuerto Internacional de Tulum.

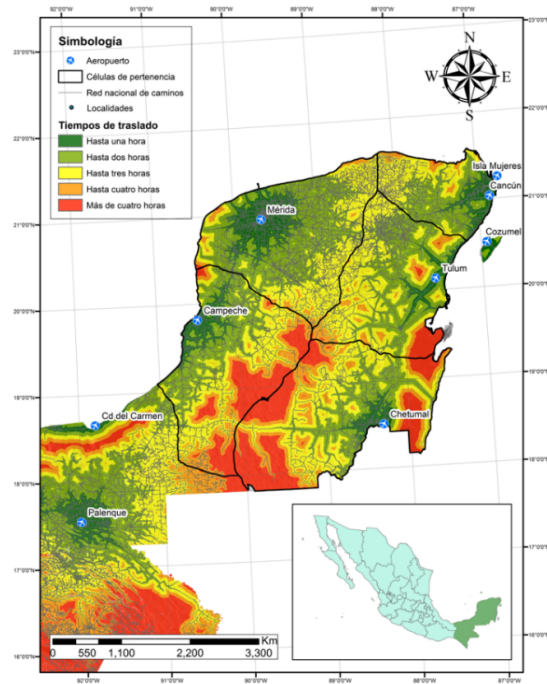


Figura 6. Zonas de influencia de los aeropuertos en la Península de Yucatán considerando al Aeropuerto Internacional de Tulum.

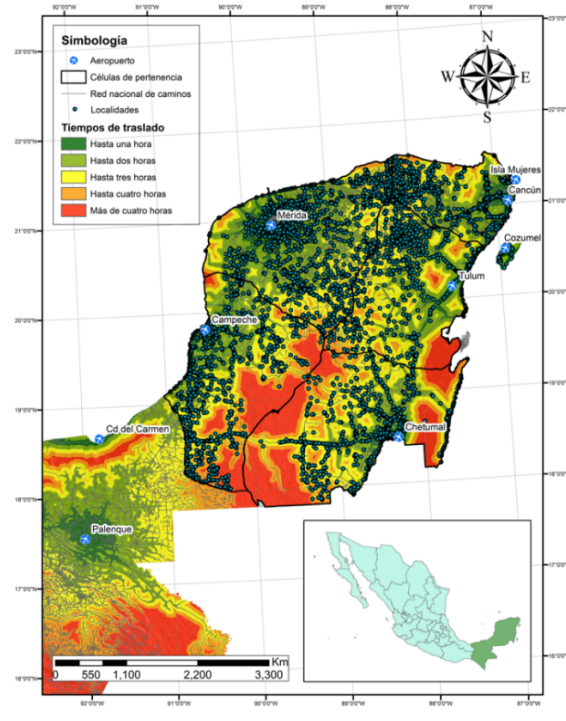


Figura 7. Localidades y zonas de influencia de los aeropuertos en la Península de Yucatán considerando al Aeropuerto Internacional de Tulum.

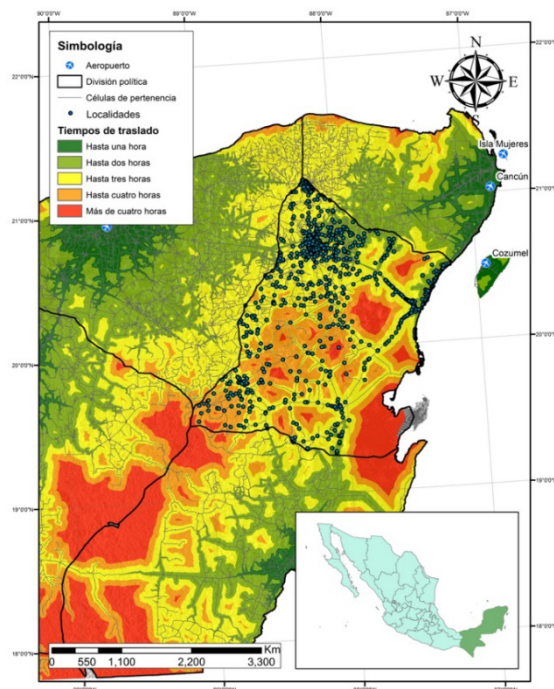


Figura 8. Zona de influencia del Aeropuerto Internacional de Tulum antes de su construcción.

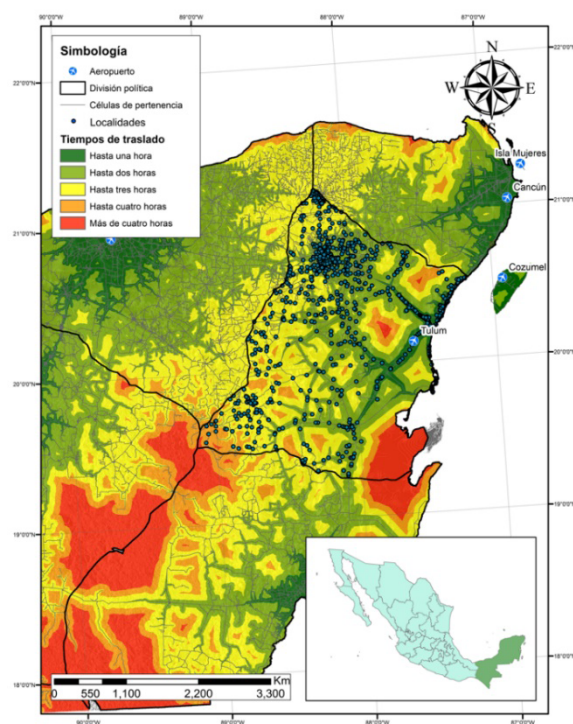


Figura 9. Zona de influencia del Aeropuerto Internacional de Tulum después de su construcción.

Discusión y Análisis de Resultados

Las zonas de influencia de los principales aeropuertos en la Península de Yucatán son muy extensas, en particular referidas a los aeropuertos de Chetumal, Mérida, Campeche y Cancún (Figura 4).

La excepción corresponde a aquellos aeropuertos ubicados en Isla Mujeres y Cozumel, en estos casos debido precisamente a que están aislados de comunicación terrestre con la zona continental. Además, cabe señalar que el aeropuerto de Isla Mujeres sólo es de uso militar y no de aviación comercial regular; por otra parte, aunque el aeropuerto de Cozumel sí tiene vuelos comerciales, en 2022 sólo atendió a 663,270 pasajeros [8].

También, se debe mencionar la existencia de otros aeropuertos en la península, que no fueron considerados en los análisis. Tal es el caso del aeropuerto de Playa del Carmen, debido a que tiene poca actividad, su pista es muy corta (715 m) y sólo atiende aviones pequeños y medianos; y al aeropuerto de Chichén-Itzá, el cual, aunque es internacional también tiene muy poca actividad, en 2022 no atendió vuelos comerciales de pasajeros [8].

El modelo inicial, en el que no se considera al aeropuerto de Tulum, establece que las extensiones de las zonas de influencia de los aeropuertos, ordenadas de mayor a menor son: Chetumal, 41,787 km²; Mérida, 34,122 km²; Campeche, 29,272 km²; y Cancún 23,160 km².

Por otra parte, la población (referida al censo del año 2020) que aloja cada una de estas zonas (Figura 5), nuevamente ordenadas de mayor a menor son: Mérida, 2,129,841 habitantes; Cancún, 1,616,150 habitantes; Campeche, 562,006 habitantes; y Chetumal, 393,693 habitantes.

Así, cuando todavía no se considera al nuevo aeropuerto de Tulum, la mayor zona de influencia en extensión territorial corresponde al aeropuerto de Chetumal (32.56 %), sin embargo, no le corresponde el mayor número de habitantes, por el contrario, debido a su menor densidad de población, de las cuatro consideradas, es la zona con la menor cantidad de habitantes (8.37 %).

También, es notable que, aunque el aeropuerto de Cancún posee la zona de influencia con la menor extensión territorial, ocupa el segundo lugar en cuanto a población contenida (34.37 %), sólo por abajo del aeropuerto de Mérida (45.3 %).

En cuanto a la redistribución de las superficies de las distintas zonas de influencia, al incorporarse el nuevo Aeropuerto Internacional de Tulum (Figura 6), el modelo establece los siguientes valores, ordenados de mayor a menor: Chetumal, 33,611 km²; Mérida, 29,444 km²; Campeche, 29,201 km²; Tulum, 24,062 km²; y Cancún, 12,023 km². Como se aprecia, el área de influencia de Campeche es la superficie que menos se reduce; en cambio Cancún es la que más disminuye.

En lo que respecta a población contenida en las distintas células de pertenencia (Figura 7) los resultados son: Mérida, 2,072,060 habitantes; Cancún, 1,377,135 habitantes; Campeche, 562,006 habitantes; Tulum, 374,618 habitantes; y Chetumal, 315,871 habitantes.

Como se observa, tanto en extensión territorial de su zona de influencia, como en población contenida, el aeropuerto de Tulum ocupa la posición cuatro de los cinco aeropuertos considerados (18.75 % y 7.97 %, respectivamente).

En las Tablas 1 y 2 se presenta un resumen de los principales resultados estimados por los modelos de accesibilidad espacial.

Tabla 1. Sin el aeropuerto de Tulum (población y área de influencia)

Aeropuerto	Campeche	Cancún	Chetumal	Mérida	Totales
Población (habitantes)	562,006	1,616,150	393,693	2,129,841	4,701,690
Porcentaje	11.95%	34.37%	8.37%	45.30%	100.00%
Superficie (km²)	29,272	23,160	41,787	34,122	128,341
Porcentaje	22.81%	18.05%	32.56%	26.59%	100.00%

Tabla 2. Con el aeropuerto de Tulum (población y área de influencia)

Aeropuerto	Campeche	Cancún	Chetumal	Mérida	Tulum	Totales
Población (habitantes)	562,006	1,377,135	315,871	2,072,060	374,618	4,701,690
Porcentaje	11.95%	29.29%	6.72%	44.07%	7.97%	100.00%
Superficie (km²)	29,201	12,023	33,611	29,444	24,062	128,341
Porcentaje	22.75%	9.37%	26.19%	22.94%	18.75%	100.00%

Al comparar las isócronas de recorrido se observa que cuando no existe el aeropuerto de Tulum (Figura 8), diversas localidades tienen tiempos de recorrido de hasta cuatro horas (zonas naranjas) o más de cuatro horas (zonas rojas); en cambio, cuando ya se cons-

truye dicho aeropuerto (Figura 9), se reducen dichos tiempos hasta tres horas (zonas amarillas) y desaparecen los tiempos mayores a cuatro horas para cualquier localidad.

Del mismo modo, en el caso sin aeropuerto, los tiempos de traslado de hasta tres horas (áreas amarillas) disminuyen con la implementación del nuevo aeropuerto, con tiempos de traslado de una o hasta dos horas (zonas verdes).

De acuerdo con la escala de colores utilizada esto significa que las áreas de mayores tiempos de traslado disminuyen notablemente, lo que implica que se atiende con mayor rapidez a la población de dicha zona de influencia, en comparación con la condición previa (sin el aeropuerto de Tulum).

Por ejemplo, sin el aeropuerto de Tulum se atiende a una población de 22,954 habitantes, en 7 localidades, con tiempos de traslado de hasta una hora (zonas verdes oscuro); en cambio, con el aeropuerto e Tulum en operación, para ese mismo tiempo de traslado, se atendería a una población de 102,037 habitantes, en 236 localidades, lo cual representa una mejora significativa (Tabla 3).

Tabla 3. Localidades y habitantes atendidos, sin y con el aeropuerto de Tulum, para diferentes tiempos de traslado

Tiempo de traslado	Sin aeropuerto		Con aeropuerto	
	Localidades	Habitantes	Localidades	Habitantes
Hasta una hora	7	22,954	236	102,037
Hasta dos horas	518	246,866	721	315,740
Hasta tres horas	898	370,160	916	374,296
Hasta cuatro horas	919	374,593	920	374,618
Más de cuatro horas	920	374,618		

Por otra parte, al estimar la sumatoria de los cocientes $C_{t/h}$ respectivos, que relacionan los tiempos de accesibilidad con la población de cada localidad, sin y con el nuevo aeropuerto (figuras 8 y 9), considerando la nueva zona de influencia creada por la infraestructura del aeropuerto de Tulum, se obtuvieron los siguientes valores respectivamente: 551.71 horas/habitante y 399.39 horas/habitante.

Como se observa en el escenario sin el aeropuerto de Tulum, la suma de los tiempos de distribución por habitante presenta el valor más alto. En cambio, cuando se considera la operación del aeropuerto de Tulum, la suma de los tiempos de distribución por habitante se reduce en 38.13 %, en comparación con el caso actual.

Comparación de escenarios

Escenario	Sumatoria de $C_{t/h}$ (horas/habitante)	Reducción del tiempo de atención en comparación con el escenario actual
Actual (sin el aeropuerto de Tulum)	551.71	38.13 %
Modificado (con el aeropuerto de Tulum)	399.39	

Conclusiones

La construcción del Aeropuerto Internacional de Tulum modifica en forma apreciable la zona de influencia de los aeropuertos actuales y reduce los tiempos de traslado (38.13 %) hacia la zona centro y sur de la Riviera Maya. Desde luego apoyará al desarrollo económico, detonando el crecimiento turístico, económico y social de la región, al ofrecer menores tiempos de traslado hacia las zonas arqueológicas de dicha zona.

Además, la base aérea militar polivalente, ubicada en el mismo aeropuerto, para fortalecer la seguridad y vigilancia del espacio aéreo nacional, reducirá los tiempos de traslado (38.13 %), auxiliando oportunamente a la población civil en casos de desastres y combatiendo los incendios forestales.

Con la incorporación del aeropuerto de Tulum (Figura9) ya no hay localidades con tiempos de traslado mayores a cuatro horas (áreas rojas) y quedan muy pocas (cuatro) con tiempos de traslado mayores a tres horas (zonas naranjas). La mayoría de las localidades (99.91 %) se ubican en zonas con tiempos de traslado menores a tres horas (áreas verdes y amarillas).

Las isócronas de recorrido en los modelos de accesibilidad espacial, definidas mediante superficies de distintos colores en los mapas mostrados, también sirven para detectar con facilidad aquellas zonas que tienen los mayores tiempos de traslado, por lo que ayudan a explorar los requerimientos de nueva infraestructura, con objeto de reducir los tiempos para tener acceso a los servicios de transporte aéreo comercial, o para recibir auxilio desde el aeropuerto, en casos de desastre.

La determinación de los tiempos de accesibilidad, mediante las isócronas de recorrido, no sólo hace visibles estas magnitudes, sino que además, mediante el sistema de información geográfica, permite determinar específicamente qué localidades están situadas en determinado tiempo de accesibilidad y también, el tamaño de su población.

Otro beneficio adicional del nuevo aeropuerto de Tulum es que los tiempos de distribución de vacunas, en casos de emergencia, como la presentada por COVID-19, se reducen.

Antes las vacunas llegaban a los aeropuertos de Cancún y Chetumal; con esta nueva infraestructura se podrán recibir las vacunas directamente en Tulum y distribuir más rápido, lo cual es crucial en estos casos.

Reconocimientos

Los autores agradecen el apoyo del Instituto Mexicano del Transporte y del Laboratorio Nacional de Sistemas de Transporte y Logística, para la elaboración de este artículo.

Referencias

- [36] <https://www.Youtube.Com/watch?V=3ans7fobcpa>
- [37] <https://www.Gob.Mx/presidencia/articulos/version-estenografica-conferencia-de-prensa-del-presidente-andres-manuel-lopez-obrador-del-20-de-febrero-de-2023>
- [38] https://www.Transparenciapresupuestaria.Gob.Mx/es/ptp/ficha_opa#21071170019
- [39] Herrera, a., Martínez antonio, j. Y gonzález j. (2009). Determinación del potencial de carga aérea en aeropuertos alternos: una propuesta metodológica. Publicación técnica no 323. México: instituto mexicano del transporte, 2009. Disponible en: <https://imt.Mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt323.Pdf>
- [40] Herrera, a., Martínez antonio, j., Moreno, m., González, j., Backhoff, m. Y mauro, e. *Diagnóstico del transporte aéreo comercial en el estado de oaxaca*. Publicación técnica no 421. México: instituto mexicano del transporte, 2014. Disponible en: <https://imt.Mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt421.Pdf>
- [41] <https://www.Inegi.Org.Mx/app/biblioteca/ficha.Html?Upc=889463770558>
- [42] <https://www.Inegi.Org.Mx/app/descarga/ficha.Html?Tit=326108&ag=0&f=csv>
- [43] <https://www.Gob.Mx/afac/acciones-y-programas/estadisticas-280404>
- [44]

Capítulo 17

Alternativa de solución para reducir emisiones contaminantes en una intersección semaforizada utilizando microsimulación

María del Carmen Escobar Castor; Dasiel Díaz Sanchidrian; José Alfredo Jiménez García; Salvador Hernández González, Vicente Figueroa Fernández, Luis Ángel Toledo Aguilar

Resumen—Este estudio aborda la problemática del tráfico vehicular en la intersección de la avenida Tecnológico y México-Japón en la ciudad de Celaya (Guanajuato, México) y su impacto en la emisión de contaminantes al ambiente. Se evaluaron las emisiones de monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y óxidos de nitrógeno (NOx) mediante la Micro-simulación de la intersección en su estado actual y en el escenario de mejora que consiste en una propuesta de construcción proyectada por el gobierno. Se utilizó el software PTV Vissim para analizar y comparar las emisiones de cada modelo. Los resultados demostraron que la propuesta de mejora en la intersección de las avenidas Tecnológico y México-Japón es efectiva para mejorar la movilidad vial y reducir las emisiones de contaminantes en comparación con la situación actual. En particular, se encontró que las emisiones totales de CO, VOC y NOx disminuyeron en un promedio de aproximadamente 43.4 % en el escenario de mejora. Estos hallazgos son importantes, ya que la disminución de las emisiones de contaminantes puede contribuir a la lucha contra el cambio climático y mejorar la calidad ambiental en la ciudad de Celaya. Los resultados también pueden ser útiles para futuros proyectos de mejora en la movilidad vial y la calidad del aire en otras zonas urbanas con características similares.

Palabras Clave—tráfico vehicular; emisiones contaminantes; Micro-simulación.

Introducción

La expansión de las ciudades implicó una tasa de crecimiento poblacional para México de un 5% entre los años 2015 y 2020, lo que conllevó a una mayor demanda para satisfacer las necesidades de traslado de los habitantes de un lugar a otro, aumentando el parque automotor en un 28% en el mismo período según (INEGI, 2021). El aumento del uso del automóvil ha provocado problemas de congestión vehicular en calles y carreteras, además de altos niveles de contaminación ambiental [1].

En la actualidad, la problemática del tráfico vehicular es uno de los principales desafíos a nivel mundial en términos de movilidad urbana sostenible. La congestión del tráfico, las emisiones contaminantes, el exceso de ruido, el aumento del número de accidentes viales y las afectaciones a la salud son algunos de los problemas que se derivan de un parque automotor cada vez más numeroso y diverso.

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) [2], reporta que el transporte es responsable de aproximadamente el 27% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en Europa. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020) estima que la contaminación del aire es responsable de 4.2 millones de muertes prematuras en todo el mundo cada año [3].

Es importante mencionar que la congestión del tráfico en las ciudades tiene un costo económico significativo. Según el informe del Instituto de Transporte de Texas, “Urban Mobility Report 2019”, la congestión del tráfico en Estados Unidos tiene un costo anual de más de 160 mil millones de dólares en tiempo perdido y combustible desperdiciado [4]. Este costo económico se debe al aumento de los tiempos de viaje y al aumento del consumo de combustible, lo que a su vez incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y una mayor contaminación del aire.

Según el Anuario de Estadísticas del DF y la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (2002), la Ciudad de México se encuentra entre las más congestionadas del mundo. Tiene un promedio de 334 vehículos por km en sus calles. Los datos contrastan: la Unión Internacional de Transporte Público estima que el número de autos privados es de 354 km y para el INEGI es de 294 por km. En cualquiera de los casos, la saturación vial es mayor en la ZMVM que en los Ángeles con 142 o Madrid con 256 [5]. Esto ha generado que los residentes de la ciudad tengan que enfrentar un tiempo promedio de viaje de más de una hora, lo que afecta no solo su calidad de vida, sino también su productividad en el trabajo y su salud mental [6].

En México, la ciudad de Celaya es una de las más afectadas por esta problemática debido a su ubicación geográfica y a su importancia en la industria automotriz del país. De acuerdo con el Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, la ciudad de Celaya presenta niveles elevados de contaminantes atmosféricos como el dióxido de nitrógeno (NO₂) y las partículas PM₁₀ [7].

Diferentes estudios han abordado esta problemática y han propuesto alternativas para

solucionarla. Por ejemplo, el estudio realizado por Arliansyah & Bawono (2018) se enfoca en la construcción de un paso inferior para mejorar el desempeño del tráfico y reducir la contaminación de aire en esa intersección. También se discute la importancia de construir un paso subterráneo y al mismo tiempo mejorar el diseño geométrico y la gestión del tráfico en las intersecciones más cercanas para obtener resultados óptimos al abordar los problemas de tráfico [8]. Por otro lado, Almanza et al. (2018) presenta un diseño de sistemas de ciclovías a través de un enfoque de micro simulación que permitió aumentar la movilidad de ciclistas de forma segura y la motivación para reponer el uso de vehículos a motor por la bicicleta en la ciudad de Celaya [9].

En la investigación de Toledo (2017) se realizó un estudio para entender los efectos: productivo, ambiental y de infraestructura que se producen derivados de la movilidad vehicular, en avenidas con mayor importancia. Con la finalidad de identificar las condiciones para mejorar la operatividad de la red vial para la toma de decisiones en la ciudad de Celaya (Guanajuato), dicho estudio se realizó en las avenidas Juan José Torres Landa, Irrigación, Constituyentes, 12 de octubre y prolongación Francisco Juárez, recopilando la información necesaria mediante aforos vehiculares para su análisis [10].

En un estudio llevado a cabo por Espinoza et al. (2017), se propone la sincronización óptima de los semáforos existentes a través de un diseño de experimento para mejorar la movilidad, reducir el consumo de combustible y los índices de contaminación [11]. Además, el estudio de Gastaldi et al. (2014) realizó la comparación de una rotonda y una intersección controlada por semáforos en términos de desempeño ambiental, encontrando como resultado que la rotonda superó el semáforo de tiempo fijo, en término de emisiones de los vehículos [12].

En la investigación de Taha & Abdelfatah (2015) se hizo uso de intersecciones no convencionales en el transporte para reducir la congestión y mejorar la eficiencia de las señales de tráfico. En particular, se examina el impacto de los controles de giros a la izquierda no convencionales, como los giros a la derecha seguidos de una vuelta en U y la vuelta en U seguida de una vuelta a la derecha, que eliminan los giros a la izquierda directos en la intersección [13]. Por otro lado, Ortiz (2010) brinda una metodología para identificar los parámetros relevantes de un modelo de micro simulación, para representar el flujo real en una vía mediante la manipulación de estos. La metodología es evaluada aplicándola a un caso de estudio en la vía NQS con Calle 48 en Bogotá, Colombia [14].



Figura 1. Imagen de la intersección Tecnológico y México-Japón tomada de Google Earth.

El trabajo realizado por Gomes, May, & Roberto (2004) investigó si un conjunto seleccionado de parámetros de simulación que utilizaban trayectorias de velocidad observadas en el campo, a alta resolución temporal, podría mejorar las emisiones estimadas de un corredor arterial simulado con semáforos [15]. En la publicación de Irin & Ahsanul Habi (2016) se presenta un procedimiento para construir y calibrar un modelo detallado utilizando el software Vissim, aplicado a un tramo en Pasadena (California), donde se estableció un conjunto cualitativo de objetivos para la calibración [16].

En este contexto, la simulación del tráfico vehicular y las emisiones contaminantes se ha convertido en una herramienta importante para analizar y evaluar diferentes alternativas de solución. En este sentido, se ha llevado a cabo una investigación con el objetivo de construir un modelo de simulación en la intersección de las avenidas Tecnológico y México-Japón de la ciudad de Celaya. La simulación se ha realizado con el software PTV Vissim, una herramienta ampliamente utilizada para analizar la movilidad urbana y evaluar alternativas de solución [17].

Esta investigación tiene como finalidad analizar las emisiones de combustible en la intersección de las avenidas Tecnológico y México-Japón de la ciudad de Celaya y evaluar los principales contaminantes como el monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (VOC).

Método

Identificación y descripción del área de estudio

La intersección de las avenidas Tecnológico y México-Japón se encuentra en la ciudad de Celaya, en el estado de Guanajuato (México). Se trata de una intersección semaforizada

que conecta dos de las vías más importantes de la ciudad, y es considerada como una de las más transitadas y con mayor flujo vehicular [18]. En esta intersección, el flujo de tráfico es constante a lo largo del día, debido a la gran cantidad de vehículos que transitan por la zona. El tráfico se compone de vehículos ligeros, motocicletas, vehículos de carga y transporte público. Además, la intersección se encuentra cerca de varias fábricas de la industria automotriz, lo que provoca tráfico pesado que satura la vialidad. La zona cuenta con escasa vegetación, lo que puede afectar la calidad del aire. En general, esta intersección presenta condiciones desfavorables en términos de movilidad y calidad del aire, lo que hace necesario encontrar soluciones para mejorar la situación en la zona. En la figura 1 se muestra una imagen de la intersección tomada de Google Earth.

Esta intersección es el cruce de las avenidas Tecnológico y México-Japón. Tiene cuatro accesos, es decir, para ingresar a la intersección los vehículos pueden acceder por la avenida Tecnológico en dirección Sur-Norte o Norte-Sur, los otros dos accesos serían por la avenida México- Japón en dirección Este-Oeste y Oeste-Este.

De acuerdo con lo observado en el área, la mayoría de los peatones utilizan los cruces peatonales para atravesar la intersección, aunque también se observó a algunos cruzando por zonas no designadas para ello, lo cual puede aumentar el riesgo de accidentes. Además, algunos peatones parecían distraídos con sus teléfonos móviles mientras cruzaban la calle, lo que también puede aumentar el riesgo de accidentes.

En cuanto a los ciclistas, se observó que algunos utilizaban los carriles designados para ellos, pero otros optaban por circular por la acera, lo cual puede ser peligroso para los peatones. También se observaron algunos ciclistas violando las señales del tráfico, como los semáforos y las señales de stop, lo que aumenta el riesgo de accidentes con vehículos motorizados.

Otra de las condicionantes del tráfico es la falta de sincronización de los semáforos. Esto genera situaciones en las que, en ciertos cruces peatonales, el semáforo peatonal cambia a verde mientras el semáforo vehicular aún está en verde. Esta falta de sincronización requiere precaución tanto por parte de los vehículos como de los peatones. Además la ausencia de un tiempo de seguridad designado para los peatones en los semáforos agrega desafíos adicionales para los mismos.

También es importante destacar que las señales de cruce peatonal en la calle presentan desgaste, lo que dificulta su visibilidad. Además, se observa en ocasiones un comportamiento inadecuado por parte de algunos conductores, ya que algunos vehículos se detienen justo sobre las cebras por donde deben cruzar los peatones.

Composición vehicular de la intersección

La recolección de los datos se llevó a cabo en un día típico entre las 12 y 13 horas, con-

siderado como horario pico ya que es cuando se presenta el mayor flujo vehicular observado. Los aforos se realizaron en una sola exhibición mediante videograbación con el apoyo de un dron. Durante la recolección de datos, se registró un total de 4568 vehículos mixtos por hora. La figura 2 muestra la composición vehicular de la intersección durante el período analizado.

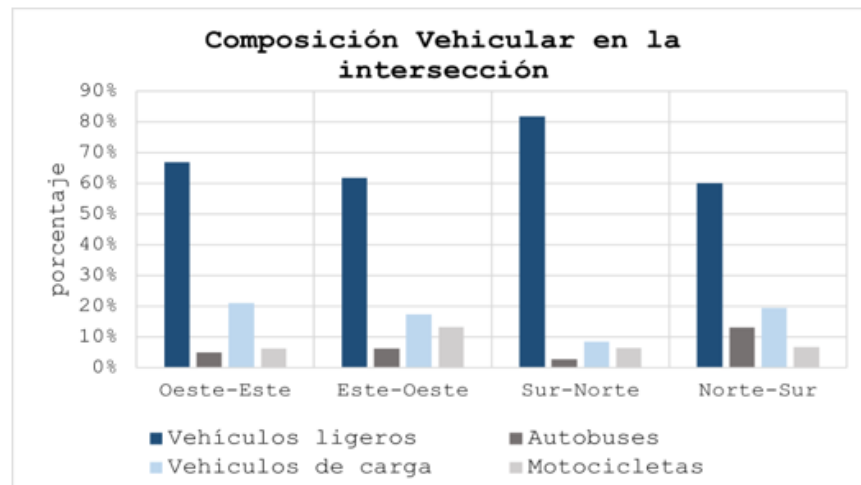


Figura 2. Composición vehicular en la intersección.

Se observa que existe un flujo vehicular significativo, siendo los autos ligeros los que tienen el mayor volumen de circulación con un 67% en la dirección Oeste-Este, 62% en la dirección Este-Oeste, 82% en la dirección Sur-Norte y 60% en la dirección Norte-Sur. Los vehículos pesados representan el 21%, 17%, 9% y 19% del volumen total de circulación en cada dirección, respectivamente. Los autobuses representan el 5%, 6%, 3% y 13% respectivamente. Las motocicletas tienen un volumen de circulación de un 6%, 13%, 6% y 7% del volumen total en cada dirección, respectivamente, y se puede observar que tienen un volumen de circulación más bajo que los autobuses en el acceso Norte-Sur.

Parámetros del modelo

Según Transport for London (2021), se ha establecido que existen parámetros significativos que influyen en los resultados obtenidos en un modelo de microsimulación. Estos parámetros, que han sido ampliamente estudiados y validados, desempeñan un papel crucial en la representación precisa del comportamiento del tráfico en las intersecciones. En este estudio, fueron ajustados dichos parámetros teniendo en cuenta las características de la intersección [19].

Geometría de la intersección: el primer aspecto abordado en el desarrollo del modelo fue la geometría de la intersección. Utilizando el mapa dentro del mismo software se localizó

la intersección y se trazaron los carriles y zonas de giro sobre la imagen. Se diseñaron carriles con un ancho de 3.20 metros, fundamentado en una medición llevada a cabo a través de Google Earth. Las ciclovías se diseñaron con un ancho de 1.50 metros aproximadamente. También se modelaron algunos detalles de la intersección como señales de tráfico, elementos de la naturaleza y las edificaciones relevantes que hacen que la simulación parezca más realista.

Volumen del tráfico: a partir de la información recopilada en el paso anterior se introdujo en el software el tipo de vehículo y su volumen para cada acceso de la intersección.

Distribución de la demanda: se le introdujo al software la forma en que se distribuyen los vehículos en las diferentes rutas, el tipo de vehículo y su porcentaje de giro para cada acceso de la intersección. La distribución de demanda puede influir en la capacidad de la intersección, la congestión y la eficiencia del flujo de tráfico.

Comportamiento del conductor: Los parámetros que modelan el comportamiento del conductor, como la velocidad deseada, la distancia de seguimiento y la probabilidad de cambio de carril deben ajustarse a las características de la intersección analizada. Para este caso, se ajustaron dichos comportamientos teniendo en cuenta la forma de conducir en la ciudad de Celaya. El rango de velocidades utilizadas en la microsimulación fue de 40 a 60 km/h, ya que son las velocidades en las que generalmente se desplazan los vehículos.

Control de semáforos: Los parámetros relacionados con el control de semáforos, como los tiempos de ciclo, los tiempos de verde y rojo, y la coordinación entre los semáforos se introdujeron en el software a partir de los datos tomados en campo, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Ciclo semafórico de la intersección

Accesos a la intersección	Luz de estado			Ciclo semafórico
	verde	amarilla	roja	
Acceso Norte-Sur	30	3	119	152
Acceso Sur-Norte	30	3	119	152
Acceso Oeste-Este	30	3	119	152
Acceso Este-Oeste	30	3	119	152

Fuente: elaboración propia

Partiendo de estos parámetros se procede a recrear el escenario actual en el software VISSIM, a fin de que el modelo simule con precisión el comportamiento real de la intersección. En la figura 3 se muestra la imagen de la intersección actual modelada en el software.



Figura 3. Composición vehicular en la intersección

Calibración del modelo

La calibración de un modelo de tráfico en VISSIM es una etapa crucial para asegurar la precisión y confiabilidad de los resultados de la simulación. Sin una calibración adecuada, el modelo puede producir resultados inexactos y erróneos, lo que puede llevar a decisiones inadecuadas en la planificación y gestión del tráfico.

Según Bieker & Wagner (2015), la calibración manual es un enfoque comúnmente utilizado para ajustar los parámetros del modelo VISSIM. Este enfoque implica la iteración manual de los valores de los parámetros del modelo hasta que se logra una buena coincidencia entre los datos de entrada y los resultados de la simulación [20].

La validación del modelo se llevó a cabo mediante el uso del estadístico establecido por Geoffrey E. Havers, conocida como GEH. Este estadístico se utiliza para comparar los datos de tráfico simulados con los datos reales recopilados. La fórmula utilizada para calcular el estadístico GEH es la siguiente:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}}$$

Donde:

M: flujo o volumen simulado

C: flujo o volumen contado (real)

Según la literatura, se considera que flujos correctamente ajustados tienen un valor de GEH menor a 5, flujos que requieren revisión se encuentran en el rango de 5 a 10, y flujos

erróneos presentan un valor de GEH mayor a 10 [20]. Esto significa que cualquier valor de GEH mayor a 5 se considera pendiente de revisión o incorrecto. Sin embargo, existe una excepción para una colección de datos donde es posible que una proporción de la información no cumpla con el criterio GEH. Según la regla establecida, si el 85% o más de los datos cumple con el criterio GEH, se puede concluir que la muestra tomada en campo tiene una calibración aceptable y, por lo tanto, la validación es correcta [21].

El GEH es un proceso iterativo que busca mejorar la precisión y ajustar el modelo de simulación mediante repeticiones y ajustes sucesivos. Inicialmente se ejecuta la simulación del modelo y se calcula el GEH para comparar los valores simulados con datos medidos en campo. Si el GEH supera un umbral de aceptación, se realizan ajustes en los parámetros del modelo, como condiciones de tráfico o características de los vehículos. Luego, se ejecutan nuevas corridas de simulación con los parámetros reajustados, se recalcula el GEH y se repite el proceso hasta que converja dentro del umbral de aceptación. La figura 4 describe el proceso iterativo en forma de un diagrama de flujo para este estadístico.

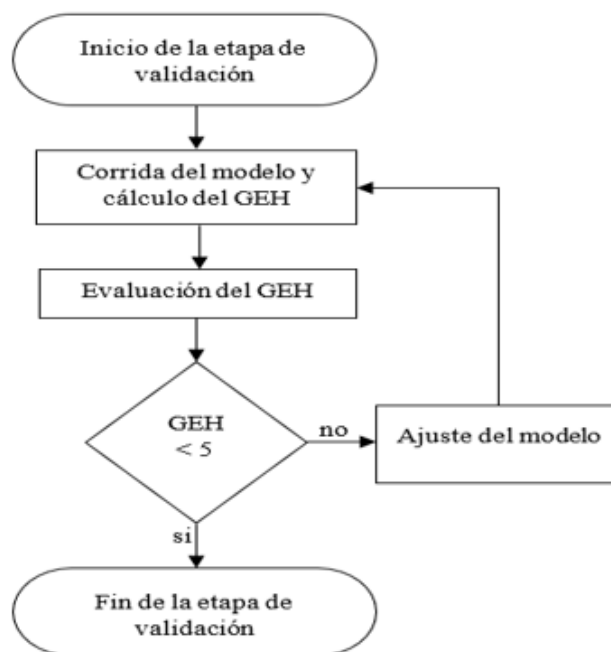


Figura 4. Descripción del proceso iterativo del GEH

El software Vissim permite realizar internamente la prueba estadística GEH, utilizando la fórmula ya mencionada. En la figura 5 se muestran los datos arrojados por el software, donde se puede observar que los valores del GEH obtenidos fueron menor a 5, lo que indica que los flujos fueron correctamente ajustados en el modelo. Los resultados obtenidos demostraron que el modelo simula con un 90% de seguridad el comportamiento real del tráfico en la intersección.



Figura 5. Resultados del estadístico GEH en el software Vissim

Diseño de escenario de mejora

En este paso, se procedió a simular el escenario de mejora propuesto para la intersección de las avenidas Tecnológico y México-Japón. La propuesta de mejora contempló la construcción de un paso deprimido en la avenida Tecnológico, con una longitud de 700 metros, que permitiría el tráfico fluido de esta vía sin interferir con la avenida México-Japón. Asimismo, se consideró la construcción de un puente elevado en la avenida México-Japón, con una longitud de 400 metros. Para ello, se incorporaron las características geométricas y de tráfico de estas nuevas estructuras al modelo, ajustando los flujos vehiculares y peatonales para reflejar las nuevas condiciones de la intersección. En la figura 6 se muestra la geometría de la intersección realizada en el software.



Figura 6. Geometría de la intersección con la mejora realizada en el software Vissim.

Resultados

Para asegurar la robustez y confiabilidad de los resultados, se realizaron 10 corridas de simulación. Esta elección se basó en la recomendación de PTV GROUP (2022), que

sugiere un rango óptimo de 5 a 20 corridas para estudios similares [22]. Para ambos escenarios, se realizó la simulación con un número de 10 réplicas iniciales para asegurar la precisión de los resultados. Es importante resaltar que la complejidad del modelo es un factor influyente en la necesidad de un período de calentamiento más extenso. La intersección en cuestión presenta una serie de interacciones entre diversos elementos, tales como flujos de vehículos procedentes de múltiples direcciones, cambios en las señales de tráfico y la interacción entre vehículos y peatones. Estas complejas dinámicas requieren un tiempo adicional para lograr una estabilización adecuada del modelo. Al otorgar este tiempo necesario, se evitan efectos transitorios iniciales y se asegura que los resultados obtenidos sean más representativos y confiables. En este caso, se ejecutó la simulación con un período de calentamiento de una hora, seguido de la generación de resultados para un intervalo de tiempo igualmente de una hora. Fueron obtenidas las medias de las variables de interés, tales como la cola máxima, la demora por vehículos y las emisiones de CO, NOx y COV. En la figura 7 se comparan la longitud promedio de la cola en metros generada en la intersección en el escenario actual y el escenario mejorado luego de la implementación de la propuesta.

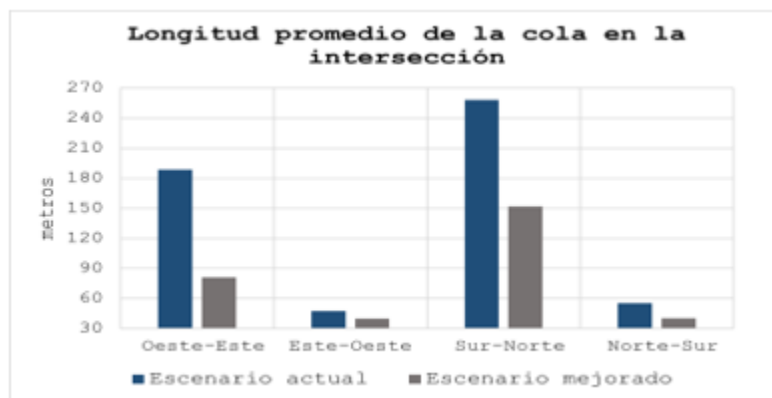


Figura 7. Comparación de la longitud promedio de la cola entre los dos escenarios.

Se puede apreciar una clara disminución de la cola en el escenario mejorado en cada uno de los accesos. La mayor reducción de la cola se observó en el acceso Oeste-Este, donde se implementó el puente elevado en la avenida México-Japón, y se redujo en un 57%. Además, se observó una disminución del 41% en el acceso Sur-Norte, del 27% en el acceso Norte-Sur y del 15% en el acceso Este-Oeste. Estos resultados demuestran que la propuesta de mejoras, que incluyó la construcción de un paso deprimido y un puente elevado, es efectiva en reducir las colas en la intersección de las avenidas Tecnológico y México-Japón.

De acuerdo con la figura 8, los resultados obtenidos muestran una clara disminución en los tiempos de espera en el escenario mejorado en cada uno de los accesos. En particu-

lar, en el acceso Oeste-Este se observó una reducción porcentual del tiempo de espera del 42.8%, mientras que en el acceso Sur-Norte se redujo en un 46.2%, en el acceso Norte-Sur en un 30.15% y en el acceso Este-Oeste en un 14.1%.

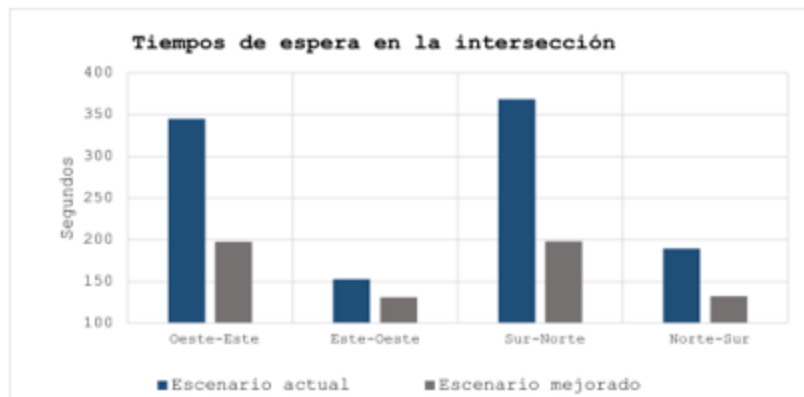


Figura 8. Comparación de los tiempos de espera entre el escenario actual y el escenario mejorado en la intersección.

A pesar de que los valores de emisiones contaminantes obtenidos en la simulación no representan la realidad debido a que la configuración de Vissim se basa en datos de otras ciudades con características diferentes a la ciudad de Celaya, estos resultados siguen siendo valiosos para comparar diferentes escenarios y evaluar el impacto de mejoras implementadas de forma porcentual. A continuación, se presenta una comparación de las emisiones contaminantes de CO, NOx y VOC entre el escenario actual y el mejorado, propuesto en la intersección en cuestión. La información se muestra en un gráfico de barras en la figura 9 que se presenta a continuación.

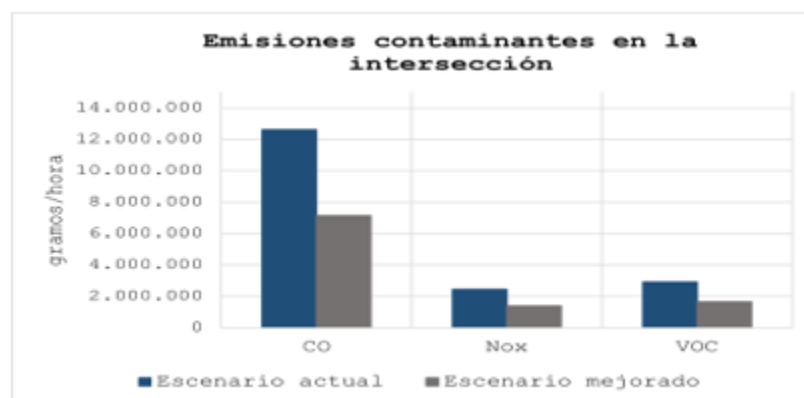


Figura 9. Comparación de las emisiones contaminantes entre el escenario actual y el escenario mejorado en la intersección.

Se puede observar que las tres emisiones contaminantes experimentan una reducción porcentual similar del 43.4%, 43.5% y 43.4%, respectivamente, en el escenario mejorado

en comparación con el escenario actual. Este análisis sugiere que las mejoras propuestas tienen un impacto significativo en la reducción de las emisiones contaminantes en la intersección en cuestión.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado que la propuesta de mejora en la intersección de las avenidas Tecnológico y México-Japón es efectiva para mejorar la movilidad vial y reducir las emisiones de CO, NOx y COV en aproximadamente un 43%. La disminución de estas emisiones es crucial para mejorar la calidad del aire y la salud de las personas, y contribuye a la lucha contra el cambio climático. Se observó una disminución notable en la cola, siendo el acceso Oeste-Este el que experimentó la mayor reducción, con un 57%. De igual manera, para el mismo acceso, se obtuvo una reducción porcentual del 42.8% para los tiempos de espera.

Es fundamental destacar la importancia de fomentar una cultura de respeto vial y la implementación de medidas de seguridad adecuadas para proteger a peatones y ciclistas, lo cual contribuye a mejorar la calidad del aire y la seguridad en la zona. Estos resultados pueden servir como base para futuros proyectos de mejora en la movilidad vial y la calidad del aire en otras zonas urbanas similares.

El trabajo resalta la capacidad de utilizar la microsimulación para evaluar diferentes escenarios de tráfico y tomar decisiones informadas en el diseño y gestión de las intersecciones. Por otro lado, es importante destacar que esta investigación habría obtenido resultados aún más robustos si se hubieran realizado un mayor número de corridas del modelo. Sin embargo, debido a restricciones de tiempo con el software, se optó por realizar 10 corridas basado en la literatura existente. A pesar de esta limitación, los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan una visión valiosa del comportamiento del tráfico en la intersección analizada.

Reconocimientos

En esta investigación, es importante destacar el apoyo financiero otorgado por el CONACYT, así como la colaboración del Instituto Tecnológico de Celaya, cuyo aporte ha sido fundamental para llevar a cabo el estudio. Igualmente, deseamos expresar nuestro agradecimiento a PTV GROUP por concedernos la licencia necesaria para la realización de este proyecto. Sin el apoyo y la colaboración de estas instituciones, este trabajo no habría sido posible.

Referencias

- [45] INEGI. (2021). Población. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura>
- [46] Agencia Europea de Medio Ambiente. (2019). Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) 2019: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. EEA.
- [47] Organización Mundial de la Salud (OMS). (2020). Contaminación atmosférica. OMS.
- [48] Instituto de Transporte de Texas. (2019). Urban Mobility Report 2019. Instituto de Transporte de Texas.
- [49] Zamudio, D., & Alvarado, V. (2014). ZMVM: Hacia el colapso vial. El poder del consumidor.
- [50] López, A., & Medina, C. (2018). Impacto del tráfico vehicular en la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México. *Revista de Investigación Académica*, 1-15.
- [51] ICAEG) Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato . (2020). Informe de Calidad del Aire del Estado de Guanajuato 2020. ICAEG.
- [52] Arliansyah, J., & Tri Bawono, R. (2018). Analysis of Emissions Reduction through Performance Intersection and Nearby Grid Improvement Using Microsimulation program. *The open transportation journal*, 332-342.
- [53] Almanza Mendoza, A., Toledo Aguilar, L., Jiménez García, J., Hernández González, S., Tapia Esquivas, M., Figueroa Fernández, V., & Fernández Soto, D. (2018). *Transportation Research Procedia*, 371-378.
- [54] Toledo, L. Á. (2017). Análisis del impacto de la movilidad vehicular en las avenidas importantes de la ciudad de Celaya, Guanajuato con enfoque de microsimulación. Celaya: Instituto Tecnológico de Celaya.
- [55] Espinoza Mondragon, J., Jiménez García, J., Medina Flores, J., Vázquez Lopez, J., & Téllez Vázquez, S. (2017). Experiments simulation and design to set traffic lights' operation rules. *Transport Policy*, 1-11.
- [56] Gastaldi, M., Meneguzzer, C., Rossi, R., Della Lucia, L., & Gecchele, G. (2014). Evaluation of air pollution impacts of a signal control to roundabout conversion using microsimulation. *Transportation Research Procedia*, 1031-1040.
- [57] Taha, M., & Abdelfatah, A. (2015). *Journal of Traffic and Logistic Engineering*, 12-17.
- [58] Ortiz Arrieta, M. (2010). Creación de un modelo macroscópico de flujo para una vía interurbana en Colombia y calibración de parámetros PTV Vissim 5.1. Universidad de los Andes.
- [59] Gomes, G., May, A., & Roberto , H. (2004). Congested Freeway Microsimulation Model Using VISSIM. *Journal of the Transportation Research bOARD*, 71-81.
- [60] Irin, S., & Ahsanul Habi, M. (2016). Microsimulation-Based Emissions Modeling for a Major Infrastructure Renewal Plan. *Journal of the Transportation Research Board*, 127-138.
- [61] PTV GROUP. (2021). PTV GROUP. Obtenido de <https://company.ptvgroup.com/en-us/modeling-guidelines>
- [62] Gobierno del Estado de Guanajuato. (2019). Mejoramiento de la intersección Tecnológico y México-Japón. .

- [63] Transport for London. (2021). Traffic Modelling Guidelines. London: Transport for London.
- [64] Bieker, L., & Wagner, P. (2015). Calibration of microscopic traffic flow models. Transportation Research Procedia, 543-552.
- [65] Transport for London. (2010). Traffic Modelling Guidelines. London: Transport for London.
- [66] PTV GROUP. (2022). PTV Vissim 2022 User Manual. Alemania: PTV GROUP.

Acerca 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.

Gastón Cedillo

Responsable Técnico del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística con sede principal en el Instituto Mexicano del Transporte [IMT]. Es Ingeniero Civil (UASLP), con una Especialidad en Ingeniería Urbana (UASLP), una Maestría en Ingeniería del Transporte (UNAM) y otra en Logística (CRET-LOG, Francia). 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 CONAHCYT y Premio Nacional de Logística (2012).

Entre sus principales contribuciones está el diseño y fundación del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística con sede principal en el IMT y sede simultánea en el ITSON (Instituto Tecnológico de Sonora), el cual ha contribuido al desarrollo del conocimiento y aplicación logística en México. Entre los proyectos de mayor impacto impulsados desde el IMT están: i) 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”, donde 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); ii) 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; iii) IMT-X, vehículo aéreo no tripulado (“Drone”) autónomo con múltiples aplicaciones en logística y vigilancia; iv) LogisTECHS Lab, laboratorio en tiempo real desarrollado en conjunto entre el IMT y la Texas A&M International University 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, diseñó 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.

Estertor Alonso Lagarda Leyva

Es 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 “Ga-

lardon 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 2024, coordina el desarrollo con empresarios, instituciones de educación superior nacionales e internacionales, cinco unidades de negocio para detonar el norte de Sinaloa y el Sur de Sonora.

AVANCES EN TRANSPORTE Y LOGÍSTICA:

DIGITALIZACIÓN, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD

Se terminó de editar en Ciudad Obregón, Sonora; el 6 de septiembre de 2024,
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.



AVANCES EN TRANSPORTE Y LOGÍSTICA: DIGITALIZACIÓN, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD

Este libro es el esfuerzo por parte de investigadores con adscripción en diversas instituciones y desde diversas perspectivas, lo que consideramos asigna un gran valor a la presente publicación. Desde luego, es el juicio del lector, lo que al final definirá la contribución del presente trabajo. Sin embargo, en un contexto de cambio constante, consideramos que la presente selección de contribuciones es un aporte que permitirá ampliar la reflexión sobre aspectos que son claves en México y América latina para el desarrollo del transporte, la logística y la cadena de suministro.

