

Proyecto Seneca-Libre: Etapa 2

Grupo 7

Implementación del Modelo

Durante la implementación del modelo, se identificaron algunos errores que limitaban considerablemente la capacidad de la solución para abordar el problema de manera eficiente.

Variable de decisión

La variable de decisión estaba restringida de forma demasiado rígida, ya que solo permitía considerar trayectos desde el depósito hacia un cliente, lo cual impedía la posibilidad de realizar viajes entre nodos, como entre clientes o entre depósitos. Este error era fundamental, ya que, en la práctica, los vehículos deben tener la capacidad de moverse entre diferentes puntos (clientes y depósitos) para optimizar el ruteo y garantizar una distribución eficiente.

La variable de decisión original era:

$$X_{irjk}$$

Variable binaria que indica si se asigna la entrega desde el nodo i al nodo j con el vehículo K .

Esta variable solo consideraba un trayecto específico entre un nodo (depósito) y un cliente, lo que limitaba el alcance del modelo. Para corregir esta limitación, se ajustaron tanto los índices como la variable de decisión para reflejar de manera más flexible las rutas posibles entre cualquier par de nodos, ya sean clientes o depósitos.

Índices ajustados

- i : Representa un nodo, ya sea cliente o depósito, en un conjunto N .
- j : Representa un nodo, ya sea cliente o depósito, en el conjunto N .
- k : Representa a un vehículo en el conjunto K .

Nueva variable de decisión

$$X_{ijk}$$

Variable binaria que indica si se asigna la entrega desde el nodo i al nodo j con el vehículo K .

Este ajuste en la definición de la variable de decisión permite ahora considerar trayectos entre cualquier par de nodos dentro del modelo, lo que abre la posibilidad de optimizar el ruteo entre depósitos y clientes, sin restricciones previas que limitaban el movimiento de los vehículos solo a salidas directas desde el depósito. Con este cambio, el modelo ahora tiene la flexibilidad necesaria para calcular las rutas más eficientes en función de la ubicación de los nodos y los vehículos disponibles.

Restricciones

También se observó que hacían falta restricciones importantes dentro del modelo, ya que sin ellas la solución sería insuficiente.

Restricción 1: No se puede ir de un nodo a sí mismo

Expresión matemática:

$$x_{i,i,k} = 0 \quad \forall i \in N, \forall k \in K$$

Esta restricción asegura que un vehículo no se mueva de un nodo a sí mismo. Es decir, no puede haber un recorrido donde el vehículo regrese inmediatamente al mismo nodo sin visitar otro. Sin esta restricción, tendríamos rutas en las que un vehículo se quedaría en el mismo nodo todo el tiempo.

Restricción 2: Cada nodo debe ser visitado exactamente una vez

Expresión matemática:

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{i,j,k} = 1 \quad \forall i \in C$$

Esta restricción asegura que cada nodo cliente debe ser visitado exactamente una vez, sin repeticiones ni omisiones. Es fundamental para garantizar que el modelo de ruteo cubra todos los clientes, sin que alguno quede sin visitar. Además, asegura que el vehículo pasa por cada cliente una sola vez.

Restricción 3: Restricción de flujo

Expresión matemática:

$$\sum_{j \in N} x_{i,j,k} = \sum_{j \in N} x_{j,i,k} \quad \forall i \in C, k \in K$$

Esta restricción asegura que, para cada vehículo, el flujo de salidas de un nodo debe igualar el flujo de entradas. Es decir, si un vehículo sale de un nodo hacia otro, debe regresar al nodo de origen al final del recorrido. Esto es importante para mantener la consistencia en la ruta, evitando que los vehículos se “pierdan” o que las rutas no sean completas (es decir, vehículos que no regresan).

Restricción 4: Eliminación de subtours

Expresión matemática:

$$u_i - u_j + |N| \cdot x_{i,j,k} \leq |N| - 1 \quad \forall i, j \in C, i \neq j, k \in K$$

La restricción de eliminación de subtours previene que se generen subtours (rutas cerradas dentro de la ruta general). Es decir, evita que un vehículo forme un ciclo dentro de un conjunto de nodos sin recorrer todos los nodos. Este tipo de subciclos invalidaría la solución, ya que no cubriría todos los clientes ni regresaría a los depósitos correctamente.

Restricción 5: Los vehículos solo pueden llevar una carga si esta está dentro de su capacidad máxima

Expresión matemática:

$$\sum_{i \in N} \left(\sum_{j \in N} x_{i,j,k} \right) \cdot p_j \leq C_k \quad \forall k \in K$$

Esta restricción limita la carga total que un vehículo puede transportar a su capacidad máxima. La suma de las cargas de todos los nodos que un vehículo visita (calculada por p_j para cada cliente j) no debe exceder la capacidad C_k del vehículo. Es esencial para asegurar que los vehículos no sean sobrecargados y operen dentro de sus capacidades técnicas.

Restricción 6: Todos los vehículos deben regresar a un depósito

Expresión matemática:

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in D} x_{i,j,k} = 1 \quad \forall k \in K$$

Esta restricción implica que cada vehículo debe regresar a su depósito de origen después de completar su recorrido. Lo cual es importante para evitar que los vehículos queden fuera de su recorrido o se “pierdan”, garantizando que todos los vehículos regresen a su punto de inicio para ser reasignados o preparados para otro viaje.

Restricción 7: Los vehículos no pueden viajar de un depósito a otro

Expresión matemática:

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in D} x_{i,j,k} = 0 \quad \forall k \in K$$

Esta restricción asegura que un vehículo no puede viajar de un depósito a otro. Debido a que los depósitos están destinados a ser el punto de salida o entrada para los vehículos y no deben ser utilizados como puntos de tránsito entre ellos. Esto debido a evitar que los vehículos hagan recorridos innecesarios entre depósitos, optimizando las rutas y evitando pérdidas de tiempo y costos adicionales.

De esta manera, se puede construir un modelo coherente y viable para las rutas establecidas, evitando la formación de subtours, ciclos innecesarios y garantizando una representación completa del modelo.

1 Escenario 2: Evaluación por Costos

A continuación se presenta la función objetivo resultante del análisis de costos realizado durante el segundo escenario:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \text{nodos_range}} \sum_{j \in \text{nodos_range}} \sum_{k \in \text{vehiculos_range}} (x_{i,j,k} * \\ & (\text{costo_combustible}(k, \text{distancia}(\text{tipo_vehiculo}(k), i - 1, j - 1)) + \\ & \text{costo_operativo}(\text{tipo_vehiculo}(k), i - 1, j - 1) + \text{costo_carga}(j)) \\ & + \sum_{k \in \text{vehiculos_range}} \text{mantenimiento_diario}(\text{tipo_vehiculo}(k)) \end{aligned}$$

Costo Combustible

El costo de combustible se calcula en función de las rutas que recorre el vehículo. Es decir, se determina la cantidad de combustible necesario y el tiempo requerido para recargarlo cada vez que el vehículo se desplaza de un nodo i a un nodo j . Este cálculo considera tanto la distancia entre los nodos como los aspectos logísticos asociados a la recarga de combustible durante las movilizaciones.

$$\text{CostoTotal} = \left(\frac{d}{\eta} \cdot C_f \right) + \left(\frac{d}{\eta} \cdot 0.1 \cdot \frac{1}{T_r} \cdot R_t \right)$$

Donde:

- d es la distancia recorrida.
- η es la eficiencia del vehículo (dependiendo del tipo del vehículo).
- C_f es el costo de recarga o combustible por unidad de energía.
- T_r es el tiempo necesario para recargar el 10- R_t es la tarifa por unidad de tiempo de carga.

Esta fórmula se presenta de esta manera porque es más preciso mostrar al cliente el costo asociado a cada ruta, en lugar de proporcionar el costo basado en la capacidad máxima de combustible que un vehículo puede almacenar. Es decir, no le presentamos al cliente el costo de llenar el tanque del vehículo hasta su capacidad total, sino el costo real que se incurre durante la ejecución de la ruta, basado en el consumo de combustible o energía y el tiempo de recarga asociado a esa movilización específica.

Costo operativo

El costo operativo representa el gasto asociado a cada ruta (el trayecto que el vehículo recorre de un nodo a otro) por es mismo no se calcula aparte si no con los datos de las rutas seleccionadas, y se desglosa en dos componentes principales:

1. Costo total por distancia recorrida:

$$C_{total} = c_{km} \times d$$

Esta fórmula calcula el costo total de operación de un vehículo en función de la distancia recorrida. Aquí, c_{km} es el costo por kilómetro para el tipo específico de vehículo utilizado, y d es la distancia total recorrida en kilómetros.

2. Costo total por tiempo de operación:

$$C_{tiempo} = c_{min} \times t$$

Esta fórmula calcula el costo total asociado al tiempo de operación de un vehículo. c_{min} es el costo por minuto del vehículo, y t es el tiempo total de la ruta en minutos.

3. Costo total de operación:

$$C_{operativo} = C_{total} + C_{tiempo}$$

El costo total de operación para una ruta se obtiene sumando los costos asociados a la distancia recorrida y al tiempo de operación. Esta fórmula toma en cuenta ambos factores para calcular el costo total que implica el uso del vehículo en esa ruta específica.

Costo de carga

El costo de carga está directamente relacionado con el gasto generado en cada ruta, es decir, el trayecto que el vehículo recorre de un nodo a otro. Por esta razón, el costo de carga no se calcula de manera independiente, sino que se determina en función de los datos de las rutas seleccionadas, considerando el peso cargado en el vehículo durante cada recorrido.

El proceso de carga de cada vehículo implica un costo asociado. Cada minuto de carga genera un costo de x COP (en este caso, 500 COP, aunque se omite este valor para permitir una mayor flexibilidad en la solución). Además, se estima que, en promedio, se puede cargar 5 kg por minuto.

El costo total de carga (C_{carga}) para un vehículo se define de la siguiente manera:

$$C_{carga} = (Carga) \times (Costo)$$

Donde:

$$Carga : \frac{Peso en kg}{5}$$

Se expresa de esta forma debido a que en promedio 5 kg es la cantidad cargada por minuto

$$Costo$$

Es el costo por minuto asociado con el proceso de carga.

Mantenimiento diario

$$\sum_{k \in vehiculos_range} mantenimiento_diario(tipo_vehiculo(k))$$

El mantenimiento diario se incluye en esta expresión debido a que es un costo fijo diario, no depende de los datos de las rutas, sino que se calcula de manera separada. De esta forma, se puede visualizar de manera más clara el gasto asociado al mantenimiento de los vehículos.

Reporte de Costos Operacionales

A continuación, se presenta un análisis específico de cada tipo de costo y los patrones observados.

Análisis de Costos

Costos de Combustible: El costo de combustible muestra una variabilidad entre los vehículos. Los vehículos con valores más altos en combustible (como el vehículo 2 o 9) reflejan un mayor consumo, lo que podría indicar que estos vehículos recorren distancias más largas o tienen un consumo mayor por su capacidad de carga o tipo de operación.

Costos Operativos: Los costos operativos son los más altos en todos los vehículos, lo que es consistente con la naturaleza de las operaciones logísticas. Sin embargo, se observa una variabilidad notable: vehículos como el 6 y 4 presentan costos operativos muy altos, mientras que vehículos como el 0 y el 3 tienen costos operativos más bajos. Esta diferencia se debe a las rutas que estos vehículos recorren, las cuales podrían ser más largas o más complejas en el caso de los vehículos con mayores costos operativos, requiriendo más tiempo de operación y recursos logísticos. Además, algunos vehículos con costos operativos bajos podrían estar realizando rutas más cortas o con menores requisitos operacionales, lo que podría ser una oportunidad para equilibrar la carga de trabajo entre los vehículos.

Costos de Carga: Los costos de carga son mayores en los vehículos que transportan más carga, como el vehículo 6 (con un costo alto en carga), lo que refleja una correlación directa entre la cantidad de carga transportada y los costos asociados.

2 Análisis de resultados

Para nuestro análisis, nos centraremos en el escenario base, donde verificaremos el cumplimiento de las restricciones establecidas y, finalmente, evaluaremos el valor de la función objetivo.

En las rutas generadas por el modelo, podemos confirmar que todos los nodos correspondientes a los clientes (13,36) son suministrados y abastecidos de manera exclusiva por un vehículo determinado. Además, se ha comprobado que las rutas no presentan ningún tipo de subtour, lo que garantiza que cada vehículo sigue un recorrido óptimo y sin ciclos no deseados. Esto asegura la eficiencia y viabilidad del modelo propuesto en términos de planificación y logística de distribución.

A continuación, se presentará un análisis más detallado del modelo, incluyendo los datos relativos a las cargas de cada vehículo para las rutas.

Podemos observar que ninguno de los vehículos supera su capacidad máxima, lo cual es un indicativo de que el sistema de distribución está funcionando dentro de los límites establecidos, garantizando que cada vehículo opere de manera segura y eficiente. Esto refleja una correcta gestión de las capacidades de la flota, evitando que los vehículos sean sobrecargados y, por ende, potencialmente expuestos a fallos o ineficiencias.

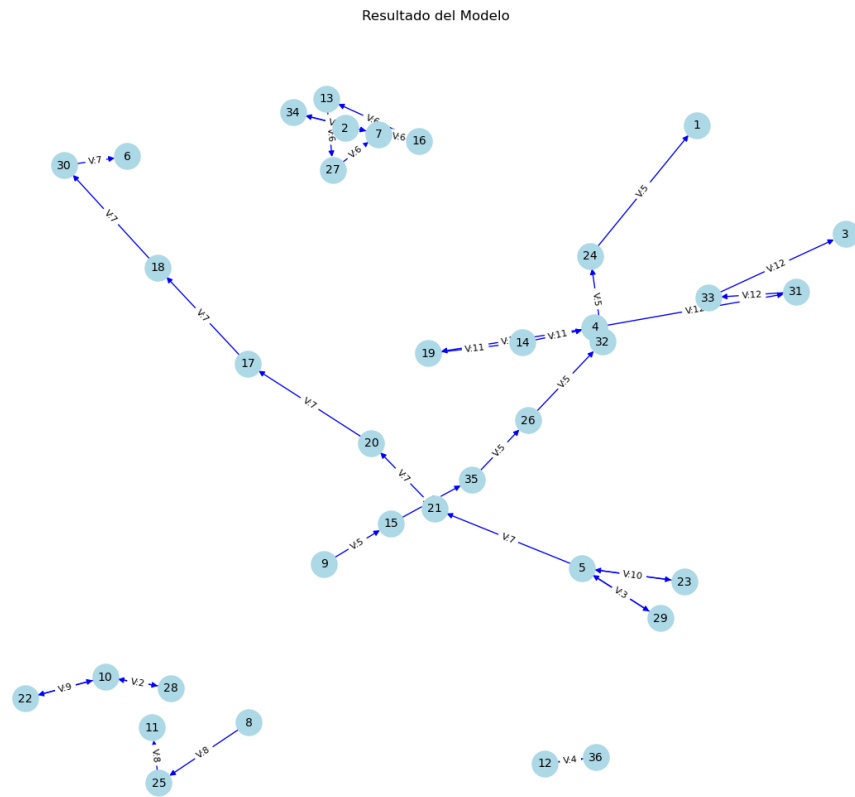


Figure 1: Rutas generadas por el modelo

Key	Lower	Body	Upper
1	None	18.0	131.9211396722696
2	None	10.0	135.54452491441663
3	None	25.0	114.38031900663994
4	None	11.0	157.9011075721774
5	None	69.0	86.98609179004892
6	None	45.0	87.10238029800072
7	None	89.0	100.64567561406786
8	None	21.0	62.88157761574977
9	None	15.0	76.55364248957906
10	None	17.0	20.459879622393945
11	None	32.0	32.32824384460777
12	None	25.0	25.33764102343962

Table 1: Tabla de capacidades máximas por vehiculos

Además, las cargas están bien distribuidas entre los vehículos en función de su capacidad máxima. Aunque las cargas varían, no se observa un desequilibrio significativo. Por ejemplo, el vehículo 6 tiene una carga cercana a su capacidad máxima (89 unidades de 100.65), mientras que el vehículo 9 tiene una carga más baja (17 unidades de 20.46). Esta distribución sugiere que las restricciones adicionales, como la distancia y otros parámetros operativos, limitan el uso de vehículos con mayor capacidad, favoreciendo una asignación más eficiente de los recursos en función de la optimización general del sistema.

En términos generales, la asignación de cargas a los vehículos refleja un equilibrio adecuado, lo que implica que los recursos disponibles se están utilizando de manera eficiente.

Por ultimo, el valor de la función objetivo obtenido para este modelo es de 844,939.55, lo que representa el costo total de operación bajo las restricciones y parámetros establecidos. Este valor refleja la suma de los costos asociados con el transporte, incluyendo costos operativos, de carga y de combustible, así como los costos de mantenimiento diario de los vehículos.

El valor obtenido de la función objetivo refleja un modelo que ha logrado equilibrar los costos operativos y logísticos con las restricciones impuestas, garantizando un sistema eficiente y optimizado dentro de los límites definidos. Este resultado puede servir como base para realizar ajustes o comparaciones con otros escenarios para seguir refinando el modelo y mejorar aún más los costos operativos.