

# Sistema web de distribución de productos perecederos con modulo de optimización de rutas de entrega, transporte y simulación numérica

Msc. Víctor Rodríguez Estévez

3 de Novembre 2024

## Resumen

*Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema web innovador diseñado para optimizar las rutas de entrega de productos perecederos. El sistema incorpora un módulo de optimización que emplea una combinación de algoritmos avanzados, incluyendo el algoritmo del cartero chino, programación lineal y el método de Runge-Kutta de cuarto orden. A través de la simulación numérica, se evalúa el desempeño de las rutas optimizadas, garantizando la entrega eficiente y oportuna de los productos.*

## 1. El problema

La empresa XXXX desea optimizar las rutas de sus vehículos para entregar paquetes a múltiples clientes en una ciudad. Cada cliente tiene una ubicación específica, y el objetivo es encontrar la ruta más corta o eficiente (en términos de distancia, tiempo o costo) que permita entregar todos los paquetes.

La empresa cuenta con una flota de vehículos de diferentes capacidades y costos operativos, y debe asignar un conjunto de pedidos a cada vehículo de manera que se minimicen los costos totales de transporte, cumpliendo con las restricciones de capacidad de los vehículos y las ventanas de tiempo de entrega.

La empresa maneja productos perecederos enfrenta el desafío de predecir con precisión la demanda de sus productos para evitar pérdidas por deterioro y garantizar la disponibilidad de productos frescos. La demanda de productos perecederos puede variar significativamente debido a factores como la estacionalidad, eventos especiales (fiestas, promociones), tendencias de consumo y condiciones climáticas.

## 2. Programación Avanzada

### 2.1. Definición

- **Estructura de datos:** Grafo, los nodos son las intersecciones de las calles, los arcos las calles.

### ■ Datos de entrada:

- Ubicaciones de clientes: Una lista de coordenadas que representan la posición de cada cliente en la ciudad.
- Centro de distribución: Punto de inicio y fin de cada ruta.
- Restricciones: Puede incluir ventanas de tiempo en las que debe entregarse cada paquete, capacidad máxima de los vehículos y limitaciones en la distancia o tiempo.

- **Objetivo:** Minimizar la distancia, el tiempo total de viaje, o el costo asociado a las rutas de entrega, asegurando que todos los clientes sean atendidos en una sola ruta (si es un solo vehículo) o en múltiples rutas (si hay varios vehículos).

## 2.2. Algoritmos

Algoritmos recomendados para la optimización

- Algoritmos Heurísticas

## 2.3. Requerimientos

### 2.3.1. Historia de Usuario 1

- **Como** coordinador de logística,
- **quiero** ingresar las ubicaciones de los clientes y puntos de partida en el mapa de Cochabamba,
- **para** optimizar la ruta de los vehículos y minimizar el tiempo de entrega.
- **Criterios de Aceptación**
  - *Escenario:* Ingresar ubicaciones de clientes y punto de partida
  - *Dado que estoy* en la página de Registro de ubicaciones".
  - **Cuando** ingreso las coordenadas de cada cliente y del punto de partida y hago clic en "Guardar"
  - **Entonces** las ubicaciones deben guardarse correctamente en la base de datos y debo ver un mensaje de confirmación "Ubicaciones registradas con éxito".

### 2.3.2. Historia de Usuario 2

- **Como** coordinador de logística,
- **quiero** ver la ruta óptima para las entregas en un mapa,
- **para** que los conductores sigan la mejor ruta disponible.
- **Criterios de Aceptación**
  - *Escenario:* Visualizar ruta óptima en el mapa

- **Dado** que las ubicaciones de los clientes han sido ingresadas y guardadas
- **Cuando** selecciono la opción Calcular ruta óptima"
- **Entonces** el sistema debe mostrar la ruta optimizada en un mapa y la ruta debe incluir puntos de parada para cada cliente

### 2.3.3. Historia de Usuario 3

- **Como** coordinador de logística,
- **quiero** establecer la capacidad de cada vehículo,
- **para** asegurar que el sistema respete las limitaciones de carga al planificar las rutas.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Establecer capacidad máxima de vehículos
  - **Dado** que estoy en la página de Configuración de vehículos"
  - **Cuando** ingreso la capacidad de cada vehículo en kilogramos hago clic en "Guardar"
  - **Entonces** la capacidad de cada vehículo debe registrarse en el sistema y debe usarse para calcular rutas que respeten los límites de carga

### 2.3.4. Historia de Usuario 4

- **Como** conductor de la empresa,
- **quiero** recibir un itinerario de entregas en mi dispositivo móvil,
- **para** seguir la ruta más eficiente asignada por el sistema.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Enviar itinerario de ruta al dispositivo móvil
  - **Dado** que la ruta óptima ha sido calculada **Cuando:** selecciono la opción "Enviar itinerario a conductor"selecciono el conductor **Entonces** el sistema debe enviar el itinerario detallado al conductor y este debe recibir una notificación con los detalles de la ruta.

### 2.3.5. Historia de Usuario 5

- **Como** coordinador de logística,
- **quiero** revisar el estado de cada entrega en tiempo real,
- **para** monitorear el progreso de cada vehículo y prever posibles retrasos.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Monitorear estado de entregas en tiempo real
  - **Dado** que los vehículos están en ruta de entrega
  - **Cuando** accedo al tablero de seguimiento

- 
- **Entonces** debo poder ver el estado de cada entrega en tiempo real y cada punto debe actualizarse al recibir nueva información de ubicación.

### 3. Investigación Operativa

#### 3.1. Definición

- Ofertas: Cada pedido es una oferta, con un origen, un destino, una cantidad a transportar y una ventana de tiempo de entrega.
- Destinos: Cada vehículo es un destino, con una capacidad máxima de carga y un costo por unidad de distancia recorrida.
- Matriz de costos: Una matriz que indica el costo de transportar una unidad de carga desde el origen de cada pedido hasta el destino de cada vehículo.
- Restricciones:
  - Capacidad: La cantidad total de carga asignada a cada vehículo no puede exceder su capacidad.
  - Ventanas de tiempo: La entrega de cada pedido debe realizarse dentro de su ventana de tiempo asignada.
  - Demanda: Todos los pedidos deben ser asignados a un vehículo.
- **Objetivo:** Minimizar el costo total de transporte, considerando los costos de asignación de pedidos a vehículos y los costos de recorrido.

#### 3.2. Algoritmos

Algoritmos recomendados para la optimización

- Programación Lineal.

#### 3.3. Requerimientos

##### 3.3.1. Historia de Usuario 1

- **Como** administrador de transporte,
- **quiero** asignar vehículos a rutas según su capacidad y disponibilidad,
- **para** asegurar el uso eficiente de la flota y evitar sobrecargas.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Asignación de vehículos basada en capacidad y disponibilidad
  - **Dado** que tengo una lista de vehículos con sus capacidades y estados
  - **Cuando** selecciono la opción "Asignar vehículos a rutas"
  - **Entonces** el sistema debe sugerir vehículos disponibles y adecuados según el peso de la carga y la distancia de la ruta y los vehículos seleccionados no deben estar asignados a otra ruta.

#### 3.3.2. Historia de Usuario 2

- **Como** administrador de transporte,
- **quiero** optimizar el tiempo de viaje considerando las ventanas de tiempo de los clientes,
- **para** asegurar que las entregas se realicen dentro del horario acordado.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Optimización de tiempo de viaje con ventanas de entrega
  - **Dado** que las ubicaciones de los clientes tienen ventanas de entrega asignadas
  - **Cuando** selecciono la opción "Optimizar rutas con ventanas de tiempo"
  - **Entonces** el sistema debe calcular rutas que permitan entregar dentro de cada ventana horaria y debe notificar si alguna ventana de tiempo no puede cumplirse con la configuración actual

#### 3.3.3. Historia de Usuario 3

- **Como** administrador de transporte,
- **quiero** definir rutas alternativas en caso de bloqueos o tráfico elevado,
- **para** reducir tiempos de espera y optimizar el flujo de entregas.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Definir rutas alternativas en caso de tráfico elevado
  - **Dado** que la ruta principal incluye un área con alto tráfico
  - **Cuando** selecciono la opción "Recalcular ruta alternativa"
  - **Entonces** el sistema debe sugerir una ruta alternativa que evite el área con alto tráfico y debe mostrar el tiempo estimado de viaje con la nueva ruta

#### 3.3.4. Historia de Usuario 4

- **Como** conductor,
- **quiero** recibir una notificación de actualización de ruta en caso de cambios,
- **para** ajustar mi viaje y seguir la ruta optimizada en tiempo real.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Notificación de actualización de ruta al conductor
  - **Dado** que la ruta asignada al conductor ha cambiado
  - **Cuando** el administrador confirma la actualización de la ruta
  - **Entonces** el sistema debe enviar una notificación al dispositivo del conductor y el conductor debe ver la nueva ruta optimizada en su pantalla

---

### 3.3.5. Historia de Usuario 5

- **Como** administrador de transporte,
- **quiero** visualizar un reporte semanal de las rutas optimizadas y el tiempo de entrega,
- **para** analizar la eficiencia del transporte y mejorar la planificación.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Generar reporte semanal de rutas y tiempos de entrega
  - **Dado** que tengo datos de rutas y tiempos de entrega de la última semana
  - **Cuando** selecciono la opción "Generar reporte semanal"
  - **Entonces**, el sistema debe mostrar un reporte que incluya las rutas optimizadas y el tiempo de entrega d debe destacar las entregas fuera del tiempo estimado

## 4. Métodos Numéricos

### 4.1. Definición

Sea  $D(t)$  la demanda del producto en función del tiempo  $t$ . Un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales para la demanda podría incluir:

- Demanda en función del tiempo y precio: La demanda suele disminuir cuando el precio  $P(t)$  aumenta, y puede depender de la elasticidad de precio.
- Estacionalidad y factores externos: La demanda de productos perecederos puede aumentar o disminuir debido a factores estacionales, como la época del año.
- Competencia: Representada por un término que disminuye la demanda en función de la cantidad de competidores  $C(t)$ .

El sistema de ecuaciones propuesto sería:

$$\frac{dD}{dt} = \alpha D(t) \left(1 - \frac{D(t)}{K}\right) - \beta D(t)P(t) + \gamma S(t) - \gamma D(t)C(t)$$

Donde :

- $D(t)$ : Demanda del producto en el tiempo  $t$
- $\alpha$ : Tasa de crecimiento de la demanda en ausencia de restricciones.
- $K$ : Capacidad máxima de la demanda (limitada por el mercado).
- $\beta$ : Coeficiente de sensibilidad al precio.
- $P(t)$ : Precio del producto en el tiempo
- $\gamma$ : Coeficiente de sensibilidad a la estacionalidad.

- $S(t)$ : Factor estacional que varía con el tiempo (p. ej., puede ser una función sinusoidal).
- $\delta$ : Coeficiente de impacto de la competencia.
- $C(t)$ : Competencia en el mercado (por ejemplo, número de competidores o nivel de competencia).

Este modelo captura varias dinámicas clave:

- Logística de la demanda  $\alpha D(t)(1 - \frac{D(t)}{K})$ : Controla el crecimiento de la demanda, similar a una curva logística limitada por  $K$ , que representa la capacidad del mercado.
- Efecto del precio  $\beta D(t)P(t)$ : A medida que el precio aumenta, el término reduce la demanda, lo que representa la sensibilidad al precio.
- Estacionalidad:  $\gamma S(t)$ : Modela variaciones periódicas o estacionales, lo que podría ajustarse con una función sinusoidal, como  $S(t) \sin(\omega t)$
- Competencia  $\gamma D(t)C(t)$ : Refleja el efecto negativo de la competencia en la demanda.

## 4.2. Algoritmos

Algoritmos recomendados para la resolución

- Runge-Kutta 4

## 4.3. Requerimientos

### 4.3.1. Historia de Usuario 1

- **Como** analista de la cadena de suministro,
- **quiero** predecir la demanda de productos en los próximos meses,
- **para** planificar los recursos de transporte y almacenamiento adecuadamente.
- **Criterios de Aceptación**
  - **Escenario:** Predecir la demanda de productos usando Runge-Kutta de cuarto orden
  - **Dado** que he cargado los datos históricos de ventas en el sistema
  - **Cuando** selecciono la opción "Predecir demandaz elijo un rango de tiempo para la predicción
  - **Entonces** el sistema debe realizar el cálculo de predicción utilizando el método de Runge-Kutta de cuarto orden y debe mostrar la demanda proyectada para cada producto en el horizonte de tiempo seleccionado.

### 4.3.2. Historia de Usuario 2

- **Como** administrador de la cadena de suministro,
- **quiero** simular escenarios de transporte basados en la demanda futura,

- **para** anticipar necesidades de flota y ajustar la logística de transporte.
- Criterios de Aceptación
  - Escenario: Simular escenarios de transporte basado en predicción de demanda
  - **Dado** que el sistema ha realizado una predicción de demanda de productos
  - **Cuando** selecciono la opción "Simular escenarios de transporte específico las capacidades de los camiones y tiempos de tránsito
  - **Entonces** el sistema debe generar un escenario de transporte óptimo y debe mostrar el número de vehículos necesarios y las rutas para cumplir con la demanda proyectada

#### 4.3.3. Historia de Usuario 3

- Como analista de operaciones,
- quiero evaluar distintos escenarios de demanda y su impacto en el transporte,
- para tomar decisiones sobre la cantidad de vehículos o rutas a asignar en cada situación.
- Criterios de Aceptación
  - **Escenario:** Evaluación de múltiples escenarios de demanda y su impacto en transporte
  - **Dado** que he configurado varios escenarios de demanda en el sistema
  - **Cuando** selecciono la opción ".Evaluar escenarios de demanda"
  - **Entonces** el sistema debe calcular la necesidad de transporte en cada escenario usando el método Runge-Kutta, y mostrar la capacidad requerida de vehículos y rutas para cada caso destacando los escenarios donde la capacidad de transporte sería insuficiente

#### 4.3.4. Historia de Usuario 4

- Como gerente de la cadena de suministro,
- quiero obtener un reporte de simulación para los próximos 6 meses,
- para analizar la eficiencia y prever problemas en la logística de transporte.
- Criterios de Aceptación
  - **Escenario:** Generar reporte de simulación de demanda y transporte
  - **Dado** que he realizado simulaciones de escenarios de demanda y transporte para los próximos 6 meses
  - **Cuando** selecciono la opción "Generar reporte de simulación"
  - **Entonces** el sistema debe generar un informe que resuma la demanda proyectada y la capacidad de transporte requerida



#### 4.3.5. Historia de Usuario 5

- **Como** analista de cadena de suministro,
- **quiero** ajustar los parámetros de la predicción, como tasas de crecimiento o patrones estacionales,
- **para** mejorar la precisión de la simulación de demanda.
- **Criterios de Aceptación**
  - Escenario: Ajuste de parámetros en predicción de demanda
  - **Dado** que he accedido a la configuración de predicción de demanda
  - **Cuando** ajusto los parámetros de tasas de crecimiento y estacionalidad
  - **Entonces** el sistema debe recalcular la predicción usando el método Runge-Kutta con los parámetros ajustados y la nueva proyección debe reflejar los cambios realizados en los parámetros