

Modelo de Optimización

Supuestos

- Para los casos estándar se busca que los vehículos completen sus rutas sin necesidad de hacer paradas adicionales para recargar combustible o energía.
- Se asume que todos los clientes pasados en los datos tienen IDs distintos.
- En este modelo base no se tienen en cuenta recargas de combustible/energía, ni distintos tipos de productos, por ahora.

Conjuntos

- N : Conjunto de nodos.
- $TP = \{\text{Cliente}, \text{Depósito}\}$: Tipos de nodo.
- V : Conjunto de vehículos.
- $TV = \{\text{Gasolina/Gas}, \text{EV}, \text{Dron}\}$: Tipos de vehículos.

Parámetros

- $\text{CostoCarga} \in \mathbb{R}^+$: Costo asociado a la actividad de carga de productos por minuto (COP/min).
- $\text{CostoDescarga} \in \mathbb{R}^+$: Costo asociado a la actividad de descarga de productos por minuto (COP/min).
- $\text{VelocidadCarga} \in \mathbb{R}^+$: Velocidad de carga expresada en minutos por kilogramo (min/kg).
- $\text{VelocidadDescarga} \in \mathbb{R}^+$: Velocidad de descarga expresada en minutos por kilogramo (min/kg).
- $\text{CostoInactividad} \in \mathbb{R}^+$: Costo de inactividad (COP/min).
- $\text{TipoNodo} : N \rightarrow TP$: Define el tipo de cada nodo geográfico.
- $\text{UbicacionNodo} : N \rightarrow \mathbb{R} \times \mathbb{R}$: Ubicación de un nodo geográfico, en grados decimales.
- $\text{DemandaEnvio} : N \rightarrow \mathbb{R}$: Demanda de un envío en kilogramos (kg). Válido para nodos de tipo cliente. Los nodos de tipo depósito tienen un valor de 0 aquí.
- $\text{CapacidadDeposito} : N \rightarrow \mathbb{R}$: Capacidad máxima de almacenamiento que puede soportar el depósito (kg). Válido para nodos de tipo depósito. Para nodos de tipo cliente este valor es cero.
- $\text{TipoVehiculo} : V \rightarrow TV$: Define el tipo de un vehículo.
- $\text{CapacidadVehiculo} : V \rightarrow \mathbb{R}^+$: Capacidad máxima de carga que puede transportar el vehículo (kg).
- $\text{RangoVehiculo} : V \rightarrow \mathbb{R}^+$: Distancia máxima que puede recorrer el vehículo con una carga completa de combustible o energía (km).
- $\text{TarifaFleteTipoVehiculo} : TV \rightarrow \mathbb{R}^+$: Costo por kilómetro recorrido por el tipo de vehículo (COP/km).
- $\text{TarifaHorariaTipoVehiculo} : TV \rightarrow \mathbb{R}^+$: Costo por minuto de operación del tipo de vehículo (COP/min).
- $\text{MantenimientoTipoVehiculo} : TV \rightarrow \mathbb{R}^+$: Costo diario de mantenimiento del tipo de vehículo (COP/día).
- $\text{CostoRecargaTipoVehiculo} : TV \rightarrow \mathbb{R}^+$: Costo de recarga o combustible por unidad (COP/gal para gasolina/gas, COP/kWh para vehículos eléctricos).

- $TiempoRecargaTipoVehiculo : TV \rightarrow \mathbb{R}^+$: Tiempo necesario para recargar un 10% de la capacidad total de energía o combustible del tipo de vehículo (min/10% de carga).
- $VelocidadTipoVehiculo : TV \rightarrow \mathbb{R}^+$: Velocidad promedio del vehículo (km/h).
- $EficienciaTipoVehiculo : TV \rightarrow \mathbb{R}^+$: Eficiencia del vehículo en consumo (km/gal o kWh/km).
- d_{ijv} : Distancia o costo entre nodos i y j según el tipo de vehículo tv . Calculada usando OSRM para vehículos terrestres y Haversine para drones.

Variabiles de Decisión

- $z_{cv} \in \{0, 1\}$: Variable binaria que establece si el cliente c es asignado al vehículo v .
- $r_{ijv} \in \{0, 1\}$: Variable binaria que establece si el vehículo v se desplaza del nodo i al nodo j . Esta variable, con ayuda de las restricciones, define una ruta circular.
- $a_{vd} \in \{0, 1\}$: Variable binaria que establece si el vehículo v es asignado al depósito d .
- $u_{iv} \in \mathbb{R}$: Variable continua que representa la posición del nodo i en la ruta del vehículo v .

Funciones de Utilidad

- **Cientes en la ruta del vehículo v :**

$$ClientesRuta(v) = \{i \in N : z_{iv} = 1\}$$

- **Rutas del vehículo v :**

$$RutasVehiculo(v) = \{(i, j) \in N \times N : r_{ijv} = 1\}$$

- **Distancia total recorrida por el vehículo v :**

$$DistanciaRuta(v) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ijv} \cdot r_{ijv}$$

- **Tiempo total gastado por el vehículo v :**

$$TiempoRuta(v) = \frac{DistanciaRuta(v)}{VelocidadTipoVehiculo(TipoVehiculo(v))}$$

- **Costo de carga de productos total:**

$$\begin{aligned} CostCarTot = & \sum_{v \in V} (CostoCarga \cdot VelocidadCarga \\ & + CostoDescarga \cdot VelocidadDescarga) \\ & \times \sum_{c \in ClientesRuta(v)} DemandaEnvio(c) \end{aligned}$$

- **Costo de distancia total:**

$$CostDistTot = \sum_{v \in V} TarifaFleteTipoVehiculo(TipoVehiculo(v)) \cdot DistanciaRuta(v)$$

- **Costo de tiempo total:**

$$CostTpTot = \sum_{v \in V} TarifaHorariaTipoVehiculo(TipoVehiculo(v)) \cdot TiempoRuta(v)$$

- **Costo de recarga total:**

$$CostRecTot = \sum_{v \in V} CostoRecargaTipoVehiculo(TipoVehiculo(v)) \cdot \frac{DistanciaRuta(v)}{EficienciaTipoVehiculo(TipoVehiculo(v))}$$

- **Costo de mantenimiento total:**

$$CostMant = \sum_{v \in V} MantenimientoTipoVehiculo(TipoVehiculo(v))$$

Función Objetivo

Minimizar el costo total de operación:

$$\min (CostCarTot + CostDistTot + CostTpTot + CostRecTot + CostMant)$$

Restricciones

1. **Conservación de flujo:**

$$\sum_{i \in N} r_{ijv} \leq \sum_{k \in N} r_{jik}, \quad \forall v \in V, \forall j \in N$$

Garantiza que si un vehículo llega a un nodo, también debe salir de él.

2. **Limitación de entradas y salidas:**

$$\sum_{i \in N} r_{ijv} \leq 1, \quad \sum_{i \in N} r_{jiv} \leq 1, \quad \forall v \in V, \forall j \in N$$

Asegura que cada vehículo visita cada nodo a lo sumo una vez.

3. **Solo se debe asignar un depósito a un vehículo con clientes asignados, y viceversa:**

$$\sum_{\substack{d \in N \\ TipoNodo(d)=Depósito}} a_{vd} = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{\substack{c \in N \\ TipoNodo(c)=Cliente}} z_{cv} \geq 1, \\ 0 & \text{si } \sum_{\substack{c \in N \\ TipoNodo(c)=Cliente}} z_{cv} = 0. \end{cases} \quad \forall v \in V$$

4. **No asignación de clientes como depósitos:**

$$\sum_{c \in N, TipoNodo(c)=Cliente} a_{vc} = 0, \quad \forall v \in V$$

5. **Salida desde el depósito asignado:**

$$\sum_{i \in N} r_{div} = a_{vd}, \quad \forall v \in V, \forall d \in N \text{ con } TipoNodo(d) = Depósito$$

Asegura que el vehículo sale de su depósito asignado.

6. **Regreso al depósito asignado:**

$$\sum_{i \in N} r_{idv} = a_{vd}, \quad \forall v \in V, \forall d \in N \text{ con } TipoNodo(d) = Depósito$$

Asegura que el vehículo regresa a su depósito asignado.

7. **Asignación de clientes a rutas:**

$$z_{iv} \leq \sum_{j \in N} r_{jiv}, \quad \forall v \in V, \forall i \in N$$

Asegura que si un cliente es asignado a un vehículo, este debe visitarlo.

8. **Relación entre rutas y clientes asignados:**

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} r_{ijv} - 1 \leq \sum_{c \in N, \text{TipoNodo}(c)=\text{Cliente}} z_{cv}, \quad \forall v \in V$$

Esta restricción asegura que el número de rutas realizadas por un vehículo, menos uno, no exceda el número de clientes asignados a dicho vehículo.

9. **No asignación de depósitos como clientes:**

$$\sum_{v \in V} z_{dv} = 0, \quad \forall d \in N \text{ con } \text{TipoNodo}(d) = \text{Depósito}$$

10. **Cada cliente es atendido una vez:**

$$\sum_{v \in V} z_{iv} = 1, \quad \forall i \in N \text{ con } \text{TipoNodo}(i) = \text{Cliente}$$

11. **Capacidad de carga del vehículo:**

$$\sum_{i \in N} z_{iv} \cdot \text{DemandaEnvio}(i) \leq \text{CapacidadVehiculo}(v), \quad \forall v \in V$$

12. **Capacidad de almacenamiento del depósito:**

$$\sum_{v \in V} a_{vd} \cdot \sum_{i \in N, \text{TipoNodo}(i)=\text{Cliente}} z_{iv} \cdot \text{DemandaEnvio}(i) \leq \text{CapacidadDeposito}(d), \quad \forall d \in N \text{ con } \text{TipoNodo}(d) = \text{Depósito}$$

- Los depósitos tienen una posición inicial $u_{dv} = 0$.
- Los clientes tienen posiciones en el rango $1 \leq u_{iv} \leq n_c$.
- La diferencia de posiciones entre nodos adyacentes en la ruta está acotada por $u_{iv} - u_{jv} + n_c \cdot r_{ijv} \leq n_c - 1$.

Se garantiza que la ruta del vehículo es continua y que no se generan subciclos separados del ciclo principal que inicia y termina en el depósito asignado. Esto es crucial para asegurar la eficiencia y viabilidad de las rutas planificadas.