

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERRE

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

“Evidencia 1: Actividad Integradora”

MATERIA

Modelación de Sistemas Multiagentes con Gráficas
Computacionales

ESTUDIANTE

Alyson Melissa Sánchez Serratos – A01771843

PROFESOR

Marcial Roberto Leyva Fernández

FECHA DE ENTREGA

18/11/2024

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 3 |
| 1.1. Contexto del Proyecto | 3 |
| 1.2. Objetivo del Proyecto..... | 3 |
| 1.3. Descripción del Problema | 3 |
| 1.4. Metodología y Alcance | 4 |
| 2. Modelo de Simulación..... | 4 |
| 2.1 Descripción del Modelo | 4 |
| 2.2 Movimiento de los Montacargas | 5 |
| 2.3 Generación de Rutas con el Algoritmo de Dijkstra | 5 |
| 2.3.1 Matriz de Adyacencia | 5 |
| 2.4. Interacciones y Distancia Mínima entre Montacargas | 6 |
| 2.5 Manejo Automático del Número de Montacargas..... | 7 |
| 2.6 Descripción del Archivo CSV de Resultados | 8 |
| 3. Diseño de la Experimentación y Simulaciones..... | 9 |
| 3.1 Objetivo de la Experimentación | 9 |
| 3.1.1 Evaluación del Número Óptimo de Montacargas | 9 |
| 3.1.2 Evaluación de la Distancia Mínima Óptima entre Montacargas | 10 |
| 3.1.3 Evaluación de la Distancia Óptima entre la Zona de Descarga y Carga | 11 |
| 4. Resultados..... | 12 |
| 4.1 Resultados de la Evaluación del Número Óptimo de Montacargas | 12 |
| 4.1.1 Análisis Numérico de Resultados | 12 |
| 4.1.1 Análisis Práctico de Resultados | 14 |
| 4.1.2 Observaciones y Hallazgos | 15 |
| 4.1.3 Cálculos del 25% de Reducción | 15 |
| 4.1.4 Anotación Importante..... | 17 |
| 4.1.5 Conclusión | 18 |
| 4.2 Resultados de la Evaluación de la Distancia Mínima Óptima entre Montacargas | 18 |
| 4.3 Resultados de la Evaluación de la Distancia Óptima entre la Zona de Descarga y Carga | 20 |
| 4.3.1 Conclusión | 22 |
| 5. Conclusiones Generales..... | 22 |

1. Introducción

1.1. Contexto del Proyecto

En el ámbito de la logística y la gestión de almacenes, las operaciones de carga y descarga de mercancías juegan un papel crucial en la eficiencia general de los procesos. La capacidad de un sistema para manejar la descarga de un tráiler de manera óptima, utilizando montacargas, puede impactar significativamente en los tiempos de operación, lo cual es clave para mejorar la productividad y reducir costos.

Este proyecto se enfoca en la simulación de un sistema multiagente en el que se modela la descarga de un tráiler mediante la participación de varios montacargas. Cada montacargas tiene que transportar una caja a la vez desde el tráiler hasta una zona de descarga, y la tarea consiste en encontrar el número adecuado de montacargas que maximice la eficiencia del proceso de descarga, respetando ciertas restricciones de espacio y tiempo.

1.2. Objetivo del Proyecto

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una simulación para determinar el número óptimo de montacargas necesarios para descargar un tráiler de manera eficiente. Este número óptimo se define como aquel en el que añadir más montacargas ya no reduce significativamente el tiempo de descarga en más de un 25%, o incluso cuando la adición de más montacargas comienza a entorpecer el proceso, provocando congestión o interacción innecesaria entre los montacargas.

La eficiencia del proceso se medirá en función del tiempo total de descarga, por lo que el reto principal será identificar el punto en el que, a pesar de añadir más montacargas, el beneficio en la reducción del tiempo de descarga disminuye considerablemente o se anula debido a los efectos negativos de la sobrecarga del sistema. Es decir, es necesario encontrar un equilibrio donde la cantidad de montacargas maximice la eficiencia sin crear problemas adicionales.

Además de optimizar el número de montacargas, también se analizará cómo la distancia entre la zona de carga y descarga influye en la eficiencia del proceso. Es posible que una mayor distancia entre estas dos zonas incremente el tiempo de descarga, y por lo tanto, se buscará determinar un valor óptimo de distancia que minimice dicho tiempo sin generar un desajuste con la cantidad de montacargas disponible.

1.3. Descripción del Problema

En el escenario simulado, un tráiler tiene que ser descargado por un número variable de montacargas. Los parámetros del sistema son los siguientes:

- Número de cajas dentro del tráiler a descargar.

- Número de montacargas disponibles para realizar la descarga.
- Velocidad de los montacargas y la distancia mínima entre ellos.
- Número de nodos que representan la ubicación del tráiler (zona de carga) y la zona de descarga dentro del plano de simulación.

Existen restricciones clave en el modelo:

1. Solo un montacargas puede descargar una caja a la vez.
2. Los montacargas deben mantener una distancia mínima entre ellos para evitar colisiones.

La tarea es encontrar el número ideal de montacargas que permita completar la descarga de manera eficiente, sin que agregar más montacargas resulte contraproducente.

1.4. Metodología y Alcance

Para resolver este problema, se utilizará un modelo de simulación basado en un sistema multiagente, donde cada montacargas se representará como un agente que interactúa con los demás en un entorno de simulación. El modelo se implementará en Python, utilizando diversas librerías especializadas para facilitar tanto el cálculo como la visualización. OpenGL y Pygame se emplearán para crear la visualización gráfica del entorno, permitiendo representar el plano de simulación donde los montacargas se moverán y realizarán las tareas de carga y descarga. Por otro lado, NumPy se utilizará para realizar los cálculos numéricos necesarios, como las distancias, las velocidades y los tiempos de movimiento de los montacargas, asegurando un rendimiento eficiente y preciso en la simulación.

A lo largo del proceso, se realizarán varias ejecuciones de la simulación, variando tanto el número de montacargas como las distancias entre la zona de carga y descarga. Esto permitirá observar cómo estos factores influyen en la eficiencia del sistema, con el objetivo de determinar el punto óptimo en el que el tiempo total de descarga se minimiza sin causar congestión o interferencias innecesarias entre los montacargas.

Al final, se presentarán los resultados obtenidos en un archivo CSV, y se derivará una expresión analítica que describa cómo calcular el número óptimo de montacargas según los parámetros de entrada.

2. Modelo de Simulación

2.1 Descripción del Modelo

En este modelo, el objetivo es simular el proceso de descarga de un tráiler por parte de varios montacargas. Para ello, se utiliza una malla 5x5, donde cada celda representa un nodo en el plano de simulación. La ubicación del tráiler (zona de carga)

y la zona de descarga están asignadas a nodos específicos dentro de esta malla. Los montacargas deben desplazarse desde el tráiler hasta la zona de descarga siguiendo rutas que se generan dinámicamente en función de los parámetros de entrada.

Cada montacargas es considerado como un agente dentro de la simulación que debe moverse dentro del plano mientras sigue ciertas reglas de interacción con otros montacargas, como mantener una distancia mínima para evitar colisiones.

2.2 Movimiento de los Montacargas

El movimiento de los montacargas se calcula utilizando una ruta óptima desde su posición actual hasta el tráiler o la zona de descarga. La ruta se genera dinámicamente utilizando el algoritmo de Dijkstra, que encuentra el camino más corto entre los nodos del plano.

Existen dos rutas principales en el sistema que comparten todos los montacargas:

1. Ruta de ida: Es la ruta que toma el montacargas desde su posición inicial (zona de descarga) hasta el tráiler (zona de carga).
2. Ruta de vuelta: Es la ruta que lleva al montacargas desde el tráiler hasta la zona de descarga.

El sistema está diseñado para garantizar que no haya colisiones entre montacargas que se desplacen en direcciones opuestas, ya que las rutas de ida y vuelta son completamente separadas. Además, los movimientos de los montacargas son controlados para evitar que se bloqueen entre sí.

2.3 Generación de Rutas con el Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra utiliza una matriz de adyacencia que define las conexiones entre los nodos en la malla. Cada nodo está conectado a sus vecinos inmediatos (arriba, abajo, izquierda, derecha) si es posible moverse en esa dirección. La matriz de adyacencia se usa para determinar las rutas más cortas entre el tráiler y la zona de descarga, así como entre los montacargas y estas zonas.

La matriz de adyacencia se construye de manera que los valores en ella representen las conexiones entre los nodos del plano. En este caso, si existe una conexión directa entre dos nodos, el valor en la matriz será 1, de lo contrario, será 0.

2.3.1 Matriz de Adyacencia

La matriz de adyacencia utilizada en este modelo representa el plano de simulación, que es una malla de 5x5, con 25 nodos. Cada celda en la matriz indica si existe una conexión directa entre dos nodos adyacentes. La matriz se

construye de manera que los movimientos están restringidos a las direcciones de arriba, abajo, izquierda y derecha, evitando movimientos diagonales.

A continuación, se muestra la matriz de adyacencia generada para este modelo en la **Tabla 1**:

Tabla 1 Matriz de Adyacencia

| Nodo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

2.4. Interacciones y Distancia Mínima entre Montacargas

Una parte crucial de este modelo es la interacción entre los montacargas para evitar colisiones y mantener una distancia mínima entre ellos durante todo el proceso de descarga. Si dos montacargas se acercan a una distancia menor o igual a la distancia mínima establecida, el montacargas que se encuentra detrás debe detenerse temporalmente. Solo continuará su movimiento una vez que haya suficiente espacio disponible frente a él. Esta dinámica asegura que los montacargas no se bloqueen mutuamente y que el proceso de descarga se mantenga fluido.

Además, dado que las rutas de ida y vuelta están separadas, no se permiten intersecciones entre montacargas que se desplacen en direcciones opuestas. Esto contribuye a una mayor eficiencia al evitar el riesgo de colisiones en los trayectos.

Para calcular la distancia entre los montacargas, se utiliza la función *numpy.linalg.norm*, que calcula la norma euclidiana entre dos puntos en el espacio. En este caso, la distancia entre dos montacargas se calcula como la distancia entre los nodos en el plano de simulación, que corresponde a sus coordenadas dentro de la malla.

La fórmula que se utiliza es la siguiente:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Donde d es la distancia entre los montacargas, (x_1, y_1) son las coordenadas del primer montacargas, y (x_2, y_2) son las coordenadas del segundo montacargas.

La función `numpy.linalg.norm` facilita este cálculo al recibir como entrada las diferencias en las coordenadas de los dos montacargas y devolver la distancia euclidiana entre ellos. Esta distancia se verifica continuamente durante la simulación para garantizar que los montacargas mantengan la distancia mínima entre ellos.

2.5 Manejo Automático del Número de Montacargas

En caso de que el número de montacargas solicitado por el usuario y la distancia mínima especificada entre ellos no permita una ubicación válida de todos los montacargas dentro del plano de simulación, el programa ajustará automáticamente la cantidad generada. Esto se hace para garantizar que el sistema cumpla con las restricciones físicas y operativas del modelo. Solo se generará la cantidad máxima de montacargas que pueda colocarse en el plano de manera que se respete la distancia mínima requerida y se permita un movimiento eficiente, evitando colisiones o bloqueos en la simulación.

Esta funcionalidad es crucial para mantener la validez del modelo, asegurando que los montacargas tengan suficiente espacio para operar sin interferencias y cumplan con las restricciones definidas por el usuario. El ajuste se implementa a través de un cálculo previo en el archivo `lifter.py`, en el método `calcular_max_lifters()`. Este método verifica si es posible posicionar todos los montacargas solicitados según las restricciones. Si no es viable, ajusta automáticamente el número de montacargas a la cantidad máxima permitida sin comprometer las condiciones especificadas.

El cálculo en `calcular_max_lifters()` divide la distancia total del trayecto (considerando los recorridos de ida y vuelta) entre la distancia mínima requerida entre montacargas. Al resultado se le resta una unidad para garantizar que se respete completamente la distancia mínima, evitando que un montacargas adicional quede demasiado cerca del siguiente.

```
def calcular_max_lifters(self):
    max_lifters = int(self.distancia_ruta / self.distancia_montacargas) - 1
    return max_lifters
```

Figura 1 Método para el Cálculo del Número Máximo de Montacargas

Por otro lado, la distancia total del trayecto se calcula mediante el método `calcular_distancia_total()`. Este método recorre la lista de nodos `self.rutas`, obteniendo las coordenadas de cada nodo desde el diccionario `self.mapeo_nodos`. Luego, calcula la distancia Euclidiana entre cada par de nodos consecutivos. Estas

distancias se acumulan en una variable, que se retorna al finalizar, representando la longitud total del trayecto según las posiciones de los nodos en la ruta.

```
def calcular_distancia_total(self):
    distancia_total = 0
    num_nodos = len(self.rutas)

    for i in range(num_nodos-1):
        nodo_actual = self.rutas[i]
        nodo_siguiente = self.rutas[i + 1]
        coord_actual = numpy.array(self.mapeo_nodos[nodo_actual].coordenadas_nodo)
        coord_siguiente = numpy.array(self.mapeo_nodos[nodo_siguiente].coordenadas_nodo)
        distancia_total += numpy.linalg.norm(coord_actual - coord_siguiente)

    return distancia_total
```

Figura 2 Método para el Cálculo de la Distancia de la ruta de Ida y Vuelta de los Montacargas

2.6 Descripción del Archivo CSV de Resultados

El archivo CSV generado durante las simulaciones recopila los datos clave de cada escenario evaluado, permitiendo analizar el desempeño del modelo. A continuación, se describen los encabezados presentes en el archivo y el significado de cada uno:

1. **Identificador de Simulación:** Número único que identifica cada ejecución de la simulación.
2. **Número de Agentes Deseados:** Cantidad de montacargas que el usuario solicitó para la simulación.
3. **Número de Agentes Creados:** Cantidad de montacargas que el sistema generó, ajustándose a las restricciones del modelo, como la distancia mínima entre agentes.
4. **Número de Cajas:** Total de cajas que debían ser descargadas del tráiler en la simulación.
5. **Coordenada X de Zona de Descarga:** Posición en el eje X de la zona donde los montacargas colocan las cajas descargadas.
6. **Coordenada Y de Zona de Descarga:** Posición en el eje Y de la zona de descarga.
7. **Coordenada Z de Zona de Descarga:** Posición en el eje Z de la zona de descarga.
8. **Coordenada X de Zona de Recolección:** Posición en el eje X del tráiler, donde los montacargas recogen las cajas.
9. **Coordenada Y de Zona de Recolección:** Posición en el eje Y del tráiler.
10. **Coordenada Z de Zona de Recolección:** Posición en el eje Z del tráiler.
11. **Distancia Mínima entre Agentes:** Espacio mínimo, en unidades, que debe mantenerse entre los montacargas durante la simulación.
12. **Tiempo Total de Simulación:** Duración completa de la simulación, desde el inicio de las operaciones hasta la descarga de la última caja, expresada en horas, minutos, segundos y microsegundos.

3. Diseño de la Experimentación y Simulaciones

Para cumplir con el objetivo principal de determinar el número óptimo de montacargas necesarios para la descarga eficiente de un tráiler, se realizaron una serie de simulaciones en las cuales se analizaron las variaciones en varios parámetros clave del sistema. Estos experimentos están diseñados para evaluar cómo influye el número de montacargas y las distancias entre las zonas de carga y descarga en el tiempo total de descarga

3.1 Objetivo de la Experimentación

El principal objetivo es encontrar el número óptimo de montacargas para minimizar el tiempo total de descarga, considerando las restricciones operativas y físicas del sistema, como la distancia mínima entre los montacargas y las zonas de carga/descarga. Además, se buscará determinar cómo la distancia entre las zonas afecta la eficiencia operativa, y cómo la adición de más montacargas puede contribuir a la congestión del sistema.

La experimentación se divide en tres análisis principales:

1. **Análisis 1:** En este análisis, se variará únicamente el número de montacargas, manteniendo constantes todas las demás variables, como la distancia entre las zonas de carga y descarga, la distancia mínima entre los montacargas, y el número de cajas. El objetivo es encontrar el número de montacargas que minimiza el tiempo total de descarga sin causar una congestión innecesaria.
2. **Análisis 2:** En este análisis se evaluará cómo la distancia mínima entre los montacargas afecta la eficiencia del sistema. En este caso, el número de montacargas óptimo determinado en el *Análisis 1* se mantendrá fijo, y se variará la distancia mínima entre los montacargas para observar su impacto en el tiempo total de descarga.
3. **Análisis 3:** En este análisis, se estudiará cómo la distancia entre la zona de carga y descarga influye en el tiempo total de descarga, manteniendo constantes otras variables clave del sistema. Se utilizarán los valores óptimos obtenidos previamente en el *Análisis 1* para el número de montacargas, y en el *Análisis 2* para la distancia mínima entre montacargas. La única variable que se modificará será la distancia entre las zonas de carga y descarga.

Las siguientes variables se mantendrán constantes a lo largo de todas las simulaciones:

- Número de cajas: 5
- Velocidad de los montacargas: 0.8

3.1.1 Evaluación del Número Óptimo de Montacargas

Para el Análisis 1, las coordenadas de la zona de carga y la zona de descarga fueron seleccionadas de manera que el número de montacargas fuera el factor predominante en la simulación. Las coordenadas de las zonas fueron elegidas como sigue:

- Zona de descarga ($x = -160$, $y = 0$, $z = -160$) Nodo 6: Se eligió una ubicación central para los montacargas, lo que permite que se minimicen las distorsiones causadas por coordenadas extremas.
- Zona de carga ($x = 160$, $y = 0$, $z = 160$) Nodo 18: La zona de descarga fue situada a una distancia razonable de la zona de carga, asegurando que no se introdujera un factor adicional que afectara el tiempo de descarga al principio.

A continuación, se presenta una tabla con las características específicas de cada simulación, incluyendo las variables que se mantuvieron constantes y aquellas que fueron modificadas:

Tabla 2 Especificaciones de Escenarios de Simulación para Análisis 1

| Simulación | Número de Montacargas | Distancia Mínima entre Montacargas | Número de Cajas | Coordenadas de Zona de Descarga | Coordenadas de Zona de Carga | Distancia del Recorrido Generado | Distancia Euclidiana |
|------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 0 | 5 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 1 | 6 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 2 | 7 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 3 | 8 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 4 | 9 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 5 | 10 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 6 | 15 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 7 | 20 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 8 | 25 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 9 | 30 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 10 | 35 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 11 | 40 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 12 | 45 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 13 | 50 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 14 | 55 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |

3.1.2 Evaluación de la Distancia Mínima Óptima entre Montacargas

En este análisis, se mantendrá fijo el número óptimo de montacargas determinado en el Análisis 1, y se variará la distancia mínima entre los montacargas. La finalidad es evaluar cómo diferentes valores de esta distancia afectan el tiempo total de descarga, ya que una distancia mínima demasiado grande puede disminuir la eficiencia debido a la reducción en la cantidad de montacargas que se pueden ubicar en el plano.

A continuación, se presenta una tabla con las características específicas de cada simulación, incluyendo las variables que se mantuvieron constantes y aquellas que fueron modificadas:

Tabla 3 Especificaciones de Escenarios de Simulación para Análisis 2

| Simulación | Número de Montacargas | Distancia Mínima entre Montacargas | Número de Cajas | Coordenadas de Zona de Descarga | Coordenadas de Zona de Carga | Distancia del Recorrido Generado | Distancia Euclidiana |
|------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 0 | 10 | 30 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 1 | 10 | 35 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 2 | 10 | 40 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 3 | 10 | 45 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 4 | 10 | 50 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 5 | 10 | 55 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 6 | 10 | 60 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 7 | 10 | 65 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 8 | 10 | 70 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 9 | 10 | 75 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |
| 10 | 10 | 80 | 25 | (-160, 0, -160) | (160, 0, 160) | 1280 | 453.59 |

3.1.3 Evaluación de la Distancia Óptima entre la Zona de Descarga y Carga

En este análisis, el número de montacargas se mantiene constante según los resultados obtenidos en el Análisis 1, mientras que la distancia mínima entre montacargas se establece conforme a lo determinado en el Análisis 2. En este análisis, se modifican las distancias entre la zona de carga y la zona de descarga con el fin de evaluar su impacto en el tiempo total de descarga.

A continuación, se presenta una tabla con las características específicas de cada simulación, incluyendo las variables que se mantuvieron constantes y aquellas que fueron modificadas:

Tabla 4 Especificaciones de Escenarios de Simulación para Análisis 3

| Simulación | Número de Montacargas | Distancia Mínima entre Montacargas | Número de Cajas | Coordenadas de Zona de Descarga | Coordenadas de Zona de Carga | Distancia del Recorrido Generado | Distancia Euclidiana |
|------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 0 | 10 | 65 | 25 | Nodo 0: (-320.0, 0.0, -320.0) | Nodo 6: (-160.0, 0.0, -160.0) | 640 | 226.27 |
| 1 | 10 | 65 | 25 | Nodo 6: (-160.0, 0.0, -160.0) | Nodo 12: (0.0, 0.0, 0.0) | 640 | 226.27 |
| 2 | 10 | 65 | 25 | Nodo 7: (0.0, 0.0, -160.0) | Nodo 17: (0.0, 0.0, 160.0) | 960 | 320.00 |
| 3 | 10 | 65 | 25 | Nodo 5: (-320.0, 0.0, -160.0) | Nodo 18: (160.0, 0.0, 160.0) | 1600 | 537.40 |
| 4 | 10 | 65 | 25 | Nodo 10: (-320.0, 0.0, 0.0) | Nodo 24: (320.0, 0.0, 320.0) | 1920 | 715.54 |
| 5 | 10 | 65 | 25 | Nodo 3: (160.0, 0.0, -320.0) | Nodo 19: (320.0, 0.0, 160.0) | | 505.96 |
| 6 | 10 | 65 | 25 | Nodo 1: (-160.0, 0.0, -320.0) | Nodo 22: (0.0, 0.0, 320.0) | | 659.69 |
| 7 | 10 | 65 | 25 | Nodo 15: (-320.0, 0.0, 160.0) | Nodo 9: (320.0, 0.0, -160.0) | | 715.54 |
| 8 | 10 | 65 | 25 | | Nodo 4: (320.0, 0.0, -320.0) | | 357.77 |

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|-------------------------------|------------------------------|--|--------|
| | | | | Nodo 13: (160.0, 0.0, 0.0) | | | |
| 9 | 10 | 65 | 25 | Nodo 2: (0.0, 0.0, -320.0) | Nodo 23: (160.0, 0.0, 320.0) | | 659.69 |
| 10 | 10 | 65 | 25 | Nodo 20: (-320.0, 0.0, 320.0) | Nodo 8: (160.0, 0.0, -160.0) | | 678.82 |

4. Resultados

4.1 Resultados de la Evaluación del Número Óptimo de Montacargas

El objetivo principal de esta sección es identificar el número óptimo de montacargas necesarios para descargar un tráiler de manera eficiente. Este número se determina en función de la reducción del tiempo de ejecución al añadir montacargas adicionales y la identificación de cualquier posible congestión o interacción innecesaria entre los montacargas. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones, seguidos del análisis numérico

Tabla 5 Resultados del Análisis 1: Tiempo de Ejecución vs Número de Montacargas

| Simulación | Número de Montacargas Deseados | Número de Montacargas Creados | Tiempo de Ejecución (Minutos) |
|------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 5 | 5 | 0:01:36.615881 |
| 1 | 6 | 6 | 0:01:45.669821 |
| 2 | 7 | 7 | 0:01:38.065384 |
| 3 | 8 | 8 | 0:01:41.598804 |
| 4 | 9 | 9 | 0:01:36.022082 |
| 5 | 10 | 10 | 0:01:30.443856 |
| 6 | 15 | 15 | 0:01:54.881273 |
| 7 | 20 | 20 | 0:02:36.663196 |
| 8 | 25 | 23 | 0:03:32.022705 |
| 9 | 30 | 23 | 0:04:00.660795 |
| 10 | 35 | 23 | 0:04:37.304925 |
| 11 | 40 | 23 | 0:05:36.282978 |
| 12 | 45 | 23 | 0:06:22.777276 |
| 13 | 50 | 23 | 0:07:10.251548 |
| 14 | 55 | 23 | 0:08:22.233148 |

4.1.1 Análisis Numérico de Resultados

En el análisis de los resultados obtenidos, la relación entre el número de montacargas y el tiempo de ejecución fue modelada mediante la siguiente ecuación polinómica de segundo grado:

$$y = 1e^{-06x^2} + 3e^{-05x} + 0.0008$$

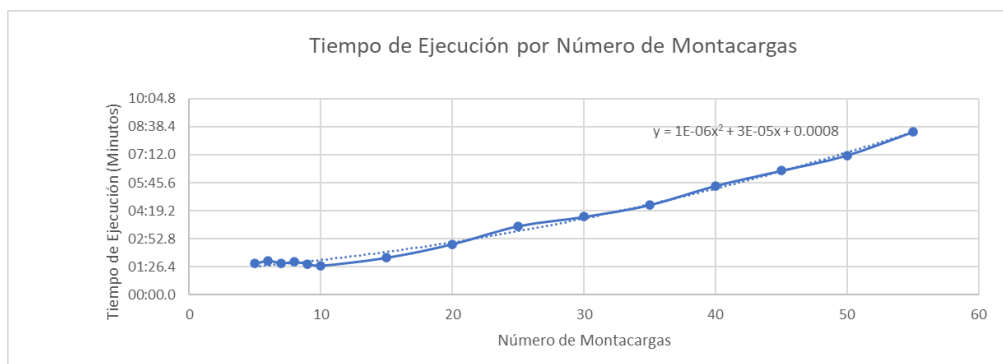


Figura 3 Gráfico de Dispersión del Tiempo de Ejecución por Número de Montacargas

Para abordar el análisis de la ecuación, primero se obtendrá su derivada

$$y' = -12xe^{-06x^2} - 15e^{-0.5x}$$

La derivada $\frac{dy}{dx}$ describe cómo cambia el tiempo de ejecución y con respecto al número de montacargas x . La interpretación es la siguiente:

- El primer término, $-12xe^{-06x^2}$, muestra que, al principio, el tiempo de ejecución disminuye más rápidamente a medida que se agregan más montacargas, pero a medida que x aumenta, el cambio se vuelve menos pronunciado. Esto indica que el proceso se estabiliza después de un número de montacargas, ya que el término depende tanto de x como de una función exponencial decreciente.
- El segundo término, $-15e^{-0.5x}$, también muestra una disminución en el tiempo de ejecución, pero a una tasa diferente debido al factor exponencial con base $e^{-0.5x}$. Este término sigue un comportamiento de decrecimiento más rápido a medida que x aumenta, pero su influencia es más moderada que la del primer término.

Para evaluar cómo cambia el tiempo de ejecución con diferentes números de montacargas, se calcula la derivada en varios puntos.

Tabla 6 Evaluación de la derivada de la Expresión Analítica en Diversos Puntos

| x (Número de Montacargas) | Derivada | Interpretación de la Derivada |
|---------------------------|----------|--|
| 5 | -1.2312 | La tasa de disminución del tiempo es relativamente alta. |
| 10 | -0.1010 | El tiempo aún mejora, pero a una tasa más baja. |
| 15 | -0.0082 | Mejora marginal. Empieza a disminuir lentamente. |
| 20 | -0.00068 | La mejora es muy pequeña; casi imperceptible. |
| 25 | -0.00005 | La disminución del tiempo es insignificante. |

Identificación del Punto Crítico

El punto crítico ocurre cuando la derivada se aproxima a cero, lo que indica que agregar más montacargas no produce una mejora significativa en el tiempo de ejecución. A partir de los cálculos:

Para $x = 15$, su derivada está cerca de cero (-0.0082), lo que confirma que añadir más montacargas no reduce el tiempo de manera significativa.

Por lo tanto, el número óptimo de montacargas de acuerdo con los análisis cuantitativos es 10, después del cual los beneficios son prácticamente inexistentes.

4.1.1 Análisis Práctico de Resultados

Se observó que, al aumentar el número de montacargas, el tiempo de ejecución disminuyó inicialmente, alcanzando una mejora significativa en las primeras simulaciones:

1. Simulaciones Iniciales (0 a 5 Montacargas)

- En la primera simulación (con 5 montacargas), el tiempo de ejecución es de 96.615881 segundos. Al añadir un montacargas adicional en la simulación 1 (con 6 montacargas), el tiempo de ejecución aumenta ligeramente a 105.669821 segundos. Este aumento no es significativo, con un cambio de aproximadamente un 9.38%, por lo que no se considera una pérdida significativa de eficiencia.
- Con la adición de más montacargas (simulaciones 2 a 5), el tiempo sigue reduciéndose, aunque de forma cada vez más moderada. Por ejemplo, en la simulación 5, con 10 montacargas, el tiempo es de 90.443856 segundos, lo que muestra una reducción del 5.7% en comparación con la simulación 4. Esto indica que hasta este punto, añadir montacargas sigue siendo beneficioso.

2. Simulaciones con un Número Mayor de Montacargas (15 a 55):

- A partir de la simulación 6 (15 montacargas), el tiempo de ejecución comienza a aumentar nuevamente. En lugar de reducirse, se observa un incremento significativo en el tiempo de ejecución (de 90.443856 segundos a 114.881273 segundos en la simulación 6, un aumento del 27.03%).
- A medida que se añaden más montacargas en las simulaciones posteriores, los tiempos de ejecución continúan aumentando. Por ejemplo, en la simulación 7 (20 montacargas), el tiempo es de 156.663196 segundos, lo que representa un aumento considerable en

comparación con las simulaciones previas. Este incremento es indicativo de que la adición de montacargas adicionales está provocando congestión o interacción innecesaria entre los montacargas, lo que entorpece el proceso de descarga.

4.1.2 Observaciones y Hallazgos

1. Aunque los primeros montacargas adicionales (de 5 a 10) mostraron mejoras significativas en el tiempo de ejecución, la reducción se volvió cada vez más pequeña. La diferencia de tiempo entre las simulaciones 0 y 5 (5 montacargas vs 10 montacargas) es de 6.172025 segundos, mientras que la diferencia de tiempo entre la simulación 5 y la simulación 6 (10 montacargas vs 15 montacargas) es de 24.437417 segundos. Esto sugiere que a medida que se añaden montacargas, la mejora en la eficiencia disminuye de manera proporcional.
2. A partir de la simulación 6 (15 montacargas), el sistema comienza a mostrar signos de congestión. La simulación 7, que representa 20 montacargas, tiene un tiempo de ejecución considerablemente mayor (156.663196 segundos) en comparación con las simulaciones previas. Esto indica que más montacargas no solo dejan de mejorar el proceso, sino que empiezan a interferir entre sí, generando ineficiencia.
3. En las posiciones disponibles para la zona de descarga y carga, solo fue posible la creación de 23 montacargas. Por lo tanto, a partir de la simulación 8, no fue posible añadir más montacargas, lo que limita la capacidad de mejora en las simulaciones posteriores.

4.1.3 Cálculos del 25% de Reducción

Para identificar el punto óptimo, se calculó un umbral de mejora del 25% en relación con el tiempo de ejecución en las simulaciones iniciales.

Se toma como tiempo inicial el tiempo de la simulación 0 con 5 montacargas, en el cual se detectó un total de: 96.615881 segundos.

El 25% de 96.615881 segundos es:

$$96.615881 \times 0.25 = 24.154 \text{ segundos.}$$

Por lo tanto, si un número adicional de montacargas no mejora el tiempo de ejecución en al menos 24.154 segundos, no se consideraría eficiente añadir más montacargas.

A continuación, se procederá a revisar cada uno de los cambios de tiempo para ver cuándo el tiempo de ejecución deja de mejorar en un 25% o más.

1. Simulación 0 a Simulación 1 (de 5 a 6 montacargas):

Tabla 7 Diferencia de Tiempos entre Simulaciones 0 y 1

| | Tiempo 1 | Diferencia de Tiempos |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| Simulación 0 | 96.615881 segundos | 9.053940 segundos |
| Simulación 1 | 105.669821 segundos | |

Esta diferencia es mucho menor que los 24.154 segundos requeridos para que se considere eficiente añadir más montacargas. Es un aumento de tiempo, no una mejora.

2. Simulación 1 a Simulación 2 (de 6 a 7 montacargas):

Tabla 8 Diferencia de Tiempos entre Simulaciones 1 y 2

| | Tiempo 1 | Diferencia de Tiempos |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| Simulación 1 | 105.669821 segundos | 7.604437 segundos |
| Simulación 2 | 98.065384 segundos | |

- Esta es una mejora en el tiempo, pero todavía **no alcanza los 24.154 segundos** de reducción.

3. Simulación 2 a Simulación 3 (de 7 a 8 montacargas):

Tabla 9 Diferencia de Tiempos entre Simulaciones 2 y 3

| | Tiempo 1 | Diferencia de Tiempos |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| Simulación 2 | 98.065384 segundo | 3.533420 segundos |
| Simulación 3 | 101.598804 segundos | |

Esta diferencia es mucho menor que los 24.154 segundos requeridos para que se considere eficiente añadir más montacargas. Es un aumento de tiempo, no una mejora.

3. Simulación 3 a Simulación 4 (de 8 a 9 montacargas):

Tabla 10 Diferencia de Tiempos entre Simulaciones 3 y 4

| | Tiempo 1 | Diferencia de Tiempos |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| Simulación 3 | 101.598804 segundos | 5.576722 segundos |
| Simulación 4 | 96.022082 segundos | |

Aquí hubo una pequeña mejora en el tiempo, pero de nuevo no se acerca a la reducción mínima esperada de **24.154 segundos**.

4. Simulación 4 a Simulación 5 (de 9 a 10 montacargas):

Tabla 11 Diferencia de Tiempos entre Simulaciones 4 y 5

| | Tiempo 1 | Diferencia de Tiempos |
|--------------|--------------------|-----------------------|
| Simulación 4 | 96.022082 segundos | 5.578226 segundos |
| Simulación 5 | 90.443856 segundos | |

Al igual que las simulaciones anteriores, no se logra una mejora significativa.

5. Simulación 5 a Simulación 6 (de 10 a 15 montacargas):

Tabla 12 Diferencia de Tiempos entre Simulaciones 5 y 6

| | Tiempo 1 | Diferencia de Tiempos |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| Simulación 5 | 90.443856 segundos | 24.437417 segundos |
| Simulación 6 | 114.881273 segundos | |

En este caso, el tiempo de ejecución aumenta, lo cual es indicativo de que agregar más montacargas está generando congestión en el sistema.

6. Simulación 6 a Simulación 7 (de 15 a 20 montacargas):

Tabla 13 Diferencia de Tiempos entre Simulaciones 6 y 7

| | Tiempo 1 | Diferencia de Tiempos |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| Simulación 6 | 114.881273 segundos | 41.781923 segundos |
| Simulación 7 | 156.663196 segundos | |

Este aumento sigue la tendencia de congestión, con un incremento mucho mayor en el tiempo de ejecución.

4.1.4 Anotación Importante

Es importante señalar que, además de la congestión causada por la interacción de los montacargas, otro factor que contribuye al aumento significativo en los tiempos de ejecución a medida que se incrementa el número de montacargas es la eficiencia del programa en sí. A medida que se generan más montacargas, aunque no todos sean visibles en la simulación, el sistema debe procesarlos en cada iteración. Este procesamiento adicional, aunque no siempre perceptible en la interfaz visual, afecta el rendimiento global de la simulación, lo que resulta en un ralentizamiento progresivo del proceso. Este fenómeno podría ser visto como una metáfora la cual refleja cómo la asignación de más recursos de los necesarios puede llevar a una sobrecarga en los sistemas. Si bien la lógica detrás de aumentar los recursos podría ser optimizar la eficiencia, en la práctica, contar con más montacargas de los que realmente se utilizan genera un exceso de trabajo en el sistema. Este exceso no solo aumenta los tiempos de procesamiento, sino que también introduce un costo adicional en términos de manejo de recursos, lo que termina siendo contraproducente.

4.1.5 Conclusión

Con base en los cálculos de las simulaciones y la comparación con el umbral del 25% de mejora, se concluye que el número óptimo de montacargas es de 10 montacargas. A partir de este número, añadir más montacargas no mejora significativamente el tiempo de ejecución, y, de hecho, en algunos casos (simulaciones 6 en adelante), el tiempo de ejecución comienza a aumentar debido a la congestión de los montacargas en el proceso de descarga.

Se presentan los siguientes hallazgos:

- La adición de montacargas más allá de 10 crea una congestión que incrementa el tiempo de ejecución.
- No se logró una mejora significativa en el tiempo de ejecución de más de 24.154 segundos en ninguna de las simulaciones.
- A partir de 15 montacargas, el sistema se vuelve ineficiente, con tiempos de ejecución que aumentan.

Diferencias en el modelo teórico y los datos observados:

El análisis de la relación entre el número de montacargas y el tiempo de descarga, basado tanto en las simulaciones como en la ecuación analítica, revela ciertos patrones clave. Sin embargo, es importante destacar que los resultados obtenidos mediante el modelo teórico no coinciden perfectamente con los tiempos observados en las simulaciones. Estas discrepancias surgen debido a varios factores.

- En primer lugar, la ecuación analítica es una representación aproximada que captura la tendencia general, pero no considera todos los factores que afectan las simulaciones, como la congestión, las colisiones entre montacargas o las limitaciones del programa. Estos aspectos pueden incrementar los tiempos de ejecución y no están reflejados explícitamente en la ecuación.
- Además, las simulaciones reales introducen variabilidad que no puede ser completamente modelada por la ecuación. Esto incluye ineficiencias específicas del proceso o el impacto de tener más recursos de los necesarios, lo que puede generar interacciones no previstas y aumentar los tiempos.

4.2 Resultados de la Evaluación de la Distancia Mínima Óptima entre Montacargas

El objetivo de esta evaluación fue determinar cómo la distancia mínima establecida entre montacargas afecta el tiempo total de ejecución durante las operaciones de carga y descarga. En estas simulaciones, el número de montacargas se mantuvo constante

en 10, de acuerdo con lo definido en el *Análisis Número 1*, mientras que la distancia mínima entre ellos se varió en incrementos definidos. Los resultados se pueden observar en la **Tabla 14**.

Tabla 14 Resultados de Análisis 2: Tiempo de Ejecución vs Distancia Mínima entre Montacargas

| Simulación | Número de Montacargas | Distancia Mínima entre Montacargas | Tiempo de Ejecución |
|------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|
| 0 | 10 | 30 | 0:01:41.263656 |
| 1 | 10 | 35 | 0:01:39.215531 |
| 2 | 10 | 40 | 0:01:39.513247 |
| 3 | 10 | 45 | 0:01:44.231802 |
| 4 | 10 | 50 | 0:01:45.560838 |
| 5 | 10 | 55 | 0:01:41.761779 |
| 6 | 10 | 60 | 0:01:39.053770 |
| 7 | 10 | 65 | 0:01:38.237594 |
| 8 | 10 | 70 | 0:01:38.838185 |
| 9 | 10 | 75 | 0:01:41.975074 |
| 10 | 10 | 80 | 0:01:43.884066 |

Al analizar los datos, se observa en la **Figura 4** que los tiempos de ejecución no siguen una tendencia estrictamente lineal ni uniforme a medida que aumenta la distancia mínima. Aunque en algunas simulaciones un incremento en la distancia parece correlacionarse con una mejora en los tiempos de ejecución (por ejemplo, la disminución gradual hasta alcanzar 1:38.237594 con 65 unidades), en otras se observan anomalías, como un aumento inesperado a 1:44.231802 con 45 unidades de distancia.

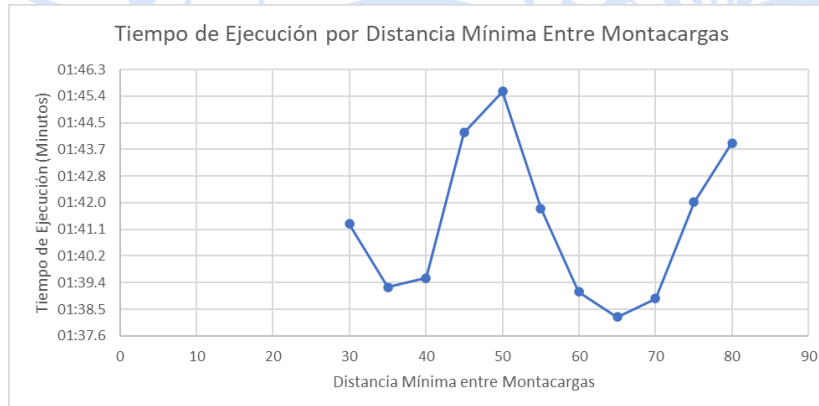


Figura 4 Gráfico de Dispersión de Tiempo de Ejecución por Distancia Mínima entre Montacargas

A pesar de estas variaciones, puede identificarse un punto de referencia útil: 65 unidades de distancia mínima parecen representar el mejor equilibrio entre evitar interferencias y mantener trayectorias eficientes, con el menor tiempo registrado en la simulación correspondiente. Sin embargo, este resultado no debe considerarse definitivo debido a las fluctuaciones en los datos.

Además, para distancias mayores a 65 unidades, como las simulaciones con 70 y 75 unidades, el tiempo comienza a estabilizarse o incluso a incrementarse ligeramente. Esto podría deberse a que mayores separaciones no solo evitan interferencias, sino

que también introducen distancias adicionales innecesarias que los montacargas deben recorrer, disminuyendo la eficiencia general.

4.3 Resultados de la Evaluación de la Distancia Óptima entre la Zona de Descarga y Carga

En esta sección, se presenta el análisis de la relación entre el tiempo de ejecución y la distancia mínima entre las zonas de carga y descarga. En la **Tabla 15**, se observa cómo varían los tiempos de ejecución a medida que cambia la distancia entre las zonas.

Tabla 15 Resultados de Análisis 3: Tiempo de Ejecución vs Distancia entre Zonas

| Simulación | Número de Montacargas | Distancia Mínima entre Montacargas | Coordenadas de Zona de Descarga | Coordenadas de Zona de Carga | Distancia del Recorrido Generado | Distancia Euclidiana | Tiempo de Ejecución |
|------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------|
| 0 | 10 | 65 | Nodo 0: (-320.0, 0.0, -320.0) | Nodo 6: (-160.0, 0.0, -160.0) | 640 | 226.27 | 0:01:05.287 179 |
| 1 | 10 | 65 | Nodo 6: (-160.0, 0.0, -160.0) | Nodo 12: (0.0, 0.0, 0.0) | 640 | 226.27 | 0:01:03.841 326 |
| 2 | 10 | 65 | Nodo 7: (0.0, 0.0, -160.0) | Nodo 17: (0.0, 0.0, 160.0) | 960 | 320.00 | 0:01:19.475 178 |
| 3 | 10 | 65 | Nodo 5: (-320.0, 0.0, -160.0) | Nodo 18: (160.0, 0.0, 160.0) | 1600 | 537.40 | 0:02:15.745 379 |
| 4 | 10 | 65 | Nodo 10: (-320.0, 0.0, 0.0) | Nodo 24: (320.0, 0.0, 320.0) | 1920 | 715.54 | 0:02:53.151 729 |
| 5 | 10 | 65 | Nodo 3: (160.0, 0.0, -320.0) | Nodo 19: (320.0, 0.0, 160.0) | 1280 | 505.96 | 0:01:43.733 434 |
| 6 | 10 | 65 | Nodo 1: (-160.0, 0.0, -320.0) | Nodo 22: (0.0, 0.0, 320.0) | 1600 | 659.69 | 0:02:14.410 200 |
| 7 | 10 | 65 | Nodo 15: (-320.0, 0.0, 160.0) | Nodo 9: (320.0, 0.0, -160.0) | 1920 | 715.54 | 0:02:54.115 954 |
| 8 | 10 | 65 | Nodo 13: (160.0, 0.0, 0.0) | Nodo 4: (320.0, 0.0, -320.0) | 960 | 357.77 | 0:01:22.364 589 |
| 9 | 10 | 65 | Nodo 2: (0.0, 0.0, -320.0) | Nodo 23: (160.0, 0.0, 320.0) | 1600 | 659.69 | 0:02:17.263 011 |
| 10 | 10 | 65 | Nodo 20: (-320.0, 0.0, 320.0) | Nodo 8: (160.0, 0.0, -160.0) | 1920 | 678.82 | 0:02:50.373 445 |
| 11 | 10 | 65 | Nodo 9: (320.0, 0.0, -160.0) | Nodo 18: (160.0, 0.0, 160.0) | 960 | 357.77 | 0:01:19.733 296 |

En las primeras simulaciones, con distancias más cortas entre la zona de carga y descarga, los tiempos de ejecución son relativamente bajos. Por ejemplo, en la simulación 0, donde la distancia es de 640 unidades, el tiempo de ejecución es de 1 minuto y 5 segundos. Este patrón se repite en otras simulaciones con distancias similares, como en la simulación 2, donde la distancia recorrida también es de 640 unidades, y el tiempo de ejecución es de 1 minuto y 3 segundos, indicando una alta eficiencia en distancias más cortas.

Sin embargo, a medida que las distancias entre las zonas de carga y descarga aumentan, los tiempos de ejecución también tienden a incrementarse. En la simulación 3, por ejemplo, la distancia recorrida es de 1600 unidades, lo que genera un tiempo de ejecución considerablemente mayor, de 2 minutos y 15 segundos. Este aumento en los tiempos de ejecución se vuelve aún más evidente en simulaciones con distancias aún mayores, como la simulación 4, donde la distancia recorrida es de 1920 unidades, y el tiempo de ejecución es de 2 minutos y 53 segundos. A medida que la distancia aumenta, los montacargas deben recorrer trayectorias más largas, lo que genera un incremento directo en el tiempo que tardan en completar el proceso de carga y descarga.

El patrón observado también resalta que la relación entre la distancia y el tiempo de ejecución no es completamente lineal, como se observa en la Figura 5, pero sí existe una tendencia clara de que las distancias mayores tienden a generar tiempos de ejecución más largos. Esto sugiere que el sistema de montacargas experimenta una disminución en la eficiencia a medida que las zonas de carga y descarga se alejan, posiblemente debido a la necesidad de recorrer trayectorias más largas, lo que incrementa el tiempo requerido para completar las operaciones de carga y descarga. Además, a medida que la distancia aumenta, los montacargas deben adaptarse a rutas menos directas, lo que puede generar ineficiencias adicionales, como la necesidad de evitar colisiones o ajustarse a las limitaciones del entorno.

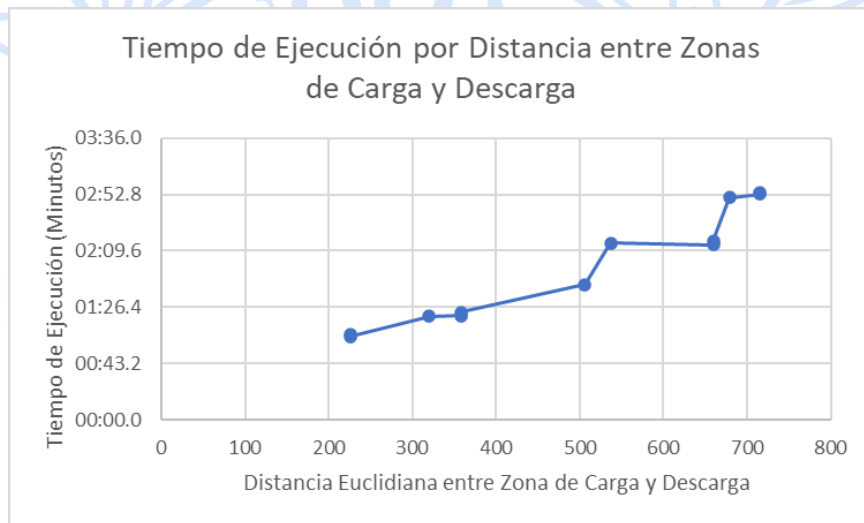


Figura 5 Gráfico de Dispersión de Tiempo de Ejecución por Distancias entre Zonas de Carga y Descarga

Asimismo, aunque las distancias recorridas aumentan, no siempre guardan una relación proporcional con las distancias euclidianas, lo que sugiere que los montacargas no siguen las rutas más directas. Por ejemplo, en la simulación 4, la distancia recorrida es considerablemente mayor que la distancia euclidiana, lo que se debe a la necesidad de los montacargas de tomar trayectorias más largas para evitar colisiones con otros montacargas o para adaptarse a las limitaciones del entorno de la simulación.

Por último, es importante destacar que en las simulaciones 0 y 11, debido a las distancias reducidas entre las zonas de carga y descarga, no hubo suficiente espacio para acomodar los 10 montacargas, por lo que solo pudieron operar 8 de ellos.

4.3.1 Conclusión

Los resultados muestran que existe una relación directa entre el tiempo de ejecución y la distancia entre la zona de carga y descarga. A medida que las distancias aumentan, también lo hacen los tiempos de ejecución. Este patrón subraya la importancia de mantener distancias razonables entre las zonas de carga y descarga para garantizar una alta eficiencia en el sistema de montacargas. Las simulaciones con distancias más cortas tienden a ser más rápidas y eficientes, mientras que aquellas con distancias mayores incrementan considerablemente los tiempos de ejecución.

5. Conclusiones Generales

En este estudio se ha evaluado el desempeño de un sistema de montacargas en función de varios parámetros, como el número de montacargas, la distancia mínima entre ellos y las posiciones de carga y descarga. A lo largo de las simulaciones realizadas, se observaron tendencias claras que nos permiten identificar las configuraciones más eficientes, así como los puntos en los que el sistema empieza a experimentar ineficiencias.

En primer lugar, la adición de montacargas adicionales mostró mejoras significativas en los tiempos de ejecución hasta cierto punto, después del cual la eficiencia dejó de aumentar de manera proporcional. Este punto de saturación es fundamental para la planificación y la gestión eficiente de recursos, ya que más allá de un número óptimo de montacargas, los beneficios adicionales son marginales o incluso contraproducentes. Esto agrega un nivel de complejidad innecesaria que solo incrementa la congestión en el sistema.

Por otro lado, el análisis de la distancia mínima entre los montacargas reveló que los tiempos de ejecución no siguen una tendencia estrictamente lineal ni uniforme a medida que aumenta la distancia mínima. Aunque en algunas simulaciones un incremento en la distancia parece correlacionarse con una mejora en los tiempos de ejecución, en otras se observan anomalías, lo que sugiere que existen otros factores que influyen en la eficiencia de manera no siempre predecible.

Finalmente, en el análisis de la distancia entre la zona de carga y descarga, se mostró que existe una relación directa entre el tiempo de ejecución y la distancia entre las zonas. A medida que las distancias aumentan, también lo hacen los tiempos de ejecución. Este patrón subraya la importancia de mantener distancias razonables entre las zonas de carga y descarga para garantizar una alta eficiencia en el sistema de montacargas.

En general, el análisis demuestra que el sistema presenta una eficiencia decreciente cuando se excede un número determinado de montacargas. La planificación de las rutas y la distribución de los recursos deben tener en cuenta tanto las distancias físicas como la interacción entre los montacargas.