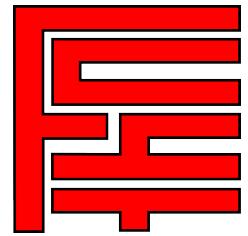


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA INGENIERÍA DE SISTEMAS



**SISTEMA WEB PARA OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE ENTREGA DE
PRODUCTOS EN ENTORNOS COMPLEJOS TSP BASADO EN AGENTES
INTELIGENTES**

Proyecto presentado para optar por diploma académico de Licenciatura en Ing de Sistemas.

PRESENTADO POR: Grover Choque Mitma

TUTOR: Lic. Carmen Rosa García Pérez

Cochabamba - Bolivia

3 de diciembre de 2025

*A mis padres,
por su amor, guía y apoyo incondicional.*

— Grover Ch. M.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a **Dios**, fuente de sabiduría y fortaleza, por guiarme en cada paso de este camino, darme la perseverancia para superar las dificultades y permitirme culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida.

A mi **familia**, por su amor incondicional, por ser mi mayor apoyo y motivación. Gracias por cada consejo, cada palabra de aliento y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro es también de ustedes.

A mi amada prometida **Nathalia P.**, por su paciencia, comprensión y constante apoyo durante este proceso. Su compañía, ánimo y cariño fueron una gran fuente de inspiración para seguir adelante.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutora, **Carmen Rosa García Pérez**, por su orientación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de esta investigación. Su guía fue fundamental para alcanzar los objetivos propuestos.

Finalmente, agradezco profundamente a la **Universidad Mayor de San Simón**, mi apreciada casa de estudios, por brindarme los conocimientos, las herramientas y el acompañamiento necesarios para mi formación profesional y la culminación de este proyecto de grado.

RESUMEN

pendiente pues ...

ÍNDICE GENERAL

I. Introducción	1
I.1. Antecedentes	1
I.2. Definición del Problema	2
I.3. Objetivo	2
I.3.1. Objetivo General	2
I.3.2. Objetivos Específicos	2
I.4. Área de conocimiento	2
I.5. Alcance	3
I.6. Justificación	3
 II. Marco Teórico	 5
II.1. Área de Conocimiento	5
II.1.1. Definición	5
II.1.2. Características del área	5
II.1.3. Elementos, Fases y Proceso	6
II.1.4. Herramientas y Tecnologías del Área	7
II.2. Metodología Estructurada	7
II.2.1. 2.2.1 Definición	7
II.2.2. 2.2.2 Características	8
II.2.3. 2.2.3 Proceso	8
II.3. Plataforma de Desarrollo	10

II.3.1. Definición	10
II.3.2. Características	10
II.3.3. Ventajas	11
II.4. Administrador de la Base de Datos (SGBD)	11
II.4.1. Definición	11
II.4.2. Características	11
II.4.3. Ventajas	12
II.5. Herramientas	12
II.5.1. Definición	12
II.5.2. Características	12
II.5.3. Aplicación en el proyecto	13
II.5.4. Beneficios para el desarrollo	13

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO I – INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado constantemente optimizar sus actividades, especialmente aquellas que implican desplazarse entre diferentes ubicaciones. Como seres racionales, procuramos completar nuestras tareas en el menor tiempo posible, ya que el tiempo constituye un recurso limitado e irrecuperable.

Imagine que una persona desea visitar 44 lugares distribuidos en el mundo, representados como puntos sobre un mapa, y que su objetivo es recorrer la ruta más corta posible que conecte todos estos puntos, partiendo y regresando al punto inicial. Este tipo de problema es conocido como el *Traveling Salesman Problem* (TSP), o Problema del Viajero, el cual consiste en determinar, dado un conjunto de ubicaciones y las distancias entre ellas, la ruta de costo mínimo que visite cada una de dichas ubicaciones exactamente una vez antes de retornar al punto de partida (Russell & Norvig, 2021).

En el contexto boliviano, la distribución de bienes y servicios esenciales constituye una de las actividades más críticas tanto para la economía como para la vida cotidiana de la población. Diversos sectores —desde pequeñas panaderías familiares hasta grandes industrias lácteas y plataformas de entrega a domicilio— enfrentan el desafío constante de planificar rutas de distribución de manera eficiente. Estas actividades comparten una característica común: la necesidad de visitar múltiples destinos en el menor tiempo posible y utilizando los recursos de manera racional, lo que corresponde directamente al planteamiento del TSP.

Un ejemplo claro se observa en las panaderías locales, que deben distribuir pan fresco cada mañana a tiendas, mercados y colegios. Si las rutas se planifican de manera empírica, los costos en combustible, tiempo y mano de obra aumentan significativamente. De forma similar, empresas como PIL Andina y productores locales deben garantizar la entrega diaria de leche fresca a miles de puntos de venta, donde la puntualidad y la conservación del producto son esenciales. De igual modo, los servicios de delivery, impulsados por plataformas como PedidosYa o Yaigo, requieren una logística optimizada para asignar pedidos y maximizar la eficiencia de los repartidores.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023), Bolivia cuenta con más de 2,3 millones de

vehículos registrados, de los cuales una parte importante se destina al transporte y distribución de productos. Asimismo, se estima la existencia de más de 8,000 panaderías y pastelerías registradas, junto a miles de microempresas dedicadas a la producción y comercialización de alimentos, muchas de ellas sin herramientas tecnológicas de optimización. Esta realidad se traduce en rutas ineficientes, altos costos operativos y una menor competitividad empresarial.

1.2 Definición del Problema

Las rutas de distribución mal optimizadas, generan un costo operativo mayor, fomentan el mal uso del tiempo, pero sobre todo tienen un impacto aun mayor en la contaminación ambiental.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo General

Implementar un sistema web para la optimización de rutas de distribución de productos, basado en agentes inteligentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Permitir la actualización de lugares o ubicaciones de distribución.
2. Calcular la ruta óptima de acuerdo a la selección de lugares.
3. Proporcionar mapas que permitan seleccionar los puntos o lugares a visitar.
4. Proporcionar un historial de rutas generadas.
5. Generar visualización de las rutas en un mapa digital para facilitar la interpretación por parte del personal de reparto.
6. permitir descargar la ruta optimizada en formatos comunes como PDF o imagen.

1.4 Área de conocimiento

- Área: Inteligencia Artificial

1.5 Alcance

1. El sistema contemplará la optimización de rutas para un conjunto de puntos de entrega, considerando la minimización de distancia/tiempo total.
2. El sistema contemplará la visualización de la mejor ruta encontrada mediante una representación gráfica de los nodos(ubicaciones) y aristas(distancias/tiempo) en un mapa y en formato tabular (listado de nodos visitados y no visitados aun).
3. El sistema mostrara visualmente el proceso de obtencion de la ruta mas optima.
4. El desarrollo no incluirá funciones de GPS en tiempo real ni seguimiento satelital.
5. El sistema no será de uso móvil, se enfocará en entorno web.
6. El proyecto no abarcará problemas de tráfico en tiempo real, solo escenarios estáticos de distribución.
7. No generará planificación en tiempo real para múltiples repartidores (solo un agente global que optimiza un recorrido).

1.6 Justificación

La distribución de productos constituye una de las actividades logísticas más relevantes dentro de las cadenas de suministro modernas. En Bolivia, muchas empresas y microemprendimientos dependen de procesos de entrega eficientes para garantizar la calidad de sus servicios y mantener su competitividad. Sin embargo, gran parte de estas operaciones se desarrollan de manera empírica, sin el apoyo de herramientas tecnológicas que permitan optimizar el uso de recursos y minimizar los costos asociados al transporte.

En primer lugar, un **sistema web para la optimización de rutas de distribución en entornos complejos, basado en agentes inteligentes** ofrece una solución tecnológica adaptable a las condiciones del mercado local, permitiendo que empresas de diferentes tamaños puedan planificar sus rutas de manera eficiente y con acceso a través de cualquier dispositivo con conexión a internet. En segundo lugar, el uso de técnicas de inteligencia artificial —particularmente la simulación mediante agentes inteligentes— proporciona un enfoque flexible y dinámico para resolver el *Traveling Salesman Problem* (TSP).

Desde el punto de vista económico, la implementación de un sistema de este tipo permite reducir significativamente los costos operativos relacionados con el consumo de combustible, mantenimiento vehicular y horas laborales. Socialmente, contribuye al desarrollo sostenible, ya que una mejor planificación de rutas im-

aplica una reducción de emisiones de dióxido de carbono y un aprovechamiento más racional de los recursos energéticos.

Finalmente, la propuesta se alinea con las necesidades actuales de modernización tecnológica en Bolivia, fomentando la incorporación de herramientas inteligentes en sectores productivos y logísticos. De este modo, el proyecto no solo aporta una solución práctica a un problema recurrente, sino que también promueve la innovación y la competitividad en el entorno empresarial nacional.

CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO

2.1 Área de Conocimiento

2.1.1 Definición

El área de conocimiento correspondiente a este proyecto se sitúa dentro de la optimización combinatoria, específicamente en el estudio y aplicación del *Problema del Viajante* (TSP, por sus siglas en inglés), considerado uno de los problemas más representativos dentro de la teoría de grafos y la optimización NP-dura (Lawler et al., 1985).

El TSP consiste en determinar la ruta de costo mínimo que permite a un agente visitar un conjunto de nodos exactamente una vez y retornar al punto de origen. Pese a su formulación sencilla, la cantidad de soluciones posibles crece factorialmente conforme aumenta el número de nodos, lo que impide la búsqueda exhaustiva para instancias grandes. Por ello, su resolución práctica depende de heurísticas, metaheurísticas y técnicas basadas en inteligencia artificial.

El TSP posee una amplia aplicabilidad en logística, transporte, robótica, sistemas de entrega y planificación de rutas. Por esta razón, constituye el fundamento teórico del sistema de optimización desarrollado en este proyecto.

2.1.2 Características del área

El estudio del TSP presenta varias características distintivas:

- **Alta complejidad computacional.** El número de rutas posibles crece como $(n - 1)!/2$, lo cual obliga al uso de algoritmos aproximados.
- **Dependencia de modelos matemáticos formales.** El problema se modela mediante grafos completos, matrices de distancias y funciones de costo.
- **Uso de datos geoespaciales.** Para aplicaciones reales se requieren coordenadas, distancias reales y

sistemas de geocodificación.

- **Aprovechamiento de la inteligencia colectiva.** Métodos como *Ant Colony Optimization* (ACO) utilizan múltiples agentes que cooperan para encontrar rutas eficientes (Dorigo & Gambardella, 1999).
- **Amplia aplicabilidad.** El TSP sirve como base para problemas reales de planificación de rutas con restricciones adicionales.

2.1.3 Elementos, Fases y Proceso

El proceso general dentro del área de conocimiento involucra varios elementos fundamentales:

Representación del problema

Se definen los nodos, la matriz de distancias y el grafo completo que modela el espacio de búsqueda. Esta representación permite evaluar el costo de una ruta y determinar mejoras posibles.

Obtención y preparación de datos

Incluye la geocodificación, normalización de direcciones, cálculo de distancias reales mediante plataformas cartográficas, y verificación de datos para evitar inconsistencias que afecten la calidad de la solución.

Generación de una solución inicial

El proceso comienza con una ruta preliminar obtenida mediante heurísticas como vecino más cercano, inserción secuencial o construcción aleatoria controlada.

Optimización mediante agentes inteligentes

Métodos inspirados en comportamiento colectivo, como ACO, permiten que varios agentes exploren rutas, depositen información (feromonas) y converjan hacia soluciones de menor costo. Estos procesos logran un equilibrio entre exploración y explotación Dorigo y Gambardella, 1999.

Evaluación y selección de rutas

Se consideran métricas como: costo total de la ruta, distancia recorrida, tiempo estimado, estabilidad de resultados y mejora respecto a la solución inicial.

Visualización y despliegue

El resultado final se integra en la plataforma web mediante visualización de la ruta óptima, distancia total y orden de visitas, permitiendo su uso operativo.

2.1.4 Herramientas y Tecnologías del Área

El estudio y aplicación del TSP emplea diversas herramientas:

- **Matemáticas y optimización:** heurísticas (2-opt, 3-opt), metaheurísticas (ACO, recocido simulado), y solvers especializados.
- **Mapas y geocodificación:** Google Maps API, OpenStreetMap, GraphHopper.
- **Tecnologías web:** frameworks como Django, Node.js o Flask para la implementación del sistema.
- **Simulación:** entornos para validar rutas y comparar resultados con distintos parámetros.

2.2 Metodología Estructurada

2.2.1 2.2.1 Definición

La metodología estructurada es un enfoque formal para el desarrollo de sistemas de información, basado en la descomposición lógica y secuencial de procesos. Su propósito central es guiar la construcción de un sistema mediante fases claramente delimitadas, cada una con actividades, productos y criterios de control específicos. Este enfoque se apoya en la representación del sistema mediante modelos gráficos, especificaciones funcionales precisas y documentación exhaustiva, lo que permite asegurar coherencia en el diseño y minimizar inconsistencias a lo largo del proyecto.

Autores como Yourdon (Yourdon, 1989) y DeMarco (DeMarco, 1978) establecen que la metodología estructurada proporciona un marco disciplinado para analizar problemas complejos y transformarlos en soluciones lógicas que pueden implementarse de manera confiable. Debido a estas características, resulta adecuada para sistemas que requieren un comportamiento bien definido, como los sistemas de optimización basados en algoritmos determinísticos, por ejemplo, los empleados para resolver variantes del Problema del Viajante (TSP).

2.2.2 2.2.2 Características

La metodología estructurada posee características distintivas que la diferencian de otros enfoques de desarrollo:

- **Secuencialidad lógica:** el proceso de desarrollo se organiza en fases que avanzan de manera lineal, desde la identificación del problema hasta la implementación.
- **Modelación gráfica:** hace uso de diagramas de flujo, diagramas de estructura, modelos funcionales y otras herramientas de representación visual.
- **Documentación exhaustiva:** cada fase genera artefactos que respaldan las decisiones técnicas y permiten la trazabilidad del proceso.
- **Orientación funcional:** el sistema se descompone en funciones y subfunciones, facilitando su comprensión y posterior implementación.
- **Precisión en los requisitos:** exige una definición clara y completa de requisitos antes de diseñar o implementar.
- **Control y verificabilidad:** permite establecer puntos de control que aseguran la calidad y consistencia del sistema en construcción.

2.2.3 2.2.3 Proceso

Diversos autores destacan que los métodos estructurados siguen un proceso secuencial compuesto por fases claramente delimitadas.(DeMarco, 1978) describe el desarrollo de sistemas mediante un flujo lineal basado en análisis, diseño y construcción. De forma similar, Yourdon (Yourdon, 1989) establece que la metodología estructurada se organiza en actividades progresivas que transforman un conjunto de requisitos en un sistema implementable. Kendall y Kendall también presentan un proceso comparable, compuesto por análisis, diseño, implementación y mantenimiento. (Kendall & Kendall, 2014)

A partir de estos enfoques clásicos, el proceso adoptado se estructura en las siguientes fases:

a) Análisis

Consiste en comprender el problema, identificar los requisitos y modelar el funcionamiento actual del sistema. DeMarco señala que esta fase constituye la base del desarrollo, ya que define el alcance funcional y los datos

requeridos. En esta etapa se especifican los procesos, restricciones y parámetros necesarios para el algoritmo de optimización.(DeMarco, 1978)

b) Diseño

Implica transformar los requisitos en una solución lógica y técnica. Yourdon (Yourdon, 1989) establece que el diseño estructurado contempla la definición de diagramas de estructura, especificaciones modulares y la organización funcional del sistema. Aquí se construyen los modelos del algoritmo, la arquitectura del sistema y la estructura de datos.

c) Desarrollo o Implementación

En esta fase se lleva a cabo la construcción del sistema según el diseño previo. Kendall y Kendall (Kendall & Kendall, 2014) indican que la implementación materializa los modelos lógicos en componentes operativos mediante programación, integración y configuración.

d) Pruebas

Su propósito es asegurar que el sistema funcione correctamente y cumpla los requisitos establecidos. Pressman y Maxim (Pressman & Maxim, 2014) destacan que esta fase comprende pruebas unitarias, de integración, funcionales y de rendimiento, permitiendo validar la calidad del software y detectar errores.

e) Documentación y Mantenimiento

Incluye la elaboración de manuales y la preservación del sistema a lo largo del tiempo. According to Kendall and Kendall (Kendall & Kendall, 2014), el mantenimiento permite efectuar ajustes, corregir problemas y mejorar funcionalidades, garantizando la continuidad operativa del sistema.

- Proporciona un proceso claro y ordenado, adecuado para sistemas que requieren precisión en las especificaciones.
- Facilita la construcción de modelos matemáticos y algoritmos de optimización debido a su enfoque de descomposición funcional.
- Permite mantener un alto nivel de control y trazabilidad sobre cada fase del desarrollo.

- Favorece la integración entre el análisis del problema, el diseño del sistema y la implementación del algoritmo.
- Mejora la calidad del software final al incluir mecanismos de validación y verificación formales.
- Reduce riesgos de inconsistencias al exigir documentación detallada.

2.3 Plataforma de Desarrollo

2.3.1 Definición

Django es un framework de desarrollo web escrito en Python, diseñado para facilitar la creación de aplicaciones robustas, escalables y seguras mediante un enfoque basado en la reutilización de componentes, el principio “DRY” (Don’t Repeat Yourself) y estructuras predeterminadas que simplifican el desarrollo. Según Holovaty y Kaplan-Moss (2009), Django implementa el patrón arquitectónico Modelo–Vista–Template (MVT), lo que permite una separación clara de responsabilidades dentro del sistema y favorece un flujo de trabajo ordenado para aplicaciones orientadas a datos.

2.3.2 Características

Entre las principales características de Django se destacan:

- **Patrón MVT:** organiza la lógica del sistema en modelos, vistas y plantillas, lo que mejora la mantenibilidad.
- **ORM integrado:** permite interactuar con la base de datos mediante objetos en lugar de consultas SQL explícitas.
- **Sistema de autenticación:** gestiona usuarios, sesiones y permisos de manera nativa.
- **Seguridad incorporada:** protege contra ataques comunes como XSS, CSRF, inyección SQL y click-jacking.
- **Escalabilidad:** adecuado para proyectos medianos y grandes con crecimiento progresivo.
- **Compatibilidad con librerías científicas:** facilita la inclusión de módulos de inteligencia artificial y optimización gracias al ecosistema de Python.

2.3.3 Ventajas

Para el presente proyecto, Django ofrece ventajas específicas:

- **Integración con algoritmos de optimización:** al estar basado en Python, permite incorporar de forma nativa librerías como NetworkX, NumPy o OR-Tools, necesarias para resolver el TSP mediante agentes inteligentes.
- **Gestión eficiente de datos espaciales:** su compatibilidad con PostgreSQL/PostGIS mejora el manejo de coordenadas y distancias geográficas requeridas para generar rutas óptimas.
- **Desarrollo acelerado y estructurado:** su esquema modular posibilita construir interfaces web estables para la visualización de rutas y resultados.
- **Seguridad y fiabilidad:** garantiza que los procesos de cálculo y acceso a la información se ejecuten dentro de una plataforma protegida contra vulnerabilidades comunes.

2.4 Administrador de la Base de Datos (SGBD)

2.4.1 Definición

PostgreSQL es un sistema de gestión de bases de datos relacional orientado a objetos (ORDBMS), reconocido por su robustez, estabilidad y adhesión a los estándares SQL. Su diseño permite manejar grandes volúmenes de información con integridad transaccional y alta confiabilidad (The PostgreSQL Global Development Group, 2024). La extensión PostGIS añade soporte geoespacial avanzado, posibilitando la manipulación de geometrías y la ejecución de consultas espaciales, lo cual es fundamental en aplicaciones que gestionan rutas y coordenadas.

2.4.2 Características

Las características más relevantes para el proyecto son:

- **Soporte ACID:** asegura integridad y consistencia en todas las operaciones.
- **PostGIS:** permite almacenar puntos, líneas y realizar cálculos geoespaciales como distancias, buffers o intersecciones.
- **Alta escalabilidad:** maneja grandes conjuntos de datos sin afectar el rendimiento.

- **Compatibilidad con Django:** integración directa mediante su ORM.
- **Índices avanzados:** como GiST y SP-GiST, útiles para consultas de rutas o puntos en mapas.
- **Extensibilidad:** admite funciones personalizadas y tipos de datos definidos por el usuario.

2.4.3 Ventajas

Las ventajas de utilizar PostgreSQL con PostGIS en el sistema son:

- **Optimización espacial integrada:** permite calcular distancias entre clientes y puntos de entrega sin recurrir a servicios externos.
- **Alto rendimiento:** elimina la sobrecarga de cálculos geográficos en el servidor web.
- **Precisión en datos georreferenciados:** fundamental para el cálculo del TSP y la construcción del grafo de rutas.
- **Consistencia de datos operativos:** imprescindible para almacenar clientes, órdenes y puntos clave de la distribución.

2.5 Herramientas

2.5.1 Definición

Las herramientas corresponden a los lenguajes, librerías, servicios y componentes tecnológicos que permiten implementar las funcionalidades del sistema. Incluyen tanto herramientas de desarrollo frontend y backend, como librerías especializadas en optimización y análisis geográfico. En el presente proyecto, estas herramientas permiten la construcción de la interfaz web, la implementación del modelo de agentes inteligentes y el cálculo de rutas óptimas.

2.5.2 Características

Entre las características de las herramientas empleadas destacan:

- **Python:** lenguaje interpretado, flexible y ampliamente utilizado en optimización.
- **JavaScript:** permite interacción dinámica en el navegador.

- **Google Maps API:** facilita la visualización de rutas y marcadores geográficos.
- **NetworkX:** permite modelar grafos y aplicar algoritmos relacionados con el TSP.
- **OR-Tools:** librería de Google orientada a la resolución de problemas combinatorios.
- **Bootstrap:** framework CSS para el diseño responsivo del frontend.

2.5.3 Aplicación en el proyecto

Las herramientas aportan funcionalidades específicas:

- **Python + Django:** permiten integrar la lógica de agentes inteligentes con la interfaz web.
- **NetworkX:** modela el grafo del TSP para evaluar rutas posibles.
- **Google Maps API:** representa visualmente la ruta óptima obtenida.
- **PostGIS:** calcula distancias entre nodos directamente en la base de datos.
- **Bootstrap y JavaScript:** mejoran la usabilidad del sistema de forma intuitiva.

2.5.4 Beneficios para el desarrollo

- Integración fluida entre backend, optimización matemática y visualización geográfica.
- Mayor precisión y eficiencia en cálculos de distancia.
- Interfaz amigable para interpretar resultados de optimización.
- Reducción del tiempo de desarrollo al utilizar librerías especializadas.

BIBLIOGRAFÍA

- DeMarco, T. (1978). *Structured Analysis and System Specification*. Yourdon Press.
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1999). Ant Colony Optimization for the Traveling Salesman Problem. *Artificial Life*, 5(2), 137-172.
- Kendall, K. E., & Kendall, J. E. (2014). *Systems Analysis and Design*. Pearson.
- Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., & Shmoys, D. B. (1985). *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Wiley.
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2014). *Software Engineering: A Practitioner's Approach*. McGraw-Hill.
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4.^a ed.). Pearson.
- Yourdon, E. (1989). *Structured Systems Analysis: Tools and Techniques*. Prentice-Hall.