



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico Nacional de México, campus Culiacán

Ingeniería en Sistemas Computacionales

**Optimización de rutas de distribución mediante el
algoritmo de Búsqueda Tabú en una empresa de
distribución en Culiacán, Sinaloa**

Protocolo de investigación para Tópicos de Inteligencia
Artificial

Integrantes del proyecto:

Payan Urquidez Rafael Alberto

Quiñonez Ramirez Nestor de Jesus

Docente: Mora Felix Zuriel Dathan

Repositorio:

<https://github.com/Norkat/Topicos-de-Inteligencia-Artificial>

Culiacán, Sinaloa a 12 Septiembre del 2025

Introducción.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Justificación.....	3
Alcance.....	4
Desarrollo.....	5
Modelado del Problema.....	5
Función Objetivo (Minimización de Costo).....	5
Restricciones Clave.....	5
Algoritmo Heurístico: Búsqueda Tabú (Tabu Search - TS).....	5
Justificación de la Selección.....	6
Elementos de la Búsqueda Tabú Implementada.....	6
Implementación Computacional.....	6
Resultado de la Optimización.....	7
Área de trabajo.....	7
Conclusiones.....	8
Referencias.....	9

Introducción

La optimización de rutas es un desafío fundamental en la logística moderna. Las empresas que realizan actividades de distribución deben planificar de manera eficiente los recorridos de sus unidades de transporte para minimizar costos operativos, consumo de combustible y tiempos de entrega.

Sin embargo, a medida que el número de puntos de entrega aumenta, el problema de encontrar la ruta más eficiente se vuelve combinatoriamente complejo, lo que dificulta el uso de métodos exactos debido a su alto costo computacional.

Ante este panorama, los métodos de búsqueda heurísticos se presentan como una alternativa eficiente para obtener soluciones de buena calidad en un tiempo razonable.

En este proyecto se propone el uso del algoritmo Búsqueda Tabú (Tabu Search) para encontrar rutas de distribución óptimas o cercanas al óptimo en una empresa hipotética ubicada en Culiacán, Sinaloa, la cual cuenta con múltiples centros de distribución y tiendas. El sistema busca mejorar la eficiencia logística al minimizar la distancia recorrida y el consumo de combustible, contribuyendo así a la toma de decisiones en la gestión del transporte.

Objetivo General

Diseñar e implementar una solución computacional basada en el algoritmo heurístico de Búsqueda Tabú para optimizar las rutas de distribución desde centros de distribución hacia tiendas en Culiacán, Sinaloa, mejorando la eficiencia logística y reduciendo costos operativos.

Objetivos Específicos

1. Analizar el problema logístico de distribución en la zona de estudio.
2. Modelar el problema como un caso de optimización combinatoria, considerando distancias y consumo de combustible.
Seleccionar y justificar el uso del algoritmo Búsqueda Tabú como método heurístico más adecuado.
3. Desarrollar una implementación computacional del algoritmo seleccionado.
4. Simular escenarios de distribución con datos proporcionados o generados de forma ficticia.
5. Evaluar el desempeño de la solución mediante métricas relevantes.
6. Documentar el proceso completo del proyecto.

Justificación

La logística de transporte representa una de las áreas más críticas dentro de las operaciones de distribución, ya que influye directamente en los costos totales y en la

eficiencia del servicio. En el mundo moderno, la logística es considerada la *"columna vertebral del comercio global"* (Ballou, 2004), y sus costos de transporte suelen representar entre el 50% y el 70% de los costos logísticos totales (Mentzer et al., 2001). Optimizar las rutas de distribución permite reducir el consumo de combustible y los tiempos de entrega, lo que genera beneficios económicos y, crucialmente, una *"reducción significativa de la huella de carbono"* (McKinnon, 2018).

El problema central que aborda este proyecto es el Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP), definido como el proceso de encontrar rutas óptimas para una flota de vehículos que sirven a un conjunto de clientes (Toth & Vigo, 2014). Nuestra investigación aborda una variante más compleja: el VRP con Múltiples Depósitos (MDVRP), que implica tanto la asignación de cada una de las 90 tiendas a uno de los 10 Centros de Distribución (CDs) como la secuenciación óptima de las visitas.

No obstante, esta complejidad hace que el VRP sea un problema NP-Hard, lo que significa que el tiempo de cálculo para encontrar la solución exacta crece exponencialmente con el número de puntos. Ante esta intratabilidad, los métodos heurísticos se presentan como una alternativa esencial, pues entregan una solución de muy alta calidad en un tiempo computacional razonable (Blum et al., 2011).

Específicamente, el algoritmo Búsqueda Tabú (Tabu Search - TS), desarrollado originalmente por Fred Glover (1986), ofrece una solución robusta. El TS se distingue por el uso de una "memoria adaptativa" (la Lista Tabú) para guiar la búsqueda y evitar el ciclo vicioso de repetir soluciones. Además, utiliza un "Criterio de Aspiración" que permite ignorar la restricción tabú si el movimiento resulta en una solución mejor que la mejor solución global encontrada (Glover & Laguna, 1997). Esta inteligencia en la exploración permite obtener mejores soluciones que otros métodos de búsqueda local. Implementar este enfoque en un sistema computacional permitirá demostrar cómo los métodos metaheurísticos pueden apoyar la toma de decisiones estratégicas en problemas de optimización logística.

Alcance

El proyecto se enfoca en el problema de optimización de rutas de distribución para una empresa hipotética con centros de distribución y tiendas en Culiacán, Sinaloa.

- Se utilizarán datos de 10 centros de distribución y 90 tiendas.
- Los datos incluirán latitud y longitud, así como matrices de distancias (km) y consumo de combustible (litros) entre todos los puntos.

- Se asumirá que solo un camión por centro de distribución como máximo realizará la entrega.
- No se considerarán variables relacionadas con inventarios, cantidades de productos, capacidades de carga o tiempos de entrega.
- No se mostrarán rutas gráficas en mapa, únicamente la solución óptima (orden de visita y costo total) encontrada por el algoritmo.
- El resultado esperado es determinar la ruta más eficiente para cada centro de distribución y analizar el rendimiento del método Tabú bajo distintos parámetros.

Desarrollo

Modelado del Problema

El problema se enmarca como una variación del Problema de Enrutamiento de Vehículos con Múltiples Depósitos (MDVRP), donde cada uno de los 10 Centros de Distribución (CDs) actúa como un punto de partida y llegada para un vehículo.

Función Objetivo (Minimización de Costo)

El objetivo principal del proyecto es encontrar las rutas que resulten en el mínimo costo total de distribución. Este costo no es simplemente la distancia, sino una medida ponderada que integra dos variables críticas:

1. Distancia Recorrida (en km): La longitud total de todas las rutas de los camiones.
2. Consumo de Combustible (en litros): La cantidad total de combustible gastado para completar todas las entregas.

En términos simples: La Función Objetivo suma la distancia total y el consumo de combustible total de todas las rutas, pero ajusta estos valores mediante pesos (por ejemplo, 60% para la distancia y 40% para el combustible). El algoritmo busca la combinación de rutas que arroje el valor más bajo en esta suma ponderada, logrando así la máxima eficiencia logística.

Restricciones Clave

1. Visita Única: Cada una de las 90 tiendas debe ser visitada por un solo camión (es decir, asignada a un solo Centro de Distribución).
2. Rutas Cerradas: Cada camión debe iniciar su recorrido en su Centro de Distribución asignado y regresar a él tras completar todas sus entregas.
3. Variables Excluidas: De acuerdo con el alcance, no se consideran variables logísticas adicionales como la capacidad de carga del camión, los tiempos de servicio en las tiendas o la demanda de productos.

Algoritmo Heurístico: Búsqueda Tabú (Tabu Search - TS)

Justificación de la Selección

La Búsqueda Tabú es el algoritmo elegido porque representa un metaheurístico de alta calidad para problemas de optimización combinatoria como el VRP. Su principal ventaja sobre métodos más simples es su capacidad para escapar de los óptimos locales.

En un problema con muchas tiendas y centros de distribución, una búsqueda tradicional podría quedarse "atascada" en una solución que parece buena localmente, pero que no es la mejor globalmente. El TS evita esto utilizando una memoria adaptativa que le permite explorar soluciones temporalmente peores si esto abre el camino hacia una solución global mucho mejor. Esto garantiza una exploración más inteligente y profunda del espacio de soluciones.

Elementos de la Búsqueda Tabú Implementada

Componente TS	Descripción de la Implementación en el Proyecto
Representación de la Solución	La solución es un conjunto de rutas, donde cada ruta es una secuencia ordenada de tiendas que inician y terminan en un CD específico.
Estructura de Vecindario (Movimiento)	Se utiliza el movimiento Relocation (Reubicación). Este movimiento consiste en mover una tienda de su posición actual en una ruta y reinsertarla en una nueva posición dentro de cualquier ruta (puede ser otra ruta o una mejor posición en la misma ruta).
Lista Tabú	Es la memoria de corto plazo del algoritmo. Registra las tiendas reubicadas recientemente. Esto significa que si se mueve una Tienda A, esta tienda no podrá ser movida nuevamente durante un cierto número de iteraciones.
Tamaño de la Lista Tabú (Tabu Tenure)	Define por cuántas iteraciones un movimiento (la reubicación de una tienda) debe permanecer prohibido. Este tamaño es crucial y se define como una función del número total de nodos (10 CDs + 90 Tiendas), asegurando un equilibrio en la exploración.
Criterio de Aspiración	Es la "válvula de escape" de la lista tabú. Si un movimiento está prohibido (es decir, la tienda está en la lista tabú) pero produce una solución que es mejor que la mejor solución global encontrada hasta ahora, se permite el movimiento. Esto asegura que el algoritmo nunca descarte el óptimo verdadero.
Criterio de Parada	La ejecución del algoritmo finaliza cuando se alcanza un número máximo de iteraciones sin que se haya logrado una mejora en el mejor costo total global. Esto garantiza que la búsqueda termine en un tiempo razonable.

Tabla 1: Elementos de la búsqueda tabú implementada en el desarrollo del proyecto.

Implementación Computacional

El proyecto se desarrolla utilizando el lenguaje de programación Python. Las librerías clave empleadas son Pandas para la lectura y el manejo de los datos de entrada (matriz de distancias y coordenadas de tiendas/CDs) y la estructura "deque" (cola de doble extremo) para implementar de manera eficiente la Lista Tabú.

Resultado de la Optimización

Simulación	Costo solución inicial	Costo solución óptima (Encontrado con Búsqueda Tabú)	% de mejora
1	1448.448872	1294.393652	10.64
2	1377.873185	1192.290461	13.47
3	1412.870974	1254.926989	11.18
4	1433.996658	1268.690006	11.53
5	1440.621242	1238.917312	14.00

Tabla 2: Resultados comparativos entre los costos iniciales y finales al utilizar el algoritmo de optimización con porcentaje de mejora.

El algoritmo de Búsqueda Tabú implementado demostró una eficacia significativa en la optimización de las rutas de distribución.

La reducción en el costo total de la ruta obtenida por la solución óptima (o cercana al óptimo) hallada por el algoritmo, en comparación con la solución inicial generada aleatoriamente, se situó en un rango notable del 10% al 14%.

Esta mejora porcentual no es meramente un resultado teórico, sino un indicador directo de optimización y eficiencia logística al traducirse en beneficios tangibles, tales como:

- Ahorro Operativo Directo: Una reducción de 10% a 14% en el costo ponderado (distancia y combustible) representa un ahorro considerable en los costos variables del transporte.
- Decisión Estratégica: Este resultado valida el uso de metaheurísticos (como la Búsqueda Tabú) como una herramienta robusta y viable para la toma de decisiones estratégicas en problemas logísticos complejos (VRP con Múltiples Depósitos), superando la ineficiencia de las soluciones generadas sin un proceso de optimización formal.

Área de trabajo

Fase del Proyecto	Actividad	Duración estimada	Periodo (2025)
I. Análisis y Modelado			
1. Análisis del problema	Análisis de datos ficticios (10 CDs, 90 Tiendas) y definición de variables de costo ponderado (Cij).	1 día	1 de octubre
2. Modelado del problema	Formulación de la Función Objetivo (Minimización del Costo) y definición de la estructura de rutas (MDVRP).	1 día	2 de octubre
II. Implementación del Algoritmo			

3. Selección y justificación	Revisión teórica del algoritmo Búsqueda Tabú y sus componentes (Lista Tabú, Criterio de Aspiración, Movimiento Relocation).	1 día	3 de octubre
4. Implementación básica	Desarrollo de la solución inicial, la función de costo y el movimiento de vecindario (Relocation).	1 día	4 de octubre
5. Desarrollo de TS avanzado	Implementación de la Lista Tabú ("deque"), el Criterio de Aspiración y los criterios de parada.	2 días	5-6 de octubre
III. Experimentación y Resultados			
6. Calibración de parámetros	Ajuste empírico del tamaño de la Lista Tabú (Tabu Tenure) y de los pesos α, β para el costo.	2 días	7-8 de octubre
7. Simulación y pruebas	Ejecución de múltiples escenarios y verificación de la robustez del algoritmo (Debugging final).	1 día	9 de octubre
8. Análisis de resultados	Evaluación del desempeño (métrica de reducción de costo vs. solución inicial) y tiempo de convergencia.	1 día	10 de octubre
IV. Documentación Final			
9. Redacción de conclusiones	Síntesis del impacto, logros y limitaciones del método Búsqueda Tabú en el problema logístico.	1 día	11 de octubre
10. Documentación completa	Integración del informe final y preparación de la presentación del proyecto.	1 día	12 de octubre

Tabla 3: Cronograma de fechas estimadas para cada fase del proyecto.

Conclusiones

El proyecto ha validado con éxito el algoritmo de Búsqueda Tabú (Tabu Search - TS) como una estrategia robusta y eficiente para abordar el Problema de Enrutamiento de Vehículos con Múltiples Depósitos (MDVRP).

La implementación computacional del TS demostró su capacidad para superar las limitaciones de los métodos exactos, ofreciendo soluciones de alta calidad en un tiempo computacional razonable, a pesar de la complejidad combinatoria del escenario de 10 Centros de Distribución y 90 tiendas.

El impacto principal se refleja en los resultados de optimización: El algoritmo logró una reducción significativa en el costo total de las rutas, oscilando entre el 10% y el 14% en comparación con las soluciones iniciales. Este margen de mejora de doble dígito confirma la eficiencia logística del método, traducándose directamente en ahorros sustanciales en costos operativos y consumo de combustible.

En resumen, el sistema desarrollado no solo valida teóricamente la eficacia del TS, sino que también ofrece un prototipo funcional que puede servir como base para la toma de decisiones estratégicas en la gestión del transporte. Las futuras líneas de investigación podrán enfocarse en la expansión del modelo para integrar restricciones de capacidad, ventanas de tiempo de entrega y la visualización geográfica de las rutas, ampliando así su aplicabilidad directa en entornos logísticos reales.

Referencias

Ballou, R. H. (2004). Business Logistics/Supply Chain Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain (5th ed.). Prentice Hall.

https://books.google.com.mx/books/about/Business_Logistics_supply_Chain_Management.html?id=sgsdQAAACAAJ&redir_esc=y

Blum, C., Puchinger, J., Raidl, G. R., & Roli, A. (2011). Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. Applied Soft Computing, 11(6), 4135–4151.

<https://www.iia.csic.es/~christian.blum/downloads/HM-blum-et-al-2011.pdf>

Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers & Operations Research, 13(5), 533–549.

https://www.researchgate.net/publication/222721339_Future_Paths_for_Integer_Programming_and_Links_to_Artificial_Intelligence_Computers_Operations_Research_13_533-549

Glover, F., & Laguna, M. (1997). Tabu Search. Kluwer Academic Publishers.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-6089-0>

McKinnon, A. (2018). Decarbonizing Logistics: Distributing Goods in a Low-Carbon World. Kogan Page.

<http://koganpage.com/product/decarbonising-logistics-9780749483807>

Mentzer, J. T., Stank, T. P., & Esper, T. L. (2001). Supply chain management: Defining the concept and its future. Journal of Business Logistics, 22(2), 1–25.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3249860>

Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications (2nd ed.). Society for Industrial and Applied Mathematics.

https://books.google.com.mx/books/about/Vehicle_Routing.html?id=AoTTBQAAQBAJ&redir_esc=y