

Tecnológico Nacional de México

Instituto Tecnológico de Culiacán



**Proyecto de Investigación: Optimización de rutas de distribución usando Recocido Simulado.**

**INTEGRANTES:**

Aviles Bravo Cesar Amado

Valenzuela Berrelleza Cesar Jesus

**DOCENTE:**

Zuriel Dathan Mora Felix

## Introducción

La optimización de la logística de distribución es un factor crítico para la competitividad y rentabilidad en la industria de alimentos. En el contexto de Culiacán, Sinaloa, donde la expansión de cadenas de restaurantes exige una gestión eficiente de la cadena de suministro, la minimización de los costos operativos asociados al transporte se convierte en una prioridad. El problema de determinar las rutas más eficientes desde los centros de distribución (CDDs) hasta las sucursales (Tiendas, TTs), considerando las restricciones de capacidad vehicular y la demanda, se formaliza como un Problema de Enrutamiento de Vehículos con Múltiples Depósitos (MDVRP)

## **Objetivo General**

Diseñar e implementar una solución computacional basada en el algoritmo heurístico recocido simulado para optimizar las rutas de distribución de productos comestibles desde centros de distribución hacia sucursales de una cadena de restaurantes en Culiacán, Sinaloa, mejorando la eficiencia logística y reduciendo costos operativos.

## **Objetivos Específicos**

- Analizar el problema logístico de distribución de productos comestibles en la zona de estudio.
- Modelar el problema como un caso de optimización combinatoria.
- Seleccionar y justificar el uso del algoritmo heurístico más adecuado.
- Desarrollar una implementación computacional del algoritmo seleccionado.
- Simular escenarios de distribución con datos reales o ficticios.
- Evaluar el desempeño de la solución mediante métricas relevantes.
- Documentar el proceso completo del proyecto.

## **Justificación**

Este proyecto es lo hacemos porque nuestro sistema actual de reparto de comida en Culiacán está gastando demasiado dinero en gasolina. Al planear las rutas manualmente, nuestros camiones recorren más kilómetros de lo necesario, lo cual es ineficiente y muy costoso. Para solucionar esto, estamos creando un algoritmo avanzado usando una técnica llamada Recocido Simulado. Esta técnica nos permite encontrar las rutas perfectas que reducen al máximo el kilometraje total, algo imposible de hacer a mano o con software simple.

La meta del proyecto es ahorrar una cantidad significativa de dinero en combustible, asegurando que las entregas sean más rápidas y eficientes.

## Alcance

El proyecto se enfocará en:

- **Modelado del Problema:** Definir y estructurar el MDVRP para la distribución de la cadena de restaurantes, incluyendo 10 Centros de Distribución (CDDs) y 90 Tiendas (TTs), basados en coordenadas geográficas simuladas de Culiacán.
- **Función Objetivo:** La optimización se enfocará estrictamente en la minimización del gasto total de gasolina, utilizando una matriz de costos predefinida (simulada).
- **Implementación Heurística:** El desarrollo y la calibración del algoritmo de Recocido Simulado (SA), incluyendo la implementación de los operadores de vecindad.
- **Restricciones de Capacidad:** La solución debe garantizar que la demanda total de las tiendas asignadas a cualquier ruta no exceda la capacidad del vehículo.
- **Resultados Cuantitativos:** Generar un reporte de resultados que muestre el costo final óptimo de gasolina y la reducción porcentual lograda en comparación con una solución inicial heurística.

Para mantener el enfoque y la viabilidad del proyecto, se excluyen los siguientes aspectos:

- **Datos de Tráfico o Dinámicos:** El modelo se basa en una **matriz de costos estática y simulada**. No se considerarán variables dinámicas en tiempo real, como congestión del tráfico, tiempos de espera en CDDs o TTs, o variaciones en el precio del combustible.
- **Restricciones de Ventana de Tiempo (Time Windows):** El modelo no abordará el VRP con Ventanas de Tiempo (VRPTW). Se asume que todas las entregas pueden realizarse en un solo turno de distribución sin límites de tiempo estrictos para cada sucursal.
- **Implementación en Producción o GIS:** El código desarrollado es un **prototipo de simulación** y optimización. No se incluye la integración con sistemas de información geográfica (GIS) comerciales o sistemas de rastreo vehicular (GPS).
- **Otros Algoritmos:** La investigación se limita estrictamente a la metaheurística de **Recocido Simulado**. No se comparará su desempeño con otras heurísticas (como Búsqueda Tabú, A\*, etc).

Al finalizar el proyecto, se espera obtener los siguientes resultados:

1. **Modelo de Rutas Óptimas:** Un conjunto de rutas válidas para cada Centro de Distribución (CDD) que asigna todas las 90 tiendas (TTs) cumpliendo con la restricción de capacidad.

2. **Métrica de Ahorro:** La mejor solución global obtenida por el Recocido Simulado, expresada como el Gasto Mínimo de Gasolina total.
3. **Análisis de Desempeño:** Una evaluación clara del desempeño de la solución, mostrando el porcentaje de reducción de costos logrado respecto a la solución inicial.
4. **Conclusiones y Recomendaciones:** Un análisis de la efectividad del Recocido Simulado para el MDVRP y recomendaciones sobre la aplicabilidad del modelo en escenarios logísticos reales

## Desarrollo

El principal objetivo de la implementación computacional es minimizar el costo logístico total (gasto de combustible) asociado a la distribución de productos a 90 tiendas (TT) desde 10 centros de distribución (CDD).

El algoritmo busca determinar:

1. **Asignación Óptima:** A qué CDD debe ser asignada cada tienda (TT).
2. **Secuencia Óptima:** El orden de visita más eficiente para cada vehículo dentro de su ruta asignada.

Todo esto se realiza respetando la capacidad máxima de cada vehículo de distribución y forzando la utilización de los 10 depósitos disponibles (restricción de disponibilidad).

¿Qué algoritmos usamos?

Nuestro algoritmo que utilizamos para resolver este problema es el recocido simulado, utilizamos este algoritmo debido a su naturaleza estocástica, este método garantiza que en sentido probabilístico, el óptimo global será alcanzado.

El recocido simulado es un método metaheurístico que permite solucionar problemas de optimización global. Debido a su naturaleza estocástica, este método garantiza que, en sentido probabilístico, el óptimo global será alcanzado. Su principal desventaja es que el tiempo de búsqueda puede tornarse infinito.[1]

El recorrido simulado es especialmente efectivo para resolver problemas de larga escala (multidimensionales) en los que el óptimo global se encuentra escondido detrás de muchos óptimos locales. [2], [3]

El parámetro de temperatura en el recocido simulado controla el equilibrio entre exploración y explotación del algoritmo. A temperaturas altas, el algoritmo explora libremente el espacio de soluciones, aceptando regularmente movimientos que empeoran la solución actual. A medida que la temperatura disminuye según un programa de enfriamiento, el algoritmo se vuelve más selectivo, enfocándose en explotar las áreas prometedoras del espacio de soluciones.[5]

Escogimos este algoritmo ya que estamos familiarizados con este algoritmo y tenemos algo de dominio con este mismo, el comportamiento de este algoritmo es por la temperatura, cuando la temperatura es alta que viene siendo el inicio el sistema aceptará malas soluciones con una alta probabilidad, permitiendo una amplia exploración aleatoria. Mientras que cuando el sistema tenga una baja temperatura el sistema se comportará de manera similar a una búsqueda local, aceptando solo mejores soluciones. Asimismo el sistema se irá enfriando y

convergiendo hacia la mejor solución encontrada. Ambos enfoques emplean estrategias inteligentes para evitar los óptimos locales y encontrar las mejores soluciones globales. El recocido simulado reduce gradualmente la aleatoriedad, mientras que la búsqueda tabú utiliza la memoria para guiar su búsqueda, lo que las hace eficaces para una amplia gama de problemas de optimización complejos. [4]

## Resultados Obtenidos:

### R1:

Nuestros principales parámetros para esta ejecución del recocido son los siguientes:

- T Inicial: 100
- T Final: 0.5
- Factor Enfriamiento: 0.95
- Interaciones por temperatura: 200

Paso 16010 -> Costo=\$3,106.56	T=1.65
Paso 17010 -> Costo=\$3,084.66	T=1.28
Paso 18010 -> Costo=\$3,033.88	T=0.99
Paso 19010 -> Costo=\$2,958.61	T=0.77
Paso 20010 -> Costo=\$2,922.11	T=0.59
--- FIN DEL RECOCIDO SIMULADO (Total Pasos: 20800) ---	

```
REPORTE FINAL DE DISTRIBUCIÓN (Ruta Óptima por Gasto de Gasolina)
=====
Gasto Total de Gasolina: $2,813.90
Tiendas Surtidas: 90 | Distribuidores Utilizados: 10 / 10

Distribuidor: CDD1 (Ruta 1)
- Costo de Gasolina: $611.61
- Tiendas a Surtir: 14
- Ruta Óptima: CDD1 -> TT3 -> TT44 -> TT79 -> TT6 -> TT78 -> TT1 -> TT62 -> TT15 -> TT85 -> TT14 -> TT71 -> TT7 -> TT25 -> TT60 -> CDD1

Distribuidor: CDD10 (Ruta 2)
- Costo de Gasolina: $561.27
- Tiendas a Surtir: 13
- Ruta Óptima: CDD10 -> TT77 -> TT5 -> TT76 -> TT29 -> TT35 -> TT50 -> TT84 -> TT87 -> TT48 -> TT18 -> TT59 -> TT39 -> TT2 -> CDD10

Distribuidor: CDD2 (Ruta 3)
- Costo de Gasolina: $245.26
- Tiendas a Surtir: 10
- Ruta Óptima: CDD2 -> TT72 -> TT64 -> TT10 -> TT38 -> TT37 -> TT31 -> TT16 -> TT8 -> TT47 -> TT34 -> CDD2

Distribuidor: CDD3 (Ruta 4)
- Costo de Gasolina: $243.30
- Tiendas a Surtir: 12
- Ruta Óptima: CDD3 -> TT63 -> TT52 -> TT9 -> TT32 -> TT81 -> TT30 -> TT74 -> TT56 -> TT21 -> TT88 -> TT33 -> TT46 -> CDD3

Distribuidor: CDD4 (Ruta 5)
- Costo de Gasolina: $369.74
- Tiendas a Surtir: 11
- Ruta Óptima: CDD4 -> TT73 -> TT36 -> TT20 -> TT65 -> TT40 -> TT19 -> TT57 -> TT55 -> TT75 -> TT41 -> TT27 -> CDD4

Distribuidor: CDD5 (Ruta 6)
- Costo de Gasolina: $205.32
- Tiendas a Surtir: 8
- Ruta Óptima: CDD5 -> TT28 -> TT90 -> TT82 -> TT17 -> TT54 -> TT51 -> TT89 -> TT69 -> CDD5

Distribuidor: CDD6 (Ruta 7)
- Costo de Gasolina: $251.59
- Tiendas a Surtir: 8
- Ruta Óptima: CDD6 -> TT12 -> TT23 -> TT42 -> TT13 -> TT83 -> TT70 -> TT24 -> TT86 -> CDD6
```

## R2:

Nuestros principales parámetros para esta ejecución del recocido son los siguientes:

- T Inicial: 500
- T Final: 0.5
- Factor Enfriamiento: 0.98
- Interaciones por temperatura: 100

Paso 24010 -> Costo=\$2,839.85	T=3.92
Paso 25010 -> Costo=\$2,798.37	T=3.20
Paso 26010 -> Costo=\$2,790.82	T=2.62
Paso 27010 -> Costo=\$2,740.92	T=2.14
Paso 28010 -> Costo=\$2,717.43	T=1.75
Paso 29010 -> Costo=\$2,678.23	T=1.43
Paso 30010 -> Costo=\$2,667.88	T=1.17
Paso 31010 -> Costo=\$2,626.06	T=0.95
Paso 32010 -> Costo=\$2,595.34	T=0.78
Paso 33010 -> Costo=\$2,581.40	T=0.64
Paso 34010 -> Costo=\$2,583.82	T=0.52

--- FIN DEL RECOCIDO SIMULADO (Total Pasos: 34200) ---

REPORTE FINAL DE DISTRIBUCIÓN (Ruta Óptima por Gasto de Gasolina)

---

Gasto Total de Gasolina: \$2,567.04  
Tiendas Surtidas: 90 | Distribuidores Utilizados: 10 / 10

---

Distribuidor: CDD1 (Ruta 1)  
- Costo de Gasolina: \$8.92  
- Tiendas a Surtir: 1  
- Ruta Óptima: CDD1 -> TT60 -> CDD1

Distribuidor: CDD10 (Ruta 2)  
- Costo de Gasolina: \$432.42  
- Tiendas a Surtir: 12  
- Ruta Óptima: CDD10 -> TT39 -> TT37 -> TT90 -> TT54 -> TT51 -> TT89 -> TT3 -> TT70 -> TT83 -> TT20 -> TT57 -> TT56 -> CD  
D10

Distribuidor: CDD2 (Ruta 3)  
- Costo de Gasolina: \$251.37  
- Tiendas a Surtir: 13  
- Ruta Óptima: CDD2 -> TT34 -> TT31 -> TT87 -> TT50 -> TT35 -> TT58 -> TT66 -> TT80 -> TT68 -> TT61 -> TT43 -> TT22 -> TT  
84 -> CDD2

Distribuidor: CDD3 (Ruta 4)  
- Costo de Gasolina: \$283.22  
- Tiendas a Surtir: 12  
- Ruta Óptima: CDD3 -> TT40 -> TT65 -> TT55 -> TT75 -> TT4 -> TT53 -> TT33 -> TT74 -> TT46 -> TT52 -> TT9 -> TT32 -> CDD3

Distribuidor: CDD4 (Ruta 5)  
- Costo de Gasolina: \$78.19  
- Tiendas a Surtir: 4  
- Ruta Óptima: CDD4 -> TT25 -> TT7 -> TT86 -> TT24 -> CDD4

## Agenda

Fase	Título de la Fase	Actividades Clave (Objetivos Específicos)	Duración Estimada	Fechas Estimadas
I	Conceptualización y Modelado	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Análisis del problema logístico (MDVRP).</li> <li>· Desarrollo del Marco Teórico y Justificación.</li> <li>· Modelado computacional del problema (DatosVRP, SolucionVRP).</li> </ul>	4 Semanas	13 Oct – 07 Nov
II	Implementación del Algoritmo	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Implementación de la clase RecocidoSimulado.</li> <li>· Codificación de la función objetivo y restricciones.</li> <li>· Desarrollo de los operadores de vecindad (Swap y 2-Opt).</li> </ul>	3 Semanas	10 Nov – 28 Nov
III	Experimentación y Optimización	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Determinación y calibración de los parámetros del SA (<math>T_{\text{initial}}, \alpha</math>).</li> <li>· Ejecución de simulaciones y obtención de la solución óptima (Gasto Mínimo de Gasolina).</li> <li>· Evaluación de la Carga utilizada por ruta.</li> </ul>	3 Semanas	01 Dic – 19 Dic
IV	Análisis y Documentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Análisis del desempeño (Costo Final vs. Inicial).</li> <li>· Redacción de Conclusiones y Recomendaciones.</li> <li>· Documentación final del proceso (Memoria o Tesis).</li> <li>· Revisión final y entrega del proyecto.</li> </ul>	4 Semanas	22 Dic – 16 Ene

## Conclusión

El Recocido Simulado demostró ser una solución de optimización muy efectiva para nuestro problema de reparto en Culiacán. Al aplicarlo, el algoritmo encontró rutas mucho más eficientes que las usadas anteriormente, logrando reducir notablemente el gasto total de gasolina. Este resultado valida que usar técnicas avanzadas, basadas en la ubicación de los almacenes y las tiendas, es el mejor camino para controlar y disminuir los costos operativos.

El proyecto es exitoso porque nos da las mejores rutas posibles cumpliendo con todas las capacidades de los camiones. Este modelo establece una base sólida que la empresa puede usar de inmediato para la toma de decisiones logísticas. Es importante seguir mejorando el modelo, por ejemplo, probando si otras técnicas de optimización son incluso más rápidas o si podemos incluir más detalles operativos, como los horarios exactos de entrega, para asegurar que la solución sea aún más precisa y completa.

## Referencias

- [1] J. Deng, C. Chang, and Z. Yang, "An exact random number generator for visiting distribution in gsa," *energy*, vol. 2, no. 2, 1987. 119, 120, 121, 127
- [2] C. Carletti, P. Meoli, and W. R. Cravero, "A modified simulated annealing algorithm for parameter determination for a hybrid virtual model," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 51, no. 16, pp. 3941-3952, jul 2006. 118, 119, 120
- [3] M. A. Moret, P. G. Pascutti, P. M. Bisch, and K. C. Mundim, "Stochastic molecular optimization using generalized simulated annealing," *Journal of Computational Chemistry*, vol. 19, no. 6, pp. 647-657, apr 1998.
- [4] *Recocido simulado y búsqueda tabú*. (s/f). Cincoable. Recuperado el 13 de octubre de 2025, de <https://fiveable.me/optimization-systems/unit-14/simulated-annealing-tabu-search/study-guide/ko9TqLSSi3U54Sqh>
- [5] Eurystic. (2024, 7 noviembre). *Algoritmo de Recocido Simulado: Optimización Inspirada en la Física*. Eurystic. <https://eurysticsolutions.com/es/2024/11/07/algoritmo-de-recocido-simulado-optimizacion-inspirada-en-la-fisica/>

Link de github:

<https://github.com/valenzuela03/TOPICOS-IA.git>