

# Modelo Matemático para Optimización de Rutas de Vehículos

Andrés Felipe Pérez

Leonardo Rangel

December 7, 2024

## Conjuntos

- $C$ : Conjunto de **clientes**.
- $D$ : Conjunto de **depósitos**.
- $V$ : Conjunto de **vehículos**.
- $N = C \cup D$ : Conjunto total de **nodos** (clientes y depósitos).

## Parámetros

Para cada vehículo  $v \in V$ , nodo  $i, j \in N$ , y cliente  $i \in C$ :

- $\text{capacity}_v$ : Capacidad del vehículo  $v$ .
- $\text{range}_v$ : Rango máximo (distancia) que puede recorrer el vehículo  $v$ .
- $\text{cost\_km}_v$ : Costo por kilómetro para el vehículo  $v$ .
- $\text{cost\_min}_v$ : Costo por minuto para el vehículo  $v$ .
- $\text{cost\_fuel}_v$ : Costo por combustible o recarga para el vehículo  $v$ .
- $\text{cost\_load} = 100$ : Costo por unidad de carga transportada (por ejemplo, COP por kg).
- $\text{demand}_i$ : Demanda del cliente  $i$ .
- $\text{distance}_{i,j}$ : Distancia entre los nodos  $i$  y  $j$ .
- $\text{duration}_{i,j}$ : Duración del trayecto entre los nodos  $i$  y  $j$ .
- $\text{maintenance\_cost}_v$ : Costo de mantenimiento diario del vehículo  $v$ .
- $\text{gas\_efficiency}_v$ : Eficiencia de combustible del vehículo  $v$  (km/galón).
- $\text{recharge\_time}_v$ : Tiempo de recarga del vehículo  $v$  (minutos por cada 10% de carga).

## Variables de Decisión

- $x_{i,j,v} \in \{0,1\}$ : Variable binaria que indica si el vehículo  $v$  viaja de  $i$  a  $j$ .
- $u_{i,v} \geq 0$ : Variable auxiliar para el orden de visita del cliente  $i$  por el vehículo  $v$  (usada para eliminación de subtours).
- $v\_use_v \in \{0,1\}$ : Variable binaria que indica si el vehículo  $v$  es utilizado.
- $\text{carga}_{i,j,v} \geq 0$ : Carga transportada por el vehículo  $v$  desde  $i$  hasta  $j$ .

## Función Objetivo

Minimizar el costo total  $Z$ , que incluye:

$$Z = Costo_{\text{distancia}} + Costo_{\text{duración}} + Costo_{\text{mantenimiento}} + Costo_{\text{carga}} + Costo_{\text{combustible}} + Costo_{\text{recarga}}$$

donde:

$$\begin{aligned} Costo_{\text{distancia}} &= \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} cost\_km_v \cdot distance_{i,j} \cdot x_{i,j,v} \\ Costo_{\text{duración}} &= \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} cost\_min_v \cdot duration_{i,j} \cdot x_{i,j,v} \\ Costo_{\text{mantenimiento}} &= \sum_{v \in V} maintenance\_cost_v \cdot v\_use_v \\ Costo_{\text{carga}} &= \sum_{v \in V} \sum_{i \in C} \sum_{j \in N, i \neq j} cost\_per\_load \cdot demand_i \cdot x_{i,j,v} \\ Costo_{\text{combustible}} &= \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} cost\_fuel_v \cdot \frac{distance_{i,j}}{gas\_efficiency_v} \cdot x_{i,j,v} \\ Costo_{\text{recarga}} &= \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} cost\_min_v \cdot \left( \frac{distance_{i,j}}{gas\_efficiency_v} \right) \cdot \left( \frac{1}{recharge\_time_v} \right) \cdot x_{i,j,v} \end{aligned}$$

**Objetivo:** Minimizar  $Z$

## Restricciones

### 1. Cada Cliente es Visitado Exactamente una Vez

$$\sum_{v \in V} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} x_{i,j,v} = 1 \quad \forall i \in C$$

### 2. Conservación de Flujo para Cada Vehículo en Cada Nodo

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} x_{i,j,v} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} x_{j,i,v} \quad \forall v \in V, \forall i \in N$$

### 3. Definición de Uso del Vehículo

$$v\_use_v \cdot |N| \geq \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} x_{i,j,v} \quad \forall v \in V$$

### 4. Restricción de Rango del Vehículo

$$\sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} distance_{i,j} \cdot x_{i,j,v} \leq range_v \quad \forall v \in V$$

### 5. Salida de Depósito

$$\sum_{d \in D} \sum_{j \in C} x_{d,j,v} = 1 \quad \forall v \in V$$

## 6. Retorno al Depósito

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq d}} x_{d,j,v} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq d}} x_{j,d,v} \quad \forall v \in V, \forall d \in D$$

## 7. Capacidad del Vehículo

### a. Capacidad Total Transportada

$$\sum_{i \in C} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \text{demand}_i \cdot x_{i,j,v} \leq \text{capacity}_v \quad \forall v \in V$$

### b. Carga Transportada en Cada Trayecto

$$\text{carga}_{i,j,v} \leq \text{capacity}_v \cdot x_{i,j,v} \quad \forall v \in V, \forall i, j \in N, i \neq j$$

## 8. Satisfacción de la Demanda de Cada Cliente

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \sum_{v \in V} \text{carga}_{i,j,v} = \text{demand}_i \quad \forall i \in C$$

## 9. Eliminación de Subtours (Miller-Tucker-Zemlin, MTZ)

$$u_{i,v} - u_{j,v} + |C| \cdot x_{i,j,v} \leq |C| - 1 \quad \forall v \in V, \forall i, j \in C, i \neq j$$

## Variables

$$\begin{aligned} x_{i,j,v} &\in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \forall v \in V \\ u_{i,v} &\geq 0, \quad \forall i \in C, \forall v \in V \\ v\_use_v &\in \{0, 1\}, \quad \forall v \in V \\ \text{carga}_{i,j,v} &\geq 0, \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \forall v \in V \end{aligned}$$

## Descripción del Modelo y Justificaciones

1. **Objetivo:** Minimizar los costos totales asociados al transporte de cargas, incluyendo costos de distancia, tiempo, combustible, mantenimiento y carga transportada.

### 2. Restricciones

- **Cada cliente es visitado exactamente una vez:** Esta restricción garantiza que cada cliente en el conjunto  $C$  sea atendido una única vez por exactamente un vehículo. Matemáticamente, se asegura que la suma de las variables binarias  $x_{i,j,v}$  para cada cliente  $i$  y sobre todos los vehículos  $v$  y nodos  $j$  distintos de  $i$  sea igual a uno. Esto evita que un cliente no sea atendido o sea atendido múltiples veces, asegurando que todas las demandas de los clientes sean satisfechas de manera eficiente y sin redundancias.
- **Conservación de flujo para cada vehículo en cada nodo:** Esta restricción asegura la continuidad de las rutas para cada vehículo en cada nodo. Para cada vehículo  $v$  y cada nodo  $i$ , la cantidad de rutas que entran a  $i$  debe ser igual a la cantidad de rutas que salen de  $i$ . De esta manera, se evita que un vehículo quede atascado en un nodo sin poder continuar su ruta, manteniendo la coherencia y conectividad de las rutas asignadas.

- **Definición de uso del vehículo:** La variable binaria  $v\_use_v$  indica si un vehículo  $v$  es utilizado en alguna ruta. Esta restricción vincula el uso del vehículo con las rutas asignadas, de manera que si un vehículo realiza al menos una ruta (es decir, alguna  $x_{i,j,v} = 1$ ), entonces  $v\_use_v$  debe ser igual a uno. Esto permite contabilizar correctamente los costos fijos asociados a la utilización de cada vehículo (costo de mantenimiento y costo de carga), evitando incluir en los costos aquellos vehículos que no son empleados o tener redundancias (contabilizar el mismo costo asociado a un vehículo más de una vez) en el cálculo de los mismos.
- **Restricción de rango del vehículo:** Cada vehículo tiene un rango máximo de distancia que puede recorrer, representado por el parámetro  $range_v$ . Esta restricción asegura que la suma total de las distancias de todas las rutas asignadas a un vehículo  $v$  no exceda su rango permitido. Esto es crucial para evitar que los vehículos realicen trayectos inviables debido a limitaciones de combustible, tiempo de operación o desgaste excesivo.
- **Salida de depósito:** Esta restricción garantiza que cada vehículo inicie su ruta desde un depósito. Específicamente, para cada vehículo  $v$ , exactamente una ruta debe partir de un depósito  $d$  hacia algún cliente  $j$ . Esto asegura una organización logística coherente, ya que los vehículos generalmente deben partir de un punto de origen centralizado para comenzar sus operaciones de transporte.
- **Retorno al depósito de origen:** La restricción de retorno al depósito de origen asegura que cada vehículo que parte de un depósito eventualmente regrese a él al finalizar su ruta. Para cada vehículo  $v$  y cada depósito  $d$ , la cantidad de rutas que salen de  $d$  debe ser igual a la cantidad de rutas que regresan a  $d$ . Esta restricción es muy importante para completar ciclos de rutas coherentes, permitiendo que los vehículos vuelvan a su punto de origen para recargar combustible, realizar mantenimiento o prepararse para futuras operaciones. Sin esta restricción, los vehículos podrían terminar sus rutas en ubicaciones aleatorias, lo que complicaría la gestión logística y operativa, aumentando costos en términos de tiempo y dinero. Esto se suma a que es mucho más fácil y menos costoso que un vehículo vuelva al depósito de donde partió (un punto ya conocido) que hacer un proceso y los cálculos necesarios para encontrar el depósito más cercano para llegar a este al final de su ruta.
- **Satisfacción de la demanda de cada cliente:** Esta restricción garantiza que la demanda de cada cliente  $i$  sea completamente satisfecha. Se asegura que la suma de las cargas transportadas hacia cada cliente desde todos los nodos y por todos los vehículos  $v$  sea exactamente igual a la demanda  $demand_i$  del cliente. De esta manera, se evita tanto la escasez como el exceso de suministro, asegurando un equilibrio óptimo en la distribución de las cargas.
- **Eliminación de subtours (Miller-Tucker-Zemlin, MTZ):** La eliminación de subtours se usa para evitar la formación de ciclos cerrados que no incluyen al depósito, lo que resultaría en rutas inviables. Utilizando variables auxiliares  $u_{i,v}$ , esta restricción impone un orden secuencial en las visitas a los clientes, de manera que si un vehículo  $v$  viaja de un cliente  $i$  a otro cliente  $j$ , entonces la posición de  $j$  en la ruta debe ser exactamente una posición después de  $i$ . Esto previene la formación de ciclos innecesarios y asegura que las rutas formen secuencias continuas y coherentes desde el depósito hasta los clientes y de regreso al depósito.
- **Capacidad del vehículo:**
  - a. **Capacidad total transportada:** Esta subrestricción asegura que la carga total transportada por cada vehículo  $v$  no exceda su capacidad máxima  $capacity_v$ . Calculando la suma de las demandas de los clientes atendidos por el vehículo a través de todas sus rutas, se garantiza que no se sobrepase la capacidad de carga del vehículo, lo que es esencial para la viabilidad y seguridad operativa.
  - b. **Carga transportada en cada trayecto:** Además de la capacidad total, esta restricción vincula la carga transportada en cada trayecto individual  $carga_{i,j,v}$  con la utilización de la ruta  $x_{i,j,v}$ . Es decir, si una ruta  $i$  a  $j$  es utilizada por el vehículo  $v$ , entonces la carga transportada en ese trayecto no puede exceder la capacidad del vehículo. Esto asegura que las cargas asignadas a cada trayecto sean coherentes con las capacidades físicas de los vehículos.

## Cambios al Modelo

### 1. Incorporación de nuevas variables de decisión:

En el modelo actual se añadió la variable binaria  $v\_use[v]$ , que indica si un vehículo es utilizado en alguna ruta. Esta variable está vinculada a una restricción que asegura que los costos fijos de mantenimiento y carga solo se consideren si el vehículo realmente está en operación.

*Justificación:* En el modelo anterior, los costos de mantenimiento podían aplicarse a vehículos que no se usaban, lo que generaba un cálculo incorrecto de los costos totales.

*Ventaja:* Se mejora la precisión de los costos operativos al evitar gastos innecesarios en vehículos inactivos.

## 2. Mejoras en la Función Objetivo:

La función objetivo del modelo actual fue ampliada para incluir componentes adicionales de costo, como:

- *Costo de carga de productos (cost load).*
- *Costo de combustible/energía (cost fuel).*
- *Costo por tiempo de recarga (cost recharge).*

Además, se ajustó el cálculo del costo de **distancia recorrida** y **tiempo de operación** para considerar de manera específica cada tipo de vehículo (eléctricos y de combustión interna).

*Justificación:* El modelo anterior solo incluía algunos costos básicos (distancia y tiempo), pero no consideraba de manera detallada todos los aspectos operativos.

*Ventaja:* Se obtiene una evaluación más completa de los costos asociados a la operación logística, lo que permite una optimización más efectiva y realista.

## 3. Optimización de la asignación de vehículos:

El modelo actual optimiza la asignación de vehículos teniendo en cuenta:

- *Autonomía (range)* de cada vehículo.
- *Capacidad de carga (capacity)* específica para vehículos eléctricos y de combustión interna.
- *Demandas de los clientes (demand).*

*Justificación:* En el modelo anterior, la asignación de vehículos no consideraba estos factores de manera conjunta, lo que podía llevar a rutas inviables o ineficientes.

*Ventaja:* Se logra una asignación más eficiente de recursos, reduciendo costos operativos y optimizando el uso de cada tipo de vehículo según las características de la ruta.

## 4. Incorporación de restricciones de rango Operativo:

Se añadió una restricción específica para asegurar que los vehículos no excedan su rango máximo (*range*):

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N, i \neq j} \text{distance}_{i,j} \cdot x_{i,j,v} \leq \text{range}_v \quad \forall v \in V$$

*Justificación:* Esta restricción evita que los vehículos realicen trayectos que superen su autonomía, lo que en el modelo anterior no estaba garantizado.

*Ventaja:* Se asegura la viabilidad de las rutas planificadas, especialmente para los vehículos eléctricos que tienen limitaciones de autonomía.

## 5. Restricción de retorno al depósito:

Se implementó una restricción que obliga a cada vehículo a regresar al depósito del cual salió:

$$\sum_{j \in N, j \neq d} x_{d,j,v} = \sum_{j \in N, j \neq d} x_{j,d,v} \quad \forall v \in V, \forall d \in D$$

*Justificación:* En el modelo anterior, no siempre se garantizaba que los vehículos regresaran al depósito, lo que podía complicar la gestión logística.

*Ventaja:* Facilita la planificación de rutas y reduce costos adicionales asociados a vehículos que terminan en ubicaciones no planificadas.

## 6. Incorporación de carga transportada (*carga*):

Se agregó la variable  $carga[i, j, v]$  para registrar la carga transportada entre nodos específicos. Esta variable está vinculada a la capacidad máxima de cada vehículo:

$$carga_{i,j,v} \leq capacity_v \cdot x_{i,j,v}$$

*Justificación:* En el modelo anterior, no existía una variable específica para controlar la carga transportada en cada trayecto, lo que dificultaba asegurar que los vehículos no excedieran su capacidad.

*Ventaja:* Se garantiza que la carga asignada a cada ruta es coherente con la capacidad del vehículo, evitando sobrecargas y optimizando el uso de los recursos.

## 7. Restricción para satisfacer la demanda:

Se ajustó la restricción para asegurar que la demanda de cada cliente se satisfaga completamente mediante la variable de carga:

$$\sum_{j \in N, j \neq i} \sum_{v \in V} carga_{i,j,v} = demand_i \quad \forall i \in C$$

*Justificación:* El modelo anterior no garantizaba que se transportara la cantidad exacta de productos requerida por cada cliente.

*Ventaja:* Se asegura que todas las demandas sean atendidas de manera eficiente, evitando escasez o exceso de suministro.

## 8. Restricción de asignación de vehículos a depósitos:

Se agregó una restricción que asegura que cada vehículo está asignado a un único depósito:

$$\sum_{d \in D} y_{v,d} = 1 \quad \forall v \in V$$

*Justificación:* Esta restricción mejora la organización logística al asegurar que cada vehículo tenga un punto de origen definido.

*Ventaja:* Facilita la planificación de rutas y evita confusiones en la asignación de recursos.

# Análisis de Resultados

## 1. Escenario Base: Validación de Solución Factible

ID-Vehículo	Tipo Vehículo	Distancia Recorrida	Duración Recorrida	Carga Total	Costo Distancia	Costo Duración	Costo Mantenimiento	Costo Carga	Costo Fuel	Costo Recharge	Costo Total
0	Gas Car	6.7118	11.7600	15.0	33559.0	5880.0	30000.0	1500.0	10738.88	3355.90	85033.78
1	Gas Car	5.7917	9.436667	18.0	28958.5	4718.33	30000.0	1800.0	9266.72	2895.85	77639.40
2	Gas Car	5.6052	9.041667	12.0	28026.0	4520.83	30000.0	1200.0	8968.32	2802.60	75517.75
3	Gas Car	5.5040	13.236667	20.0	27520.0	6618.33	30000.0	2000.0	8806.40	2752.00	77696.73
4	EV	17.4370	27.398333	36.0	69748.0	13699.17	21000.0	3600.0	0.00	0.00	108947.17
5	EV	8.9662	16.171667	45.0	35864.8	8085.83	21000.0	4500.0	0.00	0.00	69450.63
6	EV	23.5572	36.771667	42.0	94228.8	18355.83	21000.0	4200.0	0.00	0.00	137784.63
7	EV	8.8776	20.886667	29.0	35510.4	10443.33	21000.0	2900.0	0.00	0.00	69853.73
8	EV	17.7686	27.500000	57.0	71074.4	13750.00	21000.0	5700.0	0.00	0.00	111524.40
9	Gas Car	2.6995	5.1783	10.0	13497.5	2589.17	30000.0	1000.0	4319.20	1349.75	52755.62
10	EV	29.2039	46.363333	82.0	116815.5	23181.67	21000.0	8200.0	0.00	0.00	169197.27
11	Gas Car	1.3408	3.841667	11.0	6704.0	1920.83	30000.0	1100.0	2145.28	670.40	42540.51

Table 1: Resumen de costos para vehículos Gas Car y EV

## Identificación de patrones o tendencias observadas en las rutas optimizadas

Al revisar los costos de cada tipo de vehículo, se observa un patrón claro en el que los vehículos eléctricos (EV) tienen costos más altos en términos de distancia recorrida, tiempo operativo y carga, lo que es congruente con la mayor demanda de clientes que deben satisfacer estos vehículos. Como los vehículos eléctricos son los que recorren mayores distancias y pasan más tiempo en funcionamiento, es natural que sus costos asociados a distancia, tiempo y carga sean más altos. Esto también se refleja en los costos de carga de productos a repartir, que son mayores para los EV debido a las mayores distancias recorridas y la necesidad de manejar más carga. Por ejemplo, el EV 6 tiene un costo total estimado de 137,784 unidades, el cual es elevado en comparación con los

vehículos a gasolina, debido a que este vehículo cubre distancias de más de 23 km, lo que implica no solo mayores costos de mantenimiento, sino también mayores costos asociados a la carga, dado que debe transportar más productos durante más tiempo. En contraste, los vehículos a gasolina como el Gas Car 9 tienen costos más bajos (alrededor de 52,755 unidades) debido a que recorren distancias más cortas y, por lo tanto, tienen menos tiempo de operación y carga. Este patrón es consistente con la teoría de que los vehículos eléctricos son más adecuados para operaciones de largo alcance, mientras que los vehículos a gasolina pueden ser más eficientes en trayectos cortos, donde los costos de operación no se disparan.

### **Análisis de los problemas encontrados en el modelado**

Respecto a los problemas encontrados en el modelado, el que tuvo más relevancia fue el relacionado a la modelación de los costos operativos, esto debido a que uno de los principales problemas es la asignación de vehículos según las características de las rutas y las demandas de los clientes. Los vehículos eléctricos (EV) tienen la ventaja de una mayor autonomía, lo que les permite recorrer distancias largas con una sola carga. Sin embargo, su capacidad de carga es más pequeña en comparación con los vehículos a gasolina, lo que los hace menos eficientes en rutas con alta demanda de carga. Al tener que realizar más paradas para satisfacer las demandas de los clientes, los vehículos eléctricos enfrentan costos más altos asociados a la carga de productos, a la distancia recorrida y al tiempo recorrido. Aunque los EV no tienen costos de combustible, sus mayores tiempos de operación debido a las múltiples paradas pueden generar un aumento significativo en los costos operativos.

Por otro lado, los vehículos a gasolina, con su mayor capacidad de carga, pueden cubrir más demanda de productos en un solo viaje, reduciendo así los costos de tiempo recorrido y carga de productos. Este tipo de vehículo es más eficiente en rutas con alta demanda, ya que puede cumplir con las necesidades de los clientes de manera más rápida, minimizando el número de paradas y el tiempo operativo. Sin embargo, los costos de combustible para los vehículos a gasolina aumentan a medida que se recorre una mayor distancia, lo que los hace menos eficientes en rutas largas.

### **Mejoras potenciales para optimizar los resultados y sugerencias para ajustes futuros**

- **Ajuste en la asignación de vehículos según la demanda de carga y la distancia recorrida:** Para optimizar la asignación de vehículos, es necesario considerar no solo la autonomía y el consumo de combustible, sino también la capacidad de carga y el número de paradas en cada ruta. Los vehículos eléctricos son adecuados para rutas largas con baja demanda de carga, donde su autonomía puede aprovecharse de manera óptima. En cambio, para rutas más cortas pero con alta demanda de productos, los vehículos a gasolina, con su mayor capacidad de carga, son más eficientes, ya que pueden transportar más mercancía en un solo viaje, reduciendo tanto los costos de tiempo recorrido como los de carga de productos.
- **Revisión del impacto del número de paradas en los costos de tiempo recorrido:** Los vehículos eléctricos, aunque tienen un rango de distancia y autonomía mayor, sumado a que no tienen costos relacionados al consumo de energía/combustible, están en operación por más tiempo debido a la mayor distancia y la frecuencia de paradas para satisfacer las demandas de los clientes. Por esto, este tiempo adicional de operación debe ser reflejado correctamente en los costos operativos. Además, es importante considerar que la distancia y el tiempo de operación adicional puede aumentar significativamente los costos, ya que el tiempo de recorrido está directamente relacionado con el costo por minuto de operación y la distancia con el costo por kilometro recorrido, que aunque es menor para los EV, la gran cantidad de kilometros que realizan lo hace un costo con un impacto considerable. Así es como ajustar este análisis permitirá obtener una representación más precisa de los costos operativos asociados a cada tipo de vehículo y así hacer una mejor elección de los vehículos.
- **Consideración de la capacidad de carga en la asignación de rutas:** Aunque los vehículos eléctricos tienen una autonomía superior, su capacidad de carga más pequeña los hace menos eficientes en rutas con alta demanda de productos. Es fundamental realizar un análisis más detallado de la carga total de cada vehículo y asignar los vehículos a las rutas en función de la cantidad de productos a transportar. Las rutas con una mayor carga total deberían asignarse preferentemente a los vehículos a gasolina, mientras que las rutas con menor carga o menos clientes pueden beneficiarse de los vehículos eléctricos.

- **Optimización de la asignación de vehículos para minimizar los costos de carga de productos:** El costo de carga de productos aumenta a medida que los vehículos tienen que hacer más paradas para cumplir con la demanda de los clientes, especialmente si tienen una capacidad de carga limitada. Para mejorar la eficiencia operativa, los vehículos eléctricos deberían asignarse a rutas donde la demanda de carga sea relativamente baja, mientras que los vehículos a gasolina deberían ser preferidos en rutas con alta demanda de carga debido a su capacidad para transportar más productos en cada viaje.

## 2. Escenario 2: Evaluación por Costo

ID-Vehículo	Tipo Vehículo	Distancia Recorrida	Duración Recorrida	Carga Total	Costo Distancia	Costo Duración	Costo Mantenimiento	Costo Carga	Costo Fuel	Costo Recarga	Costo Total
0	Gas Car	1.5054	3.776667	10.0	7527.0	1888.333333	30000.0	1000.0	2408.64	752.7	43576.673333
1	Gas Car	0.8948	2.598333	10.0	4474.0	1299.166667	30000.0	1000.0	1431.68	447.4	38652.246667
2	EV	44.9588	78.586667	87.0	179835.2	39293.333333	21000.0	8700.0	0.0	0.0	248828.533333
3	EV	45.9764	74.041667	72.0	183905.6	37028.833333	21000.0	7200.0	0.0	0.0	249126.433333
4	Gas Car	5.8702	11.446667	14.0	29351.0	5723.333333	30000.0	1400.0	9392.32	2935.1	78801.753333
5	EV	28.5699	45.150000	39.0	114279.6	22575.0	21000.0	3900.0	0.0	0.0	161754.6

Table 2: Resumen de costos para vehículos Gas Car y EV

### Identificación de patrones o tendencias observadas en las rutas optimizadas

Al observar los resultados y teniendo en cuenta las capacidades y rangos de cada tipo de vehículo, se identifican patrones claros en cuanto a los costos operativos de los vehículos eléctricos (EV) y los vehículos a gasolina (Gas Car), particularmente en función de las rutas seleccionadas y las demandas de carga.

Los vehículos eléctricos, aunque tienen una capacidad de carga más pequeña en comparación con los vehículos a gasolina, destacan por su gran autonomía, con un rango de entre 954.84 km y 1153.49 km en rutas largas. Los costos operativos más altos de los EV en este escenario se deben principalmente a su alta autonomía y la necesidad de cubrir distancias muy largas. Esto se traduce en costos de distancia y tiempo de recorrido más altos asociado con el tamaño de las rutas. Por ejemplo, los vehículos eléctricos del viajero 2 y el viajero 3, que cubren rutas más complejas, tienen un alto número de paradas y, como resultado, enfrentan mayores costos de distancia recorrida, tiempo de operación y carga de productos por la demanda de los clientes que visita, lo que al final se traduce en un aumento de los costos totales. De esta forma, a pesar de que los vehículos eléctricos no tienen costos de combustible, sus distancias y tiempos de operación prolongados y las demandas de carga cubiertas aumentan su costo total, especialmente cuando se relacionan con las paradas frecuentes.

Por otro lado, los vehículos a gasolina, aunque tienen un rango de autonomía más corto (entre 145.85 km y 195.69 km), tienen una mayor capacidad de carga (entre 131.92 kg y 135.54 kg). Esto les permite cubrir más demanda de carga en menos paradas, lo que genera costos operativos más bajos en rutas donde la demanda de carga es alta y las distancias recorridas no son excesivamente largas. En las rutas del viajero 0 y viajero 1, que cubren distancias moderadas y tienen menos paradas, los vehículos a gasolina se muestran como una opción más eficiente, ya que su capacidad de carga superior les permite reducir el número de viajes y, por lo tanto, los costos de carga y tiempo recorrido.

En general, los vehículos eléctricos se destacan en rutas largas donde su autonomía puede ser aprovechada, pero sus costos operativos se ven afectados por la alta demanda de carga y el número elevado de paradas. En contraste, los vehículos a gasolina son más eficientes en rutas no tan largas y/o con alta demanda de carga, ya que su mayor capacidad de carga les permite cubrir más demanda en menos paradas, que de cierta forma se puede atribuir a que tiene costos más altos por kilometro recorrido en comparación con los EV.

### Análisis de los problemas encontrados en el modelado

La asignación de vehículos a rutas con alta demanda de carga ha mostrado ser ineficiente en algunos casos. A pesar de que los vehículos eléctricos tienen una gran autonomía, su capacidad de carga limitada los hace menos eficientes en rutas con alta demanda de carga, como las cubiertas por el viajero 2 y el viajero 3. Aunque los vehículos eléctricos tienen un rango extenso de autonomía, el número de paradas frecuentes y las grandes demandas de carga aumentan considerablemente los costos operativos. En estas rutas, los vehículos eléctricos enfrentan altos costos tanto de tiempo y distancia recorrida como de carga de productos, lo que sugiere que la modelación actual no los está asignando de manera óptima a este tipo de rutas complejas.



Otro problema identificado en la modelación es que los costos de tiempo recorrido no se reflejan adecuadamente. Los vehículos eléctricos, a pesar de ser muy eficientes en rutas largas, operan durante más tiempo debido a su alta autonomía y la necesidad de cubrir mayores distancias. Cuando se combinan estas distancias con múltiples paradas, los costos de tiempo recorrido aumentan. Este aspecto no se está considerando de manera eficiente en la modelación actual, lo que da lugar a una asignación menos precisa de los vehículos a las rutas que realmente podrían beneficiarse de las capacidades específicas de cada tipo de vehículo. Para mejorar la precisión, el análisis de los tiempos de operación de los vehículos eléctricos debe ajustarse para reflejar mejor los costos asociados a rutas largas y múltiples paradas.

Por último, se observa que se están subestimando los costos de carga de productos para los vehículos eléctricos. Aunque estos vehículos no tienen costos de combustible, enfrentan altos costos de carga de productos debido a las rutas con alta demanda de carga que cubren. Su capacidad de carga limitada significa que necesitan realizar una alta carga de productos para cumplir con las demandas de los clientes que visitan, lo que inevitablemente aumenta los costos de carga. Este factor no está siendo suficientemente destacado en la modelación actual, lo que puede llevar a una asignación ineficaz de los vehículos eléctricos en rutas que requieren mayores demandas de carga, lo que impacta negativamente en la eficiencia del modelo.

#### **Mejoras potenciales para optimizar los resultados y sugerencias para ajustes futuros**

- **Reasignación de vehículos según la demanda de carga:** : Se debe ajustar la asignación de vehículos de acuerdo con la capacidad de carga y la demanda de los clientes. Las rutas con alta demanda de carga y no tan extensas deben asignarse preferentemente a los vehículos a gasolina, ya que pueden transportar más carga, pero tienen menos rango que los vehículos eléctricos y tienen un costo por kilómetro recorrido más alto. Por otro lado, las rutas con menor demanda de carga pueden beneficiarse de los vehículos eléctricos, que son más adecuados para rutas largas donde la autonomía es un factor clave. Este ajuste permitirá una mejor eficiencia operativa y reducirá los costos innecesarios, especialmente en rutas complejas.
- **Revisión del impacto de las paradas en los costos operativos:** : Es importante ajustar la modelación para tener en cuenta de manera más precisa el impacto de las paradas frecuentes en los costos de tiempo recorrido. Las paradas múltiples en rutas complejas generan un incremento en los costos operativos de los vehículos eléctricos, lo que puede hacer que el modelo favorezca erróneamente a los EV en rutas con altas demandas de carga. Este ajuste permitirá reflejar con mayor precisión los costos reales de tiempo y carga, asegurando que los vehículos más adecuados sean asignados a las rutas correctas.
- **Análisis más detallado de los costos de carga de productos para los vehículos eléctricos:** Los costos de carga de productos deben considerarse con más detalle, especialmente para los vehículos eléctricos, que tienen una capacidad de carga limitada y cubren muchas más demandas de clientes. Al evaluar las rutas con mayor demanda de carga, se debe ajustar el modelo para reflejar que los vehículos eléctricos, aunque son eficientes en términos de combustible, enfrentan altos costos operativos debido a su menor capacidad de carga y alta demanda cubierta. Asegurarse de que estos costos se incluyan correctamente permitirá tomar decisiones más informadas sobre la asignación de vehículos a las rutas.