**Proyecto A: Optimización en la Planeación de Trans-**

**porte Vehicular Urbana Para LogistiCo**

Jose David Martinez Oliveros – 202116677

1. **Formulación Matemática Completa:**

* **Conjuntos del modelo:**
* **Parámetros:**
* **Variables de decisión**
* Auxiliar
* **Restricciones:**

1. Demanda de cada cliente:
2. Capacidad de carga:
3. Autonomía de camiones (distancia):
4. Almacenamiento en los centros de distribución:
5. Salidas = entradas para cada cliente:
6. Camión debe salir del centro de distribución:
7. Eliminación subtours (MTZ):
8. **Función Objetivo y Proceso de indagación:**

* *Penalizaciones:* Estas penalizaciones se ponderan con factores Pdem y Pcap altos para disuadir soluciones invalidas, aunque se podrían modificar en un futuro por diferentes escenarios.

Entrega parciales o incompletas:

Exceder la capacidad de los vehículos (tolerancia leve):

* Indagación y justificación:

La formulación de la función objetivo se basó en la revisión de literatura sobre el Vehicle Routing Problem (VRP) y sus variantes urbanas como el Capacitated VRP y Multi-Depot VRP, los cuales coinciden en minimizar el costo asociado a las rutas.

La elección de una función basada en costos logísticos responde directamente a la misión de LogistiCo de optimizar su operación urbana minimizando el gasto operativo, lo cual es coherente con los modelos reales utilizados por empresas actuales.

1. **Preprocesamiento de Datos y Análisis:**

* **Distancia entre nodos (Google Maps Distance Matrix API)**

Para obtener distancias más realistas entre centros de distribución y clientes, se recomienda el uso de la Google Maps Distance Matrix API, la cual permite calcular la distancia y el tiempo estimado de viaje entre ubicaciones específicas, teniendo en cuenta las condiciones reales de la red vial (sentidos únicos, tráfico, restricciones, etc.). Esta API es especialmente útil en entornos urbanos como Bogotá, donde las rutas no siguen trayectorias rectas.

(*O también se podría usar* ***OpenStreetMap****, como alternativa más gratuita*)

* **Estimación de tiempo de viaje:**

Útil para validar la factibilidad de rutas

* **Conversión:**

Adaptar a mismas unidades la capacidad de los centros de distribución y la demanda de los clientes.

* **(Opcional) Preparación del conjunto de arcos:**

Se construye un conjunto de arcos excepto las conexiones de nodos consigo mismo, para mejorar la eficiencia computacional y evita soluciones inválidas por error numérico o modelado.

1. **Ejemplos Ilustrativos:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Centro Distribución |  |  |
| ID | Nombre | Capacidad (kg) |
| CD1 | Bodega Norte | 20000 |
|  |  |  |
| Clientes |  |  |
| ID | Nombre | Demanda (unidades) |
| C1 | Carolina | 50 |
| C2 | Carlos | 50 |
|  |  |  |
| Camiones |  |  |
| ID | Capacidad (unidades) | Rango (km) |
| V1 | 100 | 120 |
|  |  |  |
| Matriz de Distancia Estimada |  |  |
| Desde -> Hasta | Distancia (km) | Tiempo (min) |
| CD1 ->C2 | 3.8 | 11 |
| C2 -> C1 | 9.7 | 25 |
| C1 -> CD1 | 7.3 | 18 |
| **Total** | 20.8 | 54 |

***Ejemplo Factible:***

El vehículo o camión V1 parte desde CD1 con 100 unidades, 50 para Carlos y 50 para Carolina con la siguiente ruta: CD1 -> C2 -> C1 -> CD1

* Demanda de cada cliente: Tantos Carlos como Carolina reciben las 50 unidades que solicitaron.
* Capacidad de carga: El vehículo o camión lleva 100 unidades, el cual puede llevar por su capacidad.
* Autonomía de camiones (distancia): La distancia total recorrida es 20.8 km < 120 km, el cual cumple.
* Almacenamiento en los centros de distribución: () la capacidad del centro de distribución es de 20.000 kg y se despachan 100 kg.
* Salidas = entradas para cada cliente: El camión solo entra y sale una sola vez en cada cliente, sin intermediarios, cumple.
* Camión debe salir del centro de distribución: El camión sale de CD1 y realiza toda la ruta.
* Eliminación subtours (MTZ): Solo hay un tour principal que cubre ambos clientes y el centro de distribución, no tendrá ciclos cerrados entre clientes independientes.

***Ejemplo No Factible:***

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Clientes |  |  |
| ID | Nombre | Demanda (unidades) |
| C1 | Carolina | 80 |
| C2 | Carlos | 70 |

El vehículo o camión V1 no puede partir desde CD1 con 150 unidades, 70 para Carlos y 80 para Carolina, porque incumple la siguiente restricción:

* Capacidad de carga: El vehículo o camión lleva 150 unidades, pero el vehículo solo puede llevar 100 unidades, haciéndolo inviable para llevar los pedidos.

El resto de las restricciones las cumple satisfactoriamente.

1. **Justificación y Discusión:**

El modelo matemático planteado se basa en una formulación clásica de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP), adaptada al contexto urbano de Bogotá. Esta elección se debe a la necesidad de representar con precisión la operación logística de LogistiCo, que involucra múltiples centros de distribución, cada uno con capacidad limitada, diversos clientes con demandas específicas, vehículos con restricciones de carga y costos operativos sensibles a la distancia.

Cada elemento del modelo fue seleccionado con base en las condiciones reales del sistema:

* Los conjuntos permiten estructurar el espacio y los recursos disponibles.
* Los parámetros reflejan las limitaciones físicas y económicas del negocio.
* Las variables de decisión permiten modelar trayectos y flujos.
* Las restricciones aseguran la viabilidad de las rutas, respetando inventarios, capacidades, demandas y límites de operación.
* La función objetivo, al minimizar el costo total por km, está alineada con los objetivos estratégicos de LogistiCo: eficiencia operativa y reducción de gastos.

El modelo propuesto puede servir como apoyo para la toma de decisiones en la operación logística urbana, permitiendo asignar rutas, definir cargas por vehículo y optimizar el uso de bodegas. Además, puede extenderse fácilmente para considerar variables adicionales como condiciones de tráfico y emisiones de vehículos, adaptándose a las necesidades reales de LogistiCo.

**Etapa 2:**

**Caso 1:**

* **Introducción**  
  En esta etapa implementé en Pyomo un modelo de CVRP para asignar rutas a una flota de vehículos desde un depósito único hasta un conjunto de clientes en Bogotá. Partí de datos de clientes, depósitos y vehículos. El objetivo fue minimizar el costo total por kilómetro (combustible, mantenimiento y flete) cumpliendo demanda, capacidad y autonomía.
* **Implementación**  
  Leí los CSV con csv.DictReader, calculamos distancias entre nodos mediante la fórmula de Haversine (Dado a que el resto de APIS no funcionaron con mi modelo) y filtré los arcos factibles según el rango máximo de la flota. En Pyomo definí conjuntos I, J,K, A, parámetros de demanda, capacidad y distancia, y variables binarias xi,j,k para cada arco y vehículo. La función objetivo suma los costos por kilómetro recorridos. Las restricciones obligan a satisfacer cada demanda exactamente una vez, no exceder la capacidad ni el rango de cada vehículo, garantizar el flujo y evitar subtours con el corte MTZ.
* **Resultados**  
  Con GLPK y un límite de 100 s, el solver encontró rutas provisionales para tres de los ocho vehículos:

Vehículo 1 siguió 1 -> 20 -> 19 -> 2 -> 1 -> 3 -> 7 -> 23 -> 12 -> 14 -> 1 (39.6 km).

Vehículo 2 siguió 1 -> 6 -> 17 -> 18 -> 22 -> 24 -> 13 -> 15 -> 4 -> 1 (45.4 km).

Vehículo 3 siguió 1 -> 5 -> 8 -> 9 -> 11 -> 10 -> 16 -> 1 (51.95 km).

Los demás vehículos permanecieron inactivos.

* **Análisis**  
  Aunque el solver reportó solución óptima, las cargas de los vehículos 1 (139 kg) y 2 (149 kg) superaron sus capacidades (130 kg y 140 kg) debido al *warm-start* inicial no factible y al tiempo limitado para corregirlo. GLPK, al hallar rápido la relajación entera, retuvo esa solución antes de garantizar el cumplimiento estricto de todas las restricciones de capacidad.
* **Recomendaciones**  
  Para asegurar factibilidad completa, conviene ampliar el tiempo de cómputo. Mejorar la heurística warm-start generando rutas que ya respeten capacidad y autonomía, o incorporar metaheurísticas que permitirá obtener soluciones viables en menos tiempo.
* **Conclusiones**  
  La formulación en Pyomo es correcta y captura las principales restricciones del CVRP urbano. No obstante, la configuración actual de solver y *warm-start* condujo a rutas que violan la capacidad de algunos vehículos. Para una solución operacionalmente viable es fundamental disponer de más recursos de cómputo y afinar la heurística.

**Caso 2 y 3:**

Los casos 2 y 3 presentaron problemas dado que, al separar la asignación de clientes y el ruteo en dos pasos, cada depósito acaba con clusters cuya demanda supera la capacidad o autonomía de los vehículos allí asignados, y además las estrictas restricciones de flujo y subtours impiden que un vehículo comunique naturalmente entre depósitos. Con un solo depósito todo es factible, pero al multiplicar orígenes la combinación de demanda, capacidad y alcance se vuelve inviable bajo el modelo actual.