



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN

Ingeniería en Sistemas Computacionales

Tópicos de Inteligencia Artificial

Hora: 12:00 – 01:00 PM

Sistema de enrutamiento para tiendas de conveniencia usando
modelos combinatorios con metaheurísticas como recocido
simulado

Equipo:

Peña López Miguel Ángel

Robles Rios Jacquelin

Docente:

Mora Félix Zuriel Dathan

Culiacán, Sinaloa

06/10/2025

1 INDICE

2	INTRODUCCIÓN	3
3	OBJETIVO GENERAL	3
3.1	OBJETIVO ESPECIFICOS	3
4	JUSTIFICACIÓN	4
5	ALCANCE	4
6	DESARROLLO	5
6.1.1	Fundamentos de las metaheurísticas	5
6.2	Modelado del problema	7
6.2.1	Elementos del modelo	7
6.3	Diseño de la solución con recocido simulado	8
6.4	Implementación computacional	9
6.4.1	Pseudocódigo de Recocido Simulado	9
6.5	Pruebas y validación	10
7	AGENDA DE TRABAJO	11
8	CONCLUSIÓN	12
9	REFERENCIAS	13

2 INTRODUCCIÓN

La eficiencia logística, específicamente en la distribución de productos es un pilar fundamental para la rentabilidad y competitividad en el sector minorista y de servicios alimentarios. En un mercado caracterizado por la alta frecuencia en pedidos y la exigencia en la disponibilidad de productos, surge la necesidad de optimizar las rutas de distribución desde los centros de distribución hacia las sucursales.

Este se presenta como un problema de enrutamiento de vehículos (VRP), un desafío actual de optimización combinatoria clasificado como NP-hard, lo que significa que encontrar una solución óptima es inalcanzable en un tiempo razonable para problemas de gran escala mediante métodos exactos.

Ante esto, las metaheurísticas surgen como la herramienta ideal para encontrar soluciones adecuadas de una forma eficiente. Es por ello por lo que este proyecto se enfoca en la optimización de las rutas de distribución de productos comestibles desde los centros de distribución hacia una red de sucursales de una cadena de restaurantes ubicada en **Culiacán, Sinaloa** mediante el uso de metaheurísticas como el recocido simulado. Los desafíos logísticos en esta zona incluyen la gestión de distancias variables, los costos operativos asociados al combustible.

3 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar una solución computacional mediante el uso de una metaheurística (Recocido Simulado o Búsqueda Tabú) con el objetivo de optimizar las rutas de distribución de productos de abarrotes desde los centros de distribución a las sucursales en Culiacán, Sinaloa, con el fin de mejorar la eficiencia logística y reducir los costos operativos totales.

3.1 OBJETIVO ESPECIFICOS

- Analizar y comprender los desafíos logísticos actuales y los factores clave que impactan la distribución en la zona de estudio.
- Seleccionar y justificar el algoritmo heurístico más adecuado para resolver el problema VRP.
- Desarrollar una implementación computacional robusta del algoritmo seleccionado, integrando los datos de distancias y costos.
- Evaluar el desempeño de la solución mediante métricas logísticas clave comparando los resultados con una solución de línea base.
- Documentar el proceso completo del proyecto, desde el análisis inicial hasta la evaluación de los resultados.

4 JUSTIFICACIÓN

La gestión logística de la distribución es un factor crítico para la rentabilidad de cualquier cadena de suministro, siendo el costo de transporte y la eficiencia en la entrega elementos determinantes.

El problema de diseño de rutas para la distribución de productos desde los centros de distribución a las sucursales de una cadena de tiendas de conveniencia en Culiacán, Sinaloa, se clasifica como un **problema de enrutamiento de vehículos (VRP)**, un desafío de la optimización combinatoria.

Este problema VRP es inherentemente lo que hace que, para instancias de gran tamaño como la red de tiendas en Culiacán, la búsqueda de la solución óptima mediante métodos exactos sea inviable debido al tiempo computacional prohibitivo. Es por ello que se justifica la aplicación de métodos de búsqueda heurísticos o metaheurístico, tal como lo respaldan referencias que señalan: *"Actualmente, existen problemas cuya resolución puede encontrarse dentro de las aplicaciones de la ingeniería... [como] crear un plan de mínimo costo para repartir mercancías a clientes..."* (2021). *Narraciones de Ciencia y Tecnología*.

Entre estas metaheurísticas, el algoritmo de recocido simulado, en particular, se fundamenta en su capacidad para escapar de los óptimos locales mediante la aceptación probabilística de peores soluciones en las etapas iniciales, permitiendo una exploración más profunda del espacio de soluciones. La efectividad de este enfoque sigue el precedente de aplicaciones exitosas en problemas logísticos complejos, que mencionan que *"Concluyendo, el algoritmo de recocido simulado tiene una vasta aplicación en muchos tipos de problemas de la vida real y es uno de los más utilizados con muy buenos resultados."* (Narraciones de Ciencia y Tecnología, 2021)

De este modo, el proyecto no solo busca obtener una solución, sino también validar la efectividad de una metaheurística frente a una solución de línea base, proporcionando una herramienta práctica para la toma de decisiones logísticas de la cadena de tiendas.

5 ALCANCE

El presente proyecto tiene como alcance el desarrollo de un modelo de optimización combinatoria y su implementación, desde cero, del algoritmo heurístico seleccionado (recocido simulado o búsqueda tabú) para resolver una variante del Problema de enrutamiento de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP).

La función objetivo se centrará en la minimización del costo total de distribución calculado con la distancia recorrida se define como el **Costo Total de Distribución** de todas las rutas de la solución actual. Este costo se calcula como la suma del costo de combustible de cada segmento entre dos nodos adyacentes de la ruta

6 DESARROLLO

6.1.1 Fundamentos de las metaheurísticas

Las metaheurísticas son estrategias o técnicas diseñadas para encontrar soluciones de buena calidad en problemas de optimización combinatoria complejos, donde soluciones exactas resultan inviables para problemas de gran tamaño.

Estas técnicas son procedimientos de búsqueda que, si bien no garantizan la obtención del óptimo global, se basan en la aplicación de reglas inteligentes que permiten explorar eficientemente el espacio de soluciones. Las técnicas metaheurísticas tratan de evitar quedar atrapadas en los óptimos locales enfocando la búsqueda según la evolución del proceso de búsqueda.

La lógica de las metaheurísticas suele ser similares, comienzan desde una (o varias) solución inicial que suele ser no la óptima y genera soluciones vecinas similares, de las cuales se toma aquella que cumpla con algún criterio de aceptación y se repite el proceso hasta llegar a la condición de terminación.

Estas técnicas metaheurísticas tienen características como:

- No garantizan la obtención de la solución óptima absoluta, pero encuentran soluciones de alta calidad en tiempos computacionales razonables.
- Son algoritmos aproximativos y, por lo tanto, no garantizan la obtención de la solución óptima.
- En ocasiones aceptan soluciones peores o no factibles como estrategia para escapar de óptimos locales y explorar nuevas regiones del espacio de búsqueda.
- Requieren de una representación adecuada del espacio de soluciones, una solución inicial y un mecanismo para explorar las soluciones.

A pesar de que las soluciones ofrecidas por las técnicas metaheurísticas no son las óptimas, estas nos permiten obtener soluciones de problemas con gran complejidad de una forma sencilla y en tiempos razonables.

6.1.1.1 Búsqueda tabú

La búsqueda tabú fue propuesta por Fred Glover en 1986 y su nombre está relacionado a tabú como 'prohibición de algo que constituye un riesgo'. En el caso de esta técnica los tabúes se reflejan en las prohibiciones en el proceso de búsqueda, cabe decir además que:

“Búsqueda tabú es una técnica metaheurística que guía un algoritmo de búsqueda local con la finalidad de evitar que el proceso quede atrapado en un óptimo local,

permitiendo una exploración adecuada del espacio de configuraciones.” (2015). PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

A diferencia de otras metaheurísticas, La filosofía central de la búsqueda tabú se basa en el uso de memoria adaptativa y exploración responsiva. Esto permite guiar un procedimiento de búsqueda local de manera inteligente hacia el óptimo global, explotando la historia del proceso de resolución.

6.1.1.2 Recocido simulado

El recocido simulado es una metaheurística inspirada en el proceso metalúrgico de recocido, donde un material es calentado a una alta temperatura y luego enfriado lentamente para que así sus átomos se reorganicen, resultando en un material más resistente.

Esto se aplica a la optimización combinatoria, donde el algoritmo inicia con soluciones que representan estados con alta temperatura o energía y mediante un enfriamiento lento y controlado, se exploran las soluciones para así converger hacia una con energía mínima. Se dice que:

Como una herramienta para ser empleada en la solución de grandes problemas combinatoriales, surgió del campo de la termodinámica y como consecuencia de la comparación de problemas formulados en este campo con los del campo de la investigación operacional, es una metodología simple y de gran potencialidad que puede ser aplicada a una gran variedad de problemas. (2015). PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

El recocido simulado incorpora criterios que permiten que en ocasiones se acepten soluciones que empeoran la función objetivo, esto es crucial para escapar de los óptimos locales, principalmente en etapas iniciales del proceso, donde la temperatura es alta y la probabilidad de aceptar soluciones poco favorables es mayor. A medida que la temperatura disminuye, el algoritmo se vuelve más selectivo permitiendo así refinar las soluciones más prometedoras.

6.1.1.3 Comparativa y selección de metheurística

Característica	Recocido simulado	Búsqueda tabú
Mecanismo de escape de óptimos locales	Aceptación probabilística de peores soluciones (dependiente de la temperatura).	Uso de memoria (listas tabúes) para prohibir movimientos que conduzcan a ciclos o a óptimos locales ya visitados.
Complejidad de implementación	Generalmente más simple de implementar, centrado en el esquema de enfriamiento.	Más complejo debido a la necesidad de implementar y gestionar memorias de corto y largo plazo (frecuencia, aspiración).
Sensibilidad a parámetros	Muy sensible al programa de enfriamiento (temperatura inicial, tasa de enfriamiento, longitud de la cadena de Markov).	Sensible a la definición de la vecindad, el tamaño de la lista tabú, y las estrategias de intensificación/diversificación.

Tabla 1 Comparativa y Selección de metaheurísticas (2015). PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

6.2 Modelado del problema

El problema de enrutamiento de vehículos de distribución en Culiacán tiene la complejidad de gestionar múltiples puntos de origen para los vehículos, es decir hay más de un centro de distribución. En el contexto de este proyecto, los depósitos representan los centros de distribución estratégicamente ubicados en la zona de estudio, mientras que las tiendas de conveniencia constituyen los puntos de demanda a ser servidos.

Para el modelado de este problema, se debe definir un modelo matemático que capture los elementos clave de la tarea a optimizar, lo cual servirá como la base para el algoritmo de recocido simulado.

6.2.1 Elementos del modelo

En el contexto específico para el desarrollo de este proyecto, los elementos clase son los siguientes:

- Centros de distribución (Depósitos):

Representan las instalaciones logísticas desde donde parten los vehículos de reparto. En Culiacán, se consideran 10 centros de distribución estratégicamente ubicados para cubrir eficientemente el área metropolitana. Cada centro posee una flota vehicular, sin embargo, se desconocen los detalles de esta.

- Sucursales (Clientes):

Constituyen los puntos de demanda que deben ser servidos mediante el sistema de distribución. Se consideran 90 sucursales distribuidas en el área de cobertura, cada una con una demanda específica de productos que debe ser satisfecha mediante visitas de los vehículos de reparto.

- Red de transporte:

Comprende el conjunto de conexiones viables entre los diferentes nodos de la red (centros de distribución y sucursales). Cada conexión posee asociada una distancia específica y un costo operativo derivado principalmente del consumo de combustible.

6.3 Diseño de la solución con recocido simulado

El diseño de la solución se basa en una implementación robusta del algoritmo de **recocido simulado (RS)** para abordar el **MDVRP**. La estrategia se centra en la correcta parametrización de los elementos de control para garantizar la exploración eficiente del espacio de soluciones.

Función Objetivo:

$$Costo\ Total = \sum_{ruta\ r} \left(\sum_{(i,j)} Costo\ Combustible_{i,j} \right)$$

Elemento del RS	Implementación Especifica
Función objetivo (E)	Minimización del costo total de distribución. Se calcula sumando los costos de combustible de cada segmento de ruta utilizando la matriz de costos
Solución inicial	Método aleatorio: Se asigna cada una de las 90 tiendas a un CD aleatorio, y luego se secuencia el orden de visita dentro de cada ruta de forma aleatoria. Cada ruta debe comenzar y terminar en su Centro de Distribución.
Mecanismo de generación de vecindad	Movimientos combinados: Se selecciona un tipo de movimiento al azar en cada iteración: Inter-Ruta (mover una tienda de un CD a otro) o Intra-Ruta (intercambiar dos tiendas dentro de la misma ruta).
Esquema de Enfriamiento	Geométrico: La temperatura se reduce con $T_{k+1} = T_k * a$. La aceptación de soluciones peores se rige por la probabilidad de Boltzmann ($P = e^{ -\Delta E/T}$).

Tabla 2: Elementos del algoritmo

6.4 Implementación computacional

La solución se desarrolló utilizando el lenguaje de programación Python, aprovechando sus librerías de cálculo numérico y manejo de datos.

- **Lenguaje y Librerías:** Python, con el uso de Pandas para la carga de las matrices de datos y NumPy para las operaciones matriciales de costo y distancia.
- **Modelo de Datos:** El problema involucra 100 nodos: 10 Centros de Distribución (índices 0-9) y 90 Tiendas/Clientes (índices 10-99). La función de costo utiliza la MATRIZ_COSTO_TOTAL.
- **Lógica Principal:** La función “recocido_simulado” maneja el bucle de temperatura (T) y las cadenas de Markov (iteraciones por temperatura), actualizando la solución actual y la mejor solución global encontrada.

6.4.1 Pseudocódigo de Recocido Simulado

El algoritmo de Recocido Simulado (RS) para el Problema de Enrutamiento de Vehículos con Múltiples Depósitos (MDVRP) sigue la probabilidad de Boltzmann y el programa de enfriamiento geométrico.

```
RecocidoSimulado(T_inicial, T_final, factor_enfriamiento, iteraciones_por_T):  
    // 1. Inicialización  
    S_actual = Generar_Solucion_Inicial_Aleatoria()  
    E_actual = Calcular_Costo(S_actual)  
    S_mejor = S_actual  
    E_mejor = E_actual  
    T = T_inicial  
  
    // 2. Bucle Principal de Enfriamiento  
    MIENTRAS T > T_final:  
        // Cadena de Markov (Iteraciones por Temperatura)  
        PARA i DE 1 HASTA iteraciones_por_T:  
            // 3. Generación de Vecindad  
            S_vecina = Generar_Solucion_Vecina(S_actual)  
            E_vecina = Calcular_Costo(S_vecina)  
  
            Delta_E = E_vecina - E_actual  
  
            // 4. Criterio de Metropolis  
            SI Delta_E < 0:  
                // Aceptar la solución vecina (es mejor)  
                S_actual = S_vecina  
                E_actual = E_vecina  
  
            SINO:  
                // Aceptar con Probabilidad  
                P = e(-Delta_E / T)  
                SI Random(0, 1) < P:  
                    S_actual = S_vecina  
                    E_actual = E_vecina  
  
            // 5. Actualizar Mejor Solución Global  
            SI E_actual < E_mejor:  
                S_mejor = S_actual  
                E_mejor = E_actual  
  
        // 6. Enfriamiento Geométrico  
        T = T * factor_enfriamiento
```

Ilustración 1: Pseudocódigo Recocido Simulado

6.5 Pruebas y validación

La solución de Recocido Simulado se ejecutó utilizando los siguientes parámetros de control:

Parametro	Valor
Temperatura inicial	1000
Factor de enfriamiento (α)	0.995
Temperatura final	0.1
Iteraciones x temperatura	100

Tabla 3: Parametros del algoritmo

Resultados de Optimización

Simulación	Costo solución inicial	Costo solución óptima (Recocido Simulado)	Mejora %
<i>Costo Total 1er Intento de simulación</i>	184.48	31.52	82.91%
<i>Costo Total de Distribución 2do Intento de simulación</i>	166.43	32.17	80.67%
<i>Costo Total de Distribución 3er Intento de simulación</i>	169.20	34.69	79.50%
<i>Costo Total de Distribución 4to Intento de simulación</i>	179.94	33.44	81.42%
<i>Costo Total de Distribución 5to Intento de simulación</i>	154.59	31.99	79.30%

Tabla 4: Resultados de aplicación del algoritmo Recocido Simulado en MDVRP

La reducción de alrededor de 79-82 % **en el costo total** valida la efectividad del Recocido Simulado para optimizar las rutas de distribución en el MDVRP, logrando una eficiencia logística significativamente mayor que un enrutamiento inicial sin optimizar.

7 AGENDA DE TRABAJO

Fase	Tarea	Duración en días
<i>Análisis y Modelado</i>	<ul style="list-style-type: none"> Análisis del problema logístico (MDVRP y restricciones). Definición de los elementos del modelo (nodos, matrices, función objetivo). 	2 días
<i>Diseño y Algoritmo</i>	<ul style="list-style-type: none"> Investigación y justificación de la metaheurística (recocido simulado). Diseño de la estructura de datos y los mecanismos de vecindad. 	2 días
<i>Implementación</i>	<ul style="list-style-type: none"> Codificación de la solución inicial y la función de costo. Implementación del algoritmo de Recocido Simulado (Boltzmann y enfriamiento). 	2 días
<i>Pruebas y Validación</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de simulaciones y ajuste de parámetros (T inicial, α, iteraciones). Evaluación del desempeño y comparación con la línea base. 	2 días
<i>Documentación</i>	<ul style="list-style-type: none"> Redacción del informe final (introducción, diseño, implementación, resultados). Preparación de la presentación y conclusiones. 	1 día

Tabla 5: Agenda de trabajo para implementación de la investigación

8 CONCLUSIÓN

El presente proyecto culminó con éxito el diseño e implementación de un sistema de enrutamiento basado en la metaheurística de recocido simulado (RS) para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con múltiples depósitos para la cadena de tiendas en Culiacán, Sinaloa.

El análisis inicial confirmó la naturaleza del problema logístico, justificando la elección de la metaheurística del recocido simulado sobre métodos exactos, gracias a su capacidad demostrada para escapar de los óptimos locales y explorar eficazmente el espacio de soluciones combinatorias.

El resultado clave es contundente: la aplicación del algoritmo de recocido simulado, mediante un esquema de enfriamiento geométrico controlado, logró una reducción del 79-82% en el costo total de distribución al optimizar las rutas vehiculares. Este resultado valida la hipótesis central del proyecto: la optimización mediante metaheurísticas proporciona una solución práctica y económica superior a las soluciones de línea base aleatorias.

En resumen, este sistema computacional no solo cumple con los objetivos de minimizar costos y mejorar la eficiencia logística, sino que establece una herramienta programable y adaptable que puede ser integrada en las operaciones diarias para lograr una distribución más inteligente y sostenible en la cadena de suministro de la empresa.

9 REFERENCIAS

- Peralta Abarca , J. del C. ., Juárez Chávez , J. Y. ., & Martínez Bahena, B. . (2021). Aplicaciones de recocido simulado en problemas de optimización combinatoria. *Inventio*, 11(23), 23–28. Recuperado a partir de <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/281>
- Álvaro, L. B., & Felipe, R. T. A. (2015). *Solución del problema de restauración de sistemas de distribución usando los métodos de optimización metaheurísticos recocido simulado y búsqueda tabú*. Repositorio De La Universidad Tecnológica De Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/1624db50-639e-4d48-83da-60cb8999ddc6>
- de la CruzH., J. J., MendozaB., A., del CastilloCh., A., & PaterninaA., C. D. (2003). Análisis comparativo de las aproximaciones heurísticasAnt-Q, recocido simulado y búsqueda tabú en la solución del problema del agente viajero. *Ingeniería y Desarrollo*, (14), 141-157.
- Osman, I. H. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 41(4), 421–451. <https://doi.org/10.1007/bf02023004>