

**Informe del Proyecto: Optimización de Asignación de Tareas en Máquinas Paralelas**



Maria Paula Rodríguez Ruiz  
Zenen Contreras Royero  
Juan Felipe Parrales

Optimización y Simulación  
Dpto. de Ingeniería de Sistemas  
Pontificia Universidad Javeriana  
Bogotá, Colombia  
18 de Mayo del 2025

## Tabla de contenidos

<b>I. NOSOTROS .....</b>	<b>2</b>
<b>II. RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>III. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
<b>V. MÉTODO .....</b>	<b>4</b>
I. ENFOQUE GENERAL .....	4
II. ANÁLISIS DE DATOS DE ENTRADA .....	5
III. DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	7
<b>VI. IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>9</b>
I. ESTRUCTURA DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....	9
II. IMPLEMENTACIÓN DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN .....	10
III. GESTIÓN DE FALLAS Y CONTABILIZACIÓN DE RESULTADOS .....	11
<b>VII. RESULTADOS.....</b>	<b>12</b>
I. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PROCESAMIENTO DE TAREAS.....	12
II. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	19
<b>VIII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>IX. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>21</b>

### I. Nosotros

OptiTech Solutions es una consultora especializada en simulación y optimización de sistemas industriales. Con una trayectoria de 5 años, hemos implementado soluciones innovadoras en logística, manufactura y gestión de recursos, utilizando herramientas avanzadas como FlexSim. Nuestra filosofía se centra en maximizar la eficiencia operativa mediante modelos predictivos y análisis de datos robustos.



• **Juan Felipe Parrales (Analista de Datos):** Especialista en estadística aplicada y visualización de resultados.

• **María Paula Rodríguez (Líder de Proyecto):** Experto en simulación discreta y diseño de algoritmos.

• **Zenen Contreras (Ingeniero de Sistemas):** Responsable de implementación técnica y validación de modelos.

## II. Resumen

Este proyecto aborda la optimización del sistema de asignación de tareas a tres máquinas paralelas con diferentes restricciones operativas, tiempos de procesamiento variables y fallas programadas. El modelo considera 20 tipos de tareas con 4 niveles de prioridad, cada una con ganancias específicas y posibles penalizaciones de no ser procesadas. Para evaluar la solución más optima se desarrollaron dos escenarios de simulación en FlexSim: un escenario actual con asignación básica y un escenario mejorado que implementa una regla de priorización basada en la asignación estratégica según las ganancias por tipo de tarea y su tiempo de procesamiento. Los resultados muestran que la implementación optimizada aumentó significativamente las ganancias totales demostrando un incremento del 67% y una reducción en las pérdidas por tareas no procesadas de un 37%.

## III. Introducción

La asignación eficiente de tareas a máquinas paralelas representa un desafío significativo en entornos industriales donde existen múltiples restricciones operativas, tiempos variables de procesamiento y la posibilidad de fallas en los equipos. Este problema se clasifica dentro de los problemas de programación de máquinas paralelas (parallel machine scheduling), y es conocido por su complejidad NP-hard cuando se consideran múltiples restricciones (Pinedo, 2016). Como demuestran Fanjul-Peyro et al. (2019), la inclusión de restricciones adicionales como tiempos de preparación dependientes de la secuencia o fallas de máquinas aumenta significativamente la complejidad computacional del problema, requiriendo enfoques heurísticos o metaheurísticos para su resolución práctica.

El presente estudio se enfoca en la optimización de un sistema con tres máquinas paralelas que deben procesar 20 tipos diferentes de tareas, cada una con distintos niveles de prioridad que determinan su valor económico para la organización. El objetivo principal es maximizar la ganancia neta del sistema considerando tanto los beneficios por tareas completadas como las penalizaciones por tareas no ejecutadas.

La relevancia de este estudio radica en su aplicabilidad directa a entornos industriales reales donde la programación eficiente de recursos puede tener un impacto significativo en la productividad y rentabilidad de las operaciones. La simulación permite evaluar estrategias de asignación sin interrumpir operaciones existentes, proporcionando una herramienta valiosa para la toma de decisiones.

## IV. Planteamiento del problema

Como bien se mencionó en la sección anterior, el sistema bajo estudio consiste en tres máquinas paralelas que deben procesar 20 tipos diferentes de tareas con prioridades que van del nivel 1 al 4. El problema presenta las siguientes características y restricciones:

- Cada tarea tiene un tiempo específico de procesamiento que varía según la máquina asignada
- No todas las máquinas pueden procesar todos los tipos de tareas debido a restricciones técnicas
- Las tareas de prioridad 4 requieren la ejecución de dos subtareas para completarse

- Las máquinas presentan fallas con tiempos de inactividad que siguen distribuciones específicas
- La realización de tareas genera ganancias según su nivel de prioridad (1: 3 unidades, 2: 5 unidades, 3: 10 unidades, 4: 36 unidades (2 subtareas))
- Las tareas no procesadas generan una penalización de 9 unidades

El objetivo es maximizar la ganancia neta considerando un horizonte temporal de 1000 minutos, con llegadas de tareas siguiendo una distribución triangular.

Los principales desafíos identificados en este sistema son:

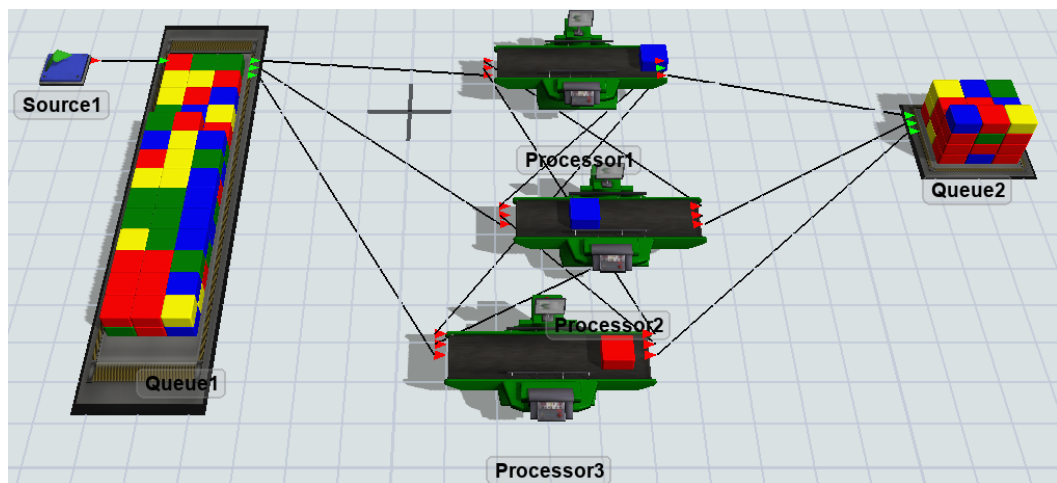
- La asignación estratégica de tareas considerando las restricciones técnicas
- La gestión eficiente de las tareas de alta prioridad
- La mitigación del impacto de las fallas de las máquinas
- El balance entre procesar tareas según su valor y tiempo de procesamiento.
- Diferentes prioridades de tareas con ganancias variables
- Tareas de prioridad 4 que requieren procesamiento de subtareas

## V. Método

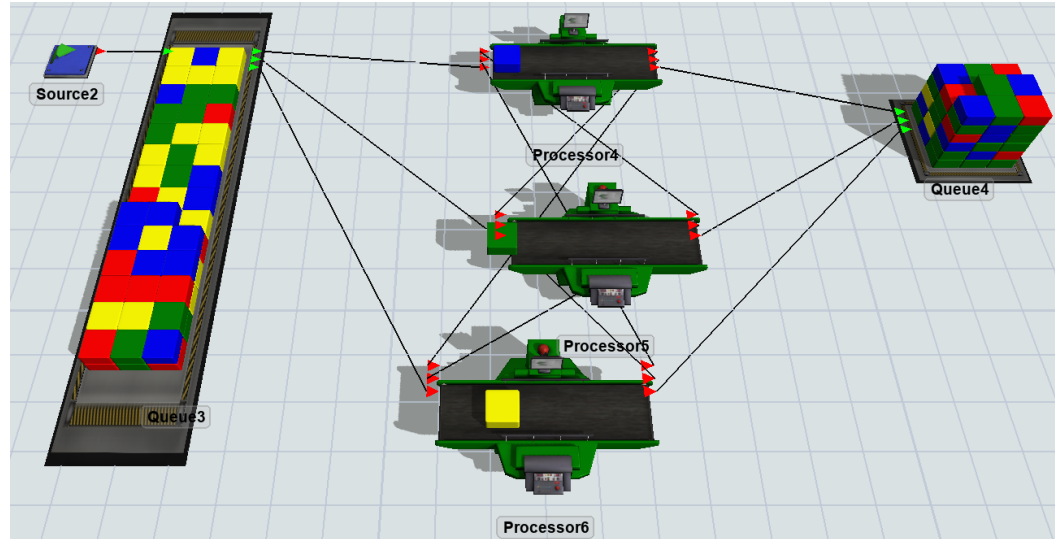
### i. Enfoque General

Para abordar este problema de optimización, se implementó un modelo de simulación de eventos discretos utilizando FlexSim (2024) como herramienta de modelado. El estudio se estructuró en dos fases principales:

1. **Simulación del escenario actual:** Implementación de una política básica de asignación donde las tareas se procesan en la primera máquina disponible.



2. **Simulación del escenario mejorado:** Implementación de una regla de priorización específica basada en el análisis de ganancia y tiempo de procesamiento.



## ii. Análisis de datos de entrada

Los datos de entrada fundamentales para el modelo fueron:

1. **Tiempos de procesamiento:** Se utilizó una matriz que define el tiempo requerido (en minutos) para cada tipo de tarea en cada máquina. Los valores marcados con asterisco (en flexsim 0) indican imposibilidad técnica de procesamiento. Se duplicaron los tiempos con respecto a la tabla inicial de las tareas tipo 2, 4, 7 y 14 para simular el procesamiento de las dos subtarefas correspondientes a la prioridad 4.

	M1	M2	M3
T1	*	85	96
T2	160	*	54
T3	*	76	*
T4	140	156	22
T5	64	75	*
T6	*	*	50
T7	*	*	140
T8	74	96	*
T9	70	*	90
T10	43	18	28
T11	*	*	35
T12	93	21	*
T13	56	*	*
T14	*	102	26
T15	74	*	60
T16	*	38	82
T17	*	91	30

<b>T18</b>	16	70	*
<b>T19</b>	110	96	16
<b>T20</b>	58	*	*

2. **Prioridades de tareas:** Cada tipo de tarea tiene asignada una prioridad específica (de 1 a 4) que determina tanto su valor económico como sus requerimientos de procesamiento.

	<b>Prioridad</b>
<b>T1</b>	1
<b>T2</b>	4
<b>T3</b>	3
<b>T4</b>	4
<b>T5</b>	3
<b>T6</b>	3
<b>T7</b>	4
<b>T8</b>	3
<b>T9</b>	1
<b>T10</b>	3
<b>T11</b>	1
<b>T12</b>	2
<b>T13</b>	1
<b>T14</b>	4
<b>T15</b>	2
<b>T16</b>	2
<b>T17</b>	2
<b>T18</b>	3
<b>T19</b>	2
<b>T20</b>	1

3. **Parámetros de falla de máquinas:** Para cada máquina se consideraron tres parámetros críticos:

- TTFF (Time To First Failure): Tiempo hasta la primera falla
- MTBF (Mean Time Between Failures): Tiempo medio entre fallas
- MTTR (Mean Time To Repair): Tiempo medio de reparación

Estos parámetros siguen distribuciones específicas detalladas a continuación:

<b>Máquina</b>	<b>TTFF</b>	<b>MTBF</b>	<b>MTTR</b>
1	exponential(0,1200)	Uniform(500,1000)	normal(50,10)

2	exponential(0,1200)	triangular(400,600,550)	normal(50,10)
3	exponential(0,1200)	exponential(0,1000)	normal(50,10)

4. **Llegada de tareas y Ganancia Total de la Tarea:** Se estableció una llegada de tareas siguiendo una distribución triangular (mínimo 0.5, máximo 20.5, valor más probable 7) y dependiendo de la prioridad de la tarea se estableció su ganancia respectiva (P1: 3, P2: 5, P3: 10, P4: 36).

### iii. Diseño del experimento

El experimento de simulación se diseñó para comparar dos escenarios:

1. **Escenario 1 (Base):** Implementa una política de asignación básica donde las tareas se asignan al primer procesador disponible, verificando las restricciones técnicas a través de una tabla de tiempos de procesamiento.
2. **Escenario 2 (Mejorado):** Regla de Asignación Implementada: Índice de Ganancia por Unidad de Tiempo Disponible (IGUTD)

Tras evaluar diferentes reglas de asignación para sistemas de máquinas paralelas, se determinó que las reglas tradicionales como SPT (Shortest Processing Time) o LPT (Longest Processing Time) no resultaban óptimas para este caso debido a la complejidad de las restricciones y desafíos presentados en el planteamiento del problema. Es por ello que, se desarrolló e implementó la regla **IGUTD (Índice de Ganancia por Unidad de Tiempo Disponible)**, diseñada específicamente para maximizar la ganancia neta del sistema considerando todos los desafíos.

### Fundamentos de la Regla IGUTD

La regla IGUTD se basa en un principio económico fundamental: optimizar la ganancia obtenida por unidad de tiempo invertido en cada máquina. Esta regla prioriza las tareas que ofrecen mayor retorno económico en relación con el tiempo que requieren para ser procesadas. Este índice IGUTD se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IGUTD = \text{Ganancia Total de la Tarea} / \text{Tiempo de Procesamiento en la Máquina}$$

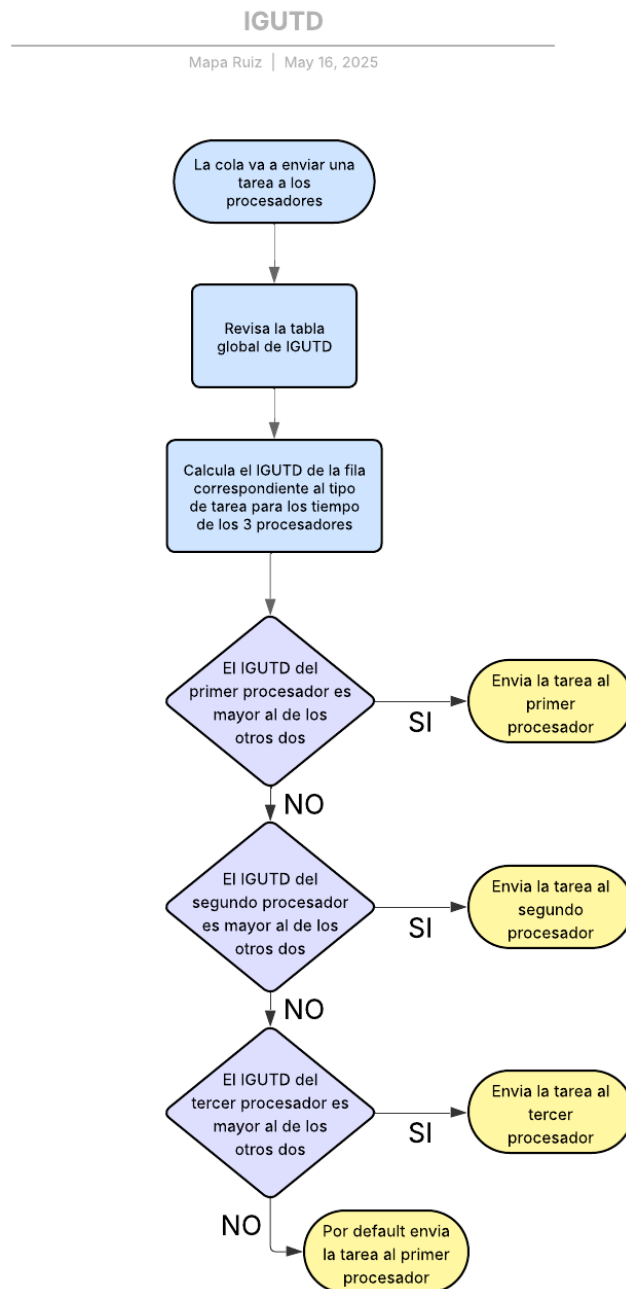
Donde:

- **Ganancia Total de la Tarea:** Depende de la prioridad de la tarea (P1: 3, P2: 5, P3: 10, P4: 36)
- **Tiempo de Procesamiento en la Máquina:** es el tiempo específico que cada máquina necesita para completar la tarea

Esta fórmula permite obtener un valor numérico que representa el rendimiento económico por minuto de asignar una tarea específica a una máquina determinada. Cuanto mayor sea este valor, más eficiente será la asignación desde una perspectiva económica.

## Representación Gráfica de la Regla IGUTD y Ejemplo esquemático

La regla IGUTD se puede representar mediante el siguiente diagrama de flujo que ilustra el proceso de toma de decisiones:



Supongamos estas tres tareas candidatas para Máquina 1 (M1):



Tarea	Prioridad	Ganancia	Tiempo en M1	IGUTD
T4	4	18	70	0.257
T9	1	3	70	0.043
T18	3	10	16	0.625

Se elige **T18**, ya que ofrece mayor ganancia por unidad de tiempo en esa máquina.

### Ventajas de la Regla IGUTD para este Problema Específico

La implementación de la regla IGUTD ofrece múltiples ventajas para el problema planteado:

1. **Optimización económica:** Maximiza la ganancia por unidad de tiempo, lo que conduce a una mayor rentabilidad global.
2. **Respeto de restricciones técnicas:** Considera automáticamente las restricciones de procesamiento al calcular índices IGUTD nulos para combinaciones tarea-máquina inviables.
3. **Adaptabilidad a prioridades:** Incorpora directamente el valor económico de cada tipo de tarea en el cálculo del índice.
4. **Consideración de eficiencia por máquina:** Tiene en cuenta que las máquinas tienen diferentes velocidades de procesamiento para distintos tipos de tarea.
5. **Gestión implícita de fallas:** Al priorizar tareas que generan mayor ganancia por unidad de tiempo, indirectamente minimiza el impacto económico de las fallas.

Esta regla representa una solución adaptada específicamente al problema estudiado, superando las limitaciones de las reglas genéricas como SPT o LPT al incorporar la dimensión económica en la toma de decisiones de asignación de tareas.

## VI. Implementación

### i. Estructura del modelo de simulación

El modelo de simulación en FlexSim se estructuró con los siguientes componentes principales:

1. **Source1/2:** Genera las tareas siguiendo la distribución triangular con un disparador (trigger) al crear que asigna el tipo de tarea (1-20) y un disparador al salir que asigna la prioridad correspondiente según el tipo de tarea, basándose en la tabla de prioridades presentada en la sección anterior.

2. **Queue1/3:** Almacena las tareas enviadas por el source e implementa un disparador al recibir que registra un aumento de 9 unidades a la fila de perdidas en la tabla global de GANANCIAS.
3. **Procesadores (1/4, 2/5 y 3/6):** Representan las máquinas paralelas con sus respectivos tiempos de procesamiento. Cada procesador verifica mediante la tabla de tiempos de procesamiento presentada en la sección anterior si puede procesar el tipo de tarea recibida; donde, si la tarea es de un tipo que no puede procesar esta se envía a otro procesador que si pueda con el menor tiempo según su tipo. Por ejemplo, si en la maquina 1 entra una tarea de tipo 1 está, al tener tiempo 0, se reenvía directamente a la maquina 2 pues tiene menor tiempo que la maquina 3 (85 y 96 respectivamente), nótese que este proceso es logrado mediante un “Port by case” en la salida de las maquinas.
4. **Queue2/4:** Cola final que implementa un disparador al recibir que se encarga de escribir en la tabla global GANANCIAS lo siguiente: Primero, un aumento de ganancias en la fila de la prioridad correspondiente al ítem entrante, así como en la fila de ganancias general. Segundo, decrementar en 9 en la fila de perdidas pues ya se ha procesado una tarea exitosamente.

## ii. Implementación de la regla de asignación

La implementación de la regla IGUTD en el modelo de simulación se realizó mediante los siguientes pasos:

1. **Creación de la tabla IGUTD:** Se estableció una tabla global que contiene los tiempos de procesamiento para cada tipo de tarea en cada máquina y la ganancia asociada, como se muestra en la imagen a continuación.

	M1	M2	M3	Prioridad	Ganancia
T1	0	85	96	1	3
T2	160	0	54	4	36
T3	0	76	0	3	10
T4	140	156	22	4	36
T5	64	75	0	3	10
T6	0	0	50	3	10
T7	0	0	140	4	36
T8	74	96	0	3	10
T9	70	0	90	1	3
T10	43	18	28	3	10
T11	0	0	35	1	3
T12	93	21	0	2	5
T13	56	0	0	1	3
T14	0	102	26	4	36
T15	74	0	60	2	5
T16	0	38	82	2	5
T17	0	91	30	2	5
T18	16	70	0	3	10
T19	110	96	16	2	5
T20	58	0	0	1	3

2. **Cálculo del índice para cada combinación tarea-máquina:** Cuando una tarea ingresa va a salir de la **Queue1/3**, se calcula su índice IGUTD para cada máquina disponible mediante el siguiente algoritmo:

Para cada tarea T:

Para cada máquina M (1, 2, 3):

Si tiempo\_procesamiento[T][M] > 0: // La máquina puede procesar la tarea

$IGUTD = \text{ganancia}[T][5] / \text{tiempo\_procesamiento}[T][M]$

Sino:

$IGUTD[T][M] = 0$  // La máquina no puede procesar esta tarea

3. **Asignación basada en el valor máximo del índice:** La tarea se asigna a la máquina donde obtiene el mayor valor IGUTD, lo que representa la combinación más eficiente. Este cálculo se realiza mediante el siguiente algoritmo integrado en FlexSim que determina a qué procesador dirigir cada tarea:

Si  $IGUTDP1 \geq IGUTDP2$  Y  $IGUTDP1 \geq IGUTDP3$ :

Asignar a Procesador 1

Sino si  $IGUTDP2 \geq IGUTDP1$  Y  $IGUTDP2 \geq IGUTDP3$ :

Asignar a Procesador 2

Sino si  $IGUTDP3 \geq IGUTDP1$  Y  $IGUTDP3 \geq IGUTDP2$ :

Asignar a Procesador 3

Sino:

Asignar a Procesador 1 (valor por defecto)

### iii. Gestión de fallas y contabilización de resultados

Como bien se mencionó en la estructura del modelo para ambos escenarios:

- Se implementaron los tiempos de falla según las distribuciones especificadas
- Al entrar una tarea en la queue del source, se activa un mecanismo que registra una penalización de 9 unidades en la tabla global de ganancias (fila "PERDIDAS")

La contabilización de ganancias se realiza mediante una tabla global donde:

- Cada fila corresponde a un nivel de prioridad (P1, P2, P3, P4)
- Para tareas de prioridad 4 completadas, se registra una ganancia de 36 unidades (2x18)
- Además de restarle las 9 unidades a perdidas pues la tarea si fue procesada

## VII. Resultados

Los resultados de la simulación muestran una mejora significativa en el escenario optimizado respecto al escenario base. A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos a través del Experimenter de FlexSim, con su correspondiente análisis estadístico.

### i. Análisis estadístico del procesamiento de tareas

#### Work In Progress (WIP)

El WIP o trabajo en proceso representa el número promedio de tareas que se encuentran en procesamiento en cada momento del sistema:

- **WIP Imp1:** Media  $7.130 \pm 0.485$  (95% IC), con desviación estándar de 1.696, mínimo 1.000 y máximo 9.750

Media:  $7.130 \pm 0.485$  (95% IC)

Mediana: Aproximadamente 7 (línea central en el diagrama)

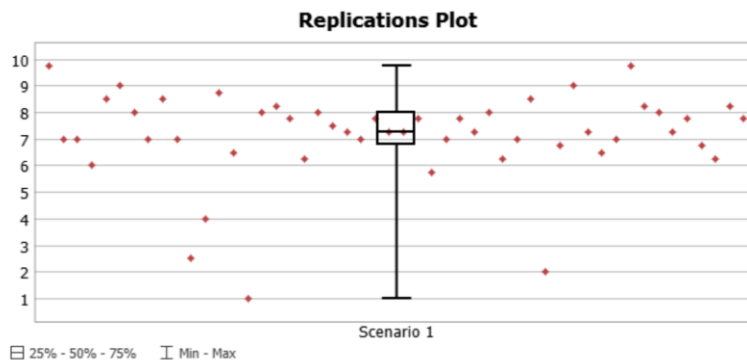
Rango intercuartílico: La caja muestra que el 50% central de los datos está entre aproximadamente 6 y 8.5

Valores atípicos: No se observan valores atípicos significativos

Dispersión: Desviación estándar de 1.696, indicando una variabilidad moderada

Coefficiente de variación: 23.8% ( $1.696/7.130 \times 100\%$ ), indicando dispersión relativamente alta

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	$7.130 \pm 0.485$	1.696	1.000	9.750



- **WIP Imp2:** Media  $14.525 \pm 0.442$  (95% IC), con desviación estándar de 1.546, mínimo 10.250 y máximo 17.500.

Media:  $14.525 \pm 0.442$  (95% IC)

Mediana: Aproximadamente 14.5

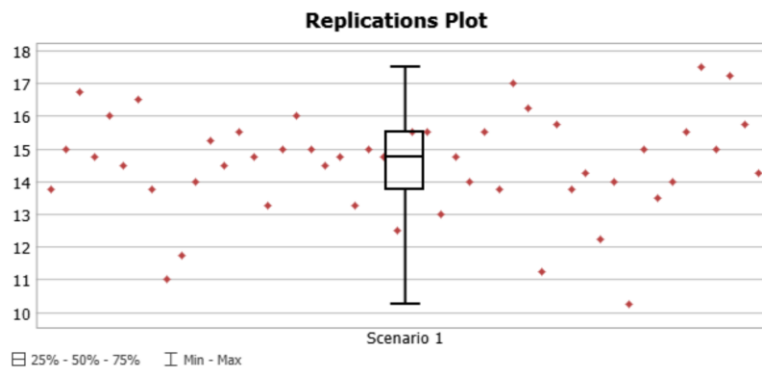
Rango intercuartílico: El 50% central de los datos está entre aproximadamente 13.5 y 15.5

Valores atípicos: No se observan valores atípicos significativos

Dispersión: Desviación estándar de 1.546, similar en valor absoluto al modelo base

Coefficiente de variación: 10.6% ( $1.546/14.525 \times 100\%$ ), indicando mayor consistencia relativa.

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	14.525 ± 0.442	1.546	10.250	17.500



La implementación 2 presenta un WIP significativamente mayor, lo que indica que el sistema mejorado mantiene más tareas en procesamiento simultáneo, aprovechando mejor la capacidad de las máquinas.

### Análisis por Fase de Procesamiento

La distribución del WIP por fases muestra cómo se distribuye la carga de trabajo en cada etapa del procesamiento:

#### Implementación 1 (Escenario Base):

- **WIP Imp1\_P1:** Media  $3.827 \pm 0.279$ , con desviación estándar de 0.977.

Media:  $3.827 \pm 0.279$

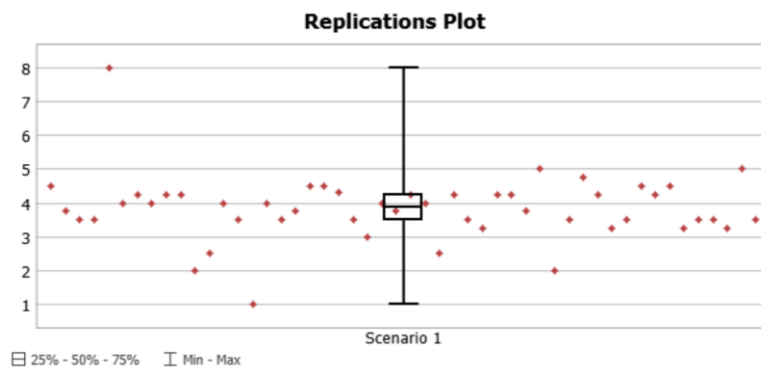
Mediana: Aproximadamente 3.8

Rango intercuartílico: Entre aproximadamente 3.2 y 4.5

Dispersión: Desviación estándar de 0.977, mostrando variabilidad moderada

Coefficiente de variación: 25.5% ( $0.977/3.827 \times 100\%$ )

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	3.827 ± 0.279	0.977	1.000	8.000



- **WIP Imp1\_P2:** Media  $3.487 \pm 0.219$ , con desviación estándar de 0.766

Media:  $3.487 \pm 0.219$

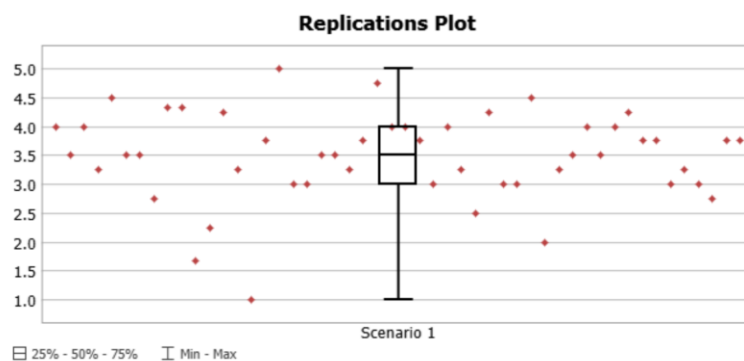
Mediana: Aproximadamente 3.5

Rango intercuartílico: Entre aproximadamente 3 y 4

Dispersión: Desviación estándar de 0.766, la más baja de los tres procesadores en la implementación base

Coefficiente de variación: 22.0% ( $0.766/3.487 \times 100\%$ )

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	3.487 ± 0.219	0.766	1.000	5.000



- **WIP Imp1\_P3:** Media  $3.840 \pm 0.267$ , con desviación estándar de 0.934.

Media:  $3.840 \pm 0.267$

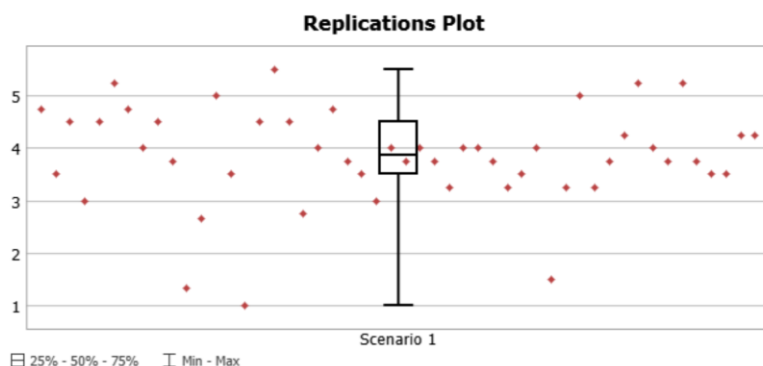
Mediana: Aproximadamente 3.8

Rango intercuartílico: Entre aproximadamente 3.2 y 4.5

Dispersión: Desviación estándar de 0.934

Coeficiente de variación: 24.3% ( $0.934/3.840 \times 100\%$ )

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	3.840 ± 0.267	0.934	1.000	5.500



### Implementación 2 (Escenario Mejorado):

- **WIP Imp2\_P1:** Media  $11.510 \pm 0.608$ , con desviación estándar de 2.127

Media:  $11.510 \pm 0.608$

Mediana: Aproximadamente 11.5

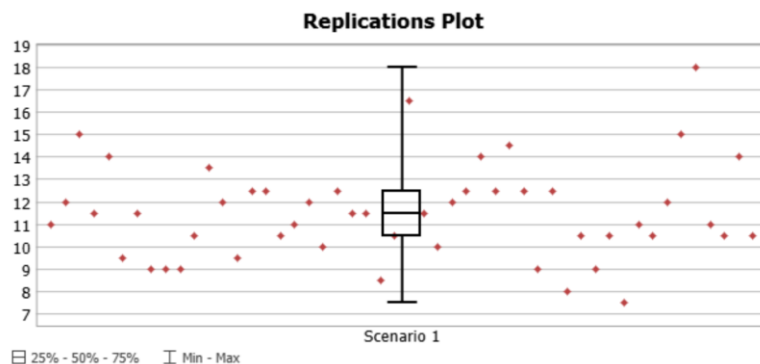
Rango intercuartílico: Entre aproximadamente 10 y 13

Valores atípicos: Se observan algunos valores atípicos inferiores que indican momentos de menor carga

Dispersión: Desviación estándar de 2.127, mayor en valor absoluto que en la implementación base

Coeficiente de variación: 18.5% ( $2.127/11.510 \times 100\%$ ), menor dispersión relativa a pesar del aumento de carga.

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	11.510 ± 0.608	2.127	7.500	18.000



- **WIP Imp2\_P2:** Media  $6.387 \pm 0.268$ , con desviación estándar de 0.939.

Media:  $6.387 \pm 0.268$

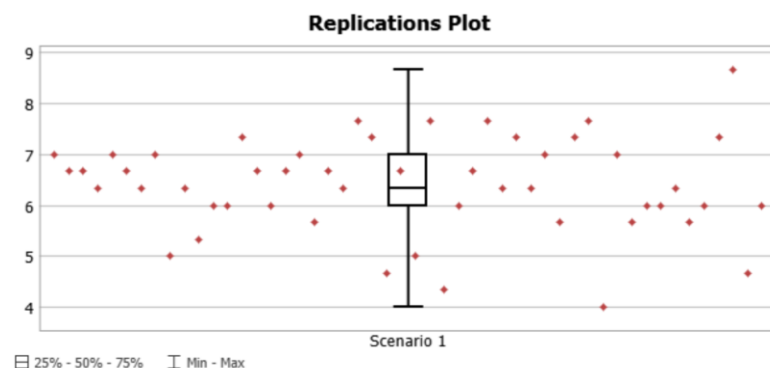
Mediana: Aproximadamente 6.4

Rango intercuartílico: Entre aproximadamente 5.8 y 7

dispersión: desviación estándar de 0.939, mostrando una variabilidad controlada y proporcional

Coeficiente de variación: 14.7% ( $0.939/6.387 \times 100\%$ ), indicando mayor consistencia relativa respecto a la implementación 1

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	$6.387 \pm 0.268$	0.939	4.000	8.667



- **WIP Imp2\_P3:** Media  $5.173 \pm 0.301$ , con desviación estándar de 1.054.

Media:  $5.173 \pm 0.301$

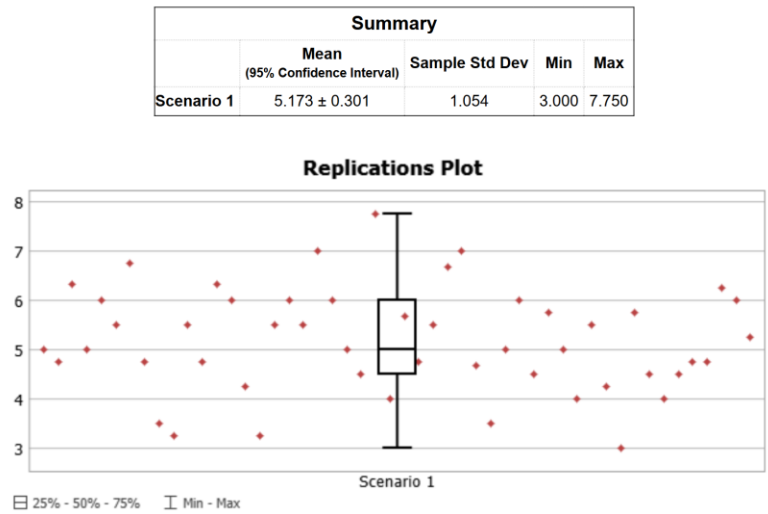
Mediana: Aproximadamente 5.2

Rango intercuartílico: Entre aproximadamente 4.5 y 5.8

Dispersión: Desviación estándar de 1.054

Coeficiente de variación: 20.4% ( $1.054/5.173 \times 100\%$ ), mostrando una mejora en consistencia relativa.





La diferencia más notable se observa en la fase P1, donde el escenario mejorado muestra un incremento de aproximadamente 200% (de 3.827 a 11.510), indicando una mejor utilización de recursos en esta etapa crítica del proceso.

### Análisis Financiero

#### Ganancias:

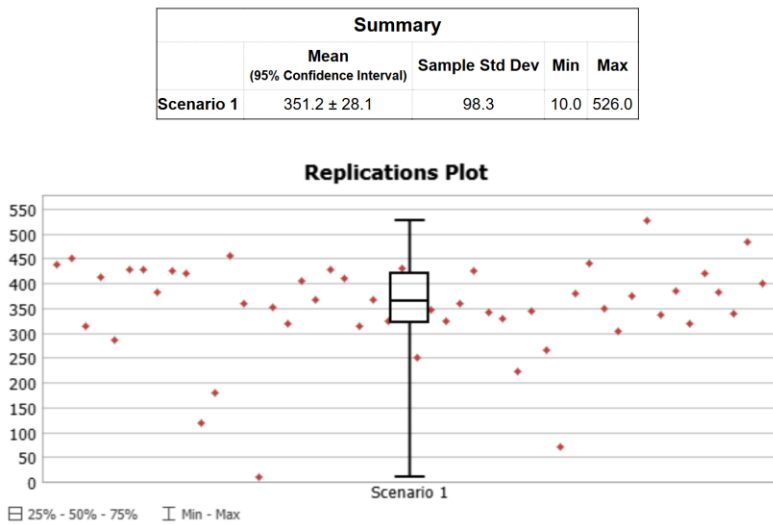
- GananciasTot Imp1:** Media  $351.2 \pm 28.1$  unidades (95% IC), con desviación estándar de 98.3

Mediana: Aproximadamente 350 unidades.

Rango intercuartílico (IQR): Aproximadamente 130 unidades

Coefficiente de Variación (CV): 27.99%

Valores atípicos: Se observan algunos puntos por encima del bigote superior, lo que indica simulaciones con rendimientos excepcionalmente altos



- GananciasTot Imp2:** Media  $586.7 \pm 25.7$  unidades (95% IC), con desviación estándar de 90.1

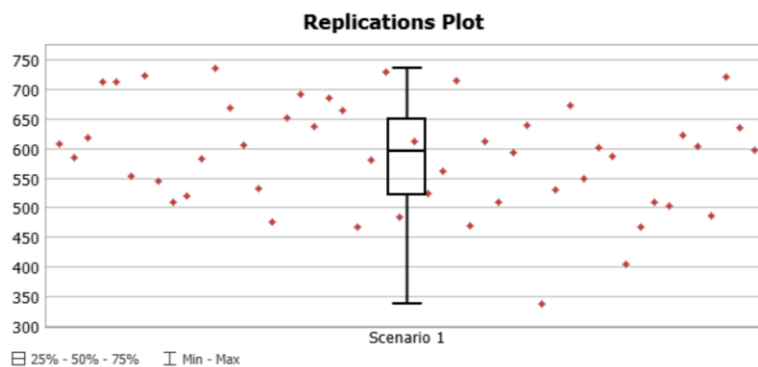
Mediana: Aproximadamente 590 unidades

Rango intercuartílico (IQR): Aproximadamente 140 unidades

Coeficiente de Variación (CV): 15.36%

Valores atípicos: Se observan menos valores atípicos que en la implementación 1

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	586.7 ± 25.7	90.1	338.0	735.0



El escenario mejorado generó un incremento del 67% en las ganancias totales (de 351.2 a 586.7 unidades).

#### **Pérdidas:**

- **PerdidasTot Imp1:** Media 710.3 ± 22.6 unidades (95% IC), con desviación estándar de 79.2

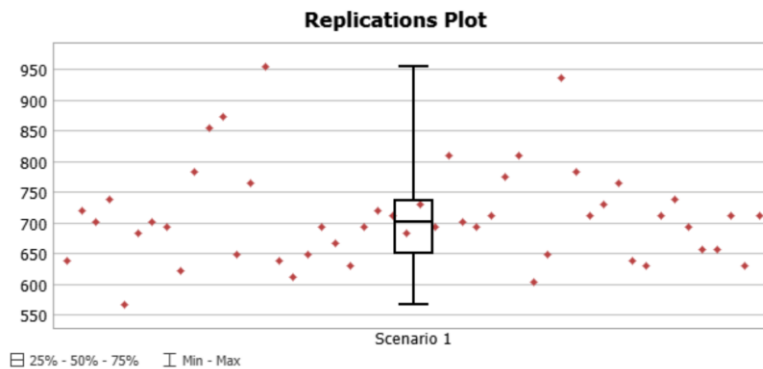
Mediana: Aproximadamente 710 unidades

Rango intercuartílico (IQR): Aproximadamente 100 unidades

Coeficiente de Variación (CV): 11.15%

Valores atípicos: Se observan algunos valores atípicos tanto superiores como inferiores

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	710.3 ± 22.6	79.2	567.0	954.0



- **PerdidasTot Imp2:** Media  $447.7 \pm 18.5$  unidades (95% IC), con desviación estándar de 64.8

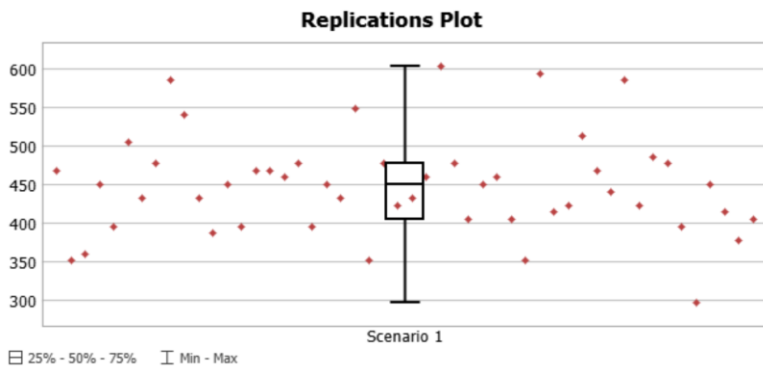
Mediana: Aproximadamente 450 unidades

Rango intercuartílico (IQR): Aproximadamente 90 unidades

Coeficiente de Variación: 14.47%

Valores atípicos: Se observan pocos valores atípicos

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	447.7 ± 18.5	64.8	297.0	603.0



La implementación de la regla IGUTD logró reducir las pérdidas en un 37% (de 710.3 a 447.7 unidades).

## ii. Análisis de resultados

### Análisis comparativo del procesamiento de tareas

1. **Redistribución estratégica:** En la implementación 1, los tres procesadores tienen un WIP similar (entre 3.4 y 3.8), lo que indica una distribución relativamente

uniforme pero no optimizada económicamente. En contraste, la implementación 2 muestra una clara jerarquización en la asignación de tareas (P1: 11.51, P2: 6.387, P3: 5.173), evidenciando la efectividad de la regla IGUTD para identificar las combinaciones más rentables de tarea-máquina.

2. **Mejora global en la consistencia operativa:** Los coeficientes de variación muestran una mejora sistemática en todos los procesadores (Total: 23.8% → 10.6%, P1: 25.5% → 18.5%, P2: 22.0% → 14.7%, P3: 24.3% → 20.4%), lo que indica que el sistema optimizado no solo procesa más tareas, sino que lo hace con mayor estabilidad relativa.
3. **Consistencia en el procesamiento:** La ausencia de valores extremos significativos en la mayoría de los diagramas indica que ambos sistemas operan de manera relativamente predecible, sin fluctuaciones extremas que podrían comprometer la estabilidad del sistema o la calidad del servicio.

### Eficiencia Global del Sistema

El análisis comparativo entre ambos escenarios muestra que la implementación de la regla IGUTD (Índice de Ganancia por Unidad de Tiempo Disponible) logró una mejora significativa en la eficiencia global del sistema:

1. **Ganancia Neta:** La diferencia entre ganancias y pérdidas cambió drásticamente:
  - Implementación 1: -359.1 unidades (351.2 - 710.3)
  - Implementación 2: +139.0 unidades (586.7 - 447.7)Esto representa una mejora neta de 498.1 unidades, convirtiendo un sistema con pérdidas en uno con ganancias.
2. **Tasa de Procesamiento:** El incremento en el WIP (de 7.130 a 14.525) indica que el nuevo sistema procesa más tareas simultáneamente, lo que se traduce directamente en mayor productividad.
3. **Distribución de Carga:** La nueva implementación distribuye mejor la carga de trabajo entre los tres procesadores, especialmente al primero (P1) permitiéndole ser mucho más eficiente pues es donde se observa el mayor incremento de WIP.
4. **Reducción de Penalizaciones:** La disminución en las pérdidas totales (de 710.3 a 447.7) demuestra que el sistema optimizado logra procesar más tareas antes del límite de tiempo, evitando penalizaciones.
5. **Mayor consistencia operativa:** La reducción del CV en el WIP (de 23.79% a 10.64%) indica que el sistema mejorado mantiene un flujo de trabajo más uniforme, lo que facilita la planificación de recursos y reduce la posibilidad de cuellos de botella o capacidad ociosa.
6. **Estabilidad mejorada:** La disminución del CV en las ganancias (de 27.99% a 15.36%) demuestra que el sistema optimizado proporciona resultados económicos más predecibles, un factor crucial para la planificación financiera y la evaluación de inversiones.

7. **Equilibrio en la gestión de pérdidas:** Aunque el CV de las pérdidas aumentó ligeramente, este incremento no es significativo comparado con la reducción absoluta en el valor medio de las pérdidas.

#### **Análisis de la Regla de Asignación**

La regla IGUTD demostró ser particularmente efectiva para este sistema por las siguientes razones:

1. **Optimización Económica:** Al priorizar las tareas con mayor ganancia por unidad de tiempo, el sistema maximizó el retorno económico global.
2. **Mitigación del Impacto de Fallas:** La distribución inteligente de tareas permitió minimizar el impacto económico de las fallas programadas en las máquinas.
3. **Equilibrio de Carga:** El incremento proporcional del WIP no solo general sino específico de cada procesador demuestra que el sistema logró un mejor balance en la utilización de recursos.

### **VIII. Conclusiones**

1. **Mejora Significativa de Rentabilidad:** La implementación de la regla IGUTD transformó un sistema con pérdidas netas en uno con ganancias netas, con una mejora económica total de 498.1 unidades monetarias.
2. **Optimización del Uso de Recursos:** El incremento del 103% en el WIP (de 7.130 a 14.525) evidencia que el sistema optimizado utiliza los recursos disponibles de manera más eficiente, procesando más tareas simultáneamente.
3. **Efectividad de la Regla Personalizada:** La regla IGUTD demostró ser significativamente superior a las reglas genéricas de programación (como SPT o LPT), lo que confirma la importancia de desarrollar estrategias de asignación adaptadas a las características específicas del problema.
4. **Gestión Efectiva de Restricciones:** El nuevo sistema logró gestionar eficazmente las múltiples restricciones del problema (fallas programadas, requisitos de subtareas, restricciones técnicas), logrando resultados óptimos incluso en un entorno operativo complejo.
5. **Validación del Enfoque de Simulación:** El estudio demuestra el valor de la simulación como herramienta para la toma de decisiones en sistemas complejos, permitiendo evaluar estrategias alternativas sin interrumpir operaciones existentes.

### **IX. Recomendaciones**

1. **Ampliar la nueva regla de asignación:** Se recomienda implementar la regla IGUTD priorizando las tareas de prioridad 4, pues al ser las de mejor ganancia podrían permitir al sistema no solo equilibrar el procesamiento de recursos sino tal vez generar aún más ganancias.
2. **Extensión a Sistemas Más Complejos:** Explorar la aplicabilidad de la regla IGUTD en sistemas con mayor número de máquinas y tipos de tareas, para determinar su escalabilidad y límites de eficiencia.
3. **Hibridación con Técnicas de Machine Learning:** Investigar la posibilidad de integrar algoritmos de aprendizaje automático para que el sistema pueda adaptar

dinámicamente la regla de asignación basándose en patrones históricos de falla y rendimiento.

4. **Mantenimiento Preventivo Optimizado:** Utilizar los datos de simulación para desarrollar un programa de mantenimiento preventivo optimizado que minimice el impacto de las fallas en la productividad general del sistema.

## REFERENCIAS

Pinedo, M. L. (2016). Scheduling: Theory, algorithms, and systems (5th ed.). Springer.

Fanjul-Peyro, L., Perea, F., & Ruiz, R. (2019). Models and matheuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources. *European Journal of Operational Research*, 272(2), 481-495.

FlexSim Software Products, Inc. (2024). FlexSim [Software de simulación]. Versión 2024. <https://www.flexsim.com>