

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS REGLAS DE DESPACHO EN EL  
PROBLEMA DE SCHEDULING EN LOS SISTEMAS DE ENSAMBLE DE  
ESTRUCTURA DE MATRIZ.**

**PRESENTADO POR:  
PAULA ANDREA RINCÓN MONTOYA  
VANESSA PULIDO LONDOÑO**



**Universidad  
Tecnológica  
de Pereira**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE CIENCIAS EMPRESARIALES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PEREIRA, RISARALDA  
2023**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS REGLAS DE DESPACHO EN EL  
PROBLEMA DE SCHEDULING EN LOS SISTEMAS DE ENSAMBLE DE  
ESTRUCTURA DE MATRIZ.**

**PRESENTADO POR:  
PAULA ANDREA RINCÓN MONTOYA  
VANESSA PULIDO LONDOÑO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERAS  
INDUSTRIALES**

**DIRECTOR  
JOHN ANDRÉS MUÑOZ GUEVARA  
INGENIERO INDUSTRIAL  
M.SC. SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRODUCCIÓN**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE CIENCIAS EMPRESARIALES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PEREIRA, RISARALDA**

**2023**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director \_\_\_\_\_

Firma del Jurado \_\_\_\_\_

Firma del Jurado Pereira, julio de 2023

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este trabajo de investigación, principalmente a nuestra familia quienes con amor, dedicación y esfuerzo nos apoyaron y creyeron siempre en nosotras. Además, recalcamos mutuamente el esfuerzo, la paciencia, compañerismo, disciplina y amor que le aportamos a este trabajo, además de reforzar una amistad que se consolidó durante la carrera y que continuará cuando seamos colegas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos en primer lugar a Dios que por las oraciones nuestras madres nos iluminó y nos ayudó a culminar exitosamente esta investigación y esta carrera profesional como ingenieras industriales.

A nuestras familias por su apoyo, comprensión y por no dejarnos desistir en los momentos difíciles que se nos presentaron a lo largo de este camino.

A nuestros amigos y parejas, quienes tuvieron la paciencia y el amor para apoyarnos durante los momentos de frustración y de felicidad.

A nuestro director John Andrés, por guiarnos hacia un camino de excelentes resultados y brindarnos acompañamiento durante todo el proceso investigativo y formativo, además de ser quien nos motivó para encaminar nuestra carrera hacia el ámbito productivo.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.1. Pregunta de Investigación.....	14
1.2. Sistematización del Problema.....	14
1.3. Hipótesis .....	15
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo General.....	15
2.2. Objetivos Específicos .....	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. MARCO DE REFERENCIA .....	16
4.1 Antecedentes de la Investigación .....	16
4.2 Estado del Arte .....	17
4.2.1 Bases de Datos .....	18
4.2.2 Resultados de la Búsqueda.....	19
4.2.3 Temas de Investigación .....	20
4.3 Marco Teórico .....	21
4.3.1 Sistemas de Ensamble de Estructura de Matriz MSAS. ....	21
4.3.1.1 <i>Principios de los MSAS</i> .....	23
4.3.2 Problema de Scheduling .....	24
4.3.2.1 <i>Tipos de talleres</i> .....	24
4.3.2.2 <i>Tipos de problemas de scheduling</i> .....	26
4.3.2.3 <i>Características del problema de Scheduling</i> .....	27
4.3.2.4 <i>Enfoques de Solución para el problema de Scheduling</i> .....	28
4.3.2.5 <i>Indicadores de desempeño para un problema de scheduling</i> .....	28
4.3.2.6 <i>Reglas de despacho</i> .....	29
4.4 Marco Conceptual.....	32
4.5 Marco Situacional.....	35
5 METODOLOGÍA .....	36

5.1	Tipo de Estudio.....	36
5.2	Tratamiento de la Información .....	36
5.3	Diseño Metodológico .....	36
6	CRONOGRAMA .....	36
7	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO PARA EL PROBLEMA DE SCHEDULING EN LOS MSAS.....	38
7.1	Características Funcionales de los MSAS.....	38
7.2	Parámetros del Problema de Scheduling en los MSAS.....	40
7.2.1	Definición de la Medida de Desempeño.....	40
7.2.2	Determinación de las Restricciones del Problema.....	41
7.2.3	Consideraciones Previas .....	42
7.3	Diseño Caso de Estudio para el Problema de Scheduling en los MSAS.....	42
7.4	Evaluación del Desempeño de las Reglas de Despacho para el Problema de Scheduling en los MSAS.....	45
7.4.1	Primera Fase .....	45
7.4.2	Segunda Fase .....	51
7.4.3	Tercera Fase.....	54
7.4.3.1	<i>Tiempos de Desplazamiento entre Estaciones</i> .....	54
7.4.3.2	<i>Tiempos de Setup entre Estaciones</i> .....	61
8	CONCLUSIONES .....	68
9	RECOMENDACIONES .....	69
	REFERENCIAS .....	70

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios para la búsqueda de literatura.....	18
Tabla 2. Palabras clave para búsqueda en bases de datos .....	18
Tabla 3. Cantidad de artículos por fuente de publicación .....	19
Tabla 4. Artículos por rango de años.....	20
Tabla 5. Cantidad de artículos por tema de investigación.....	21
Tabla 6. Clasificación de los problemas de scheduling.....	26
Tabla 7. Diseño metodológico.....	37
Tabla 8. Cronograma .....	37
Tabla 9. Número de operaciones, tiempo de procesamiento y herramienta asignada para cada trabajo del ejercicio 1 .....	43
Tabla 10. Resultado de las sumatorias de cada trabajo .....	45
Tabla 11. Resultados del porcentaje de utilización .....	46
Tabla 12. Guía para asignación de operaciones .....	48
Tabla 13. Actualización de la guía para asignación de operaciones .....	49
Tabla 14. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados .....	50
Tabla 15. Número de operaciones, tiempo de ensamble y herramienta asignada para cada trabajo del ejercicio de la fase 2 .....	52
Tabla 16. Precedencias de las operaciones para los trabajos.....	52
Tabla 17. Tabla guía para la asignación de operaciones en el ejercicio 1 de la fase 2.....	53
Tabla 18. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados con Simultaneidad .....	54
Tabla 19. Número de operaciones, tiempo de ensamble y herramienta asignada para cada trabajo del ejercicio de desplazamiento de la fase 3.....	55
Tabla 20. Resultados del cálculo de la sumatoria para cada asignación de operaciones en el ejercicio con desplazamiento.....	56
Tabla 21. Guía para la asignación de operaciones para el ejercicio con desplazamiento ....	57
Tabla 22. Resultados de los cálculos de los coeficientes para la asignación de operaciones del ejercicio con desplazamiento.....	58
Tabla 23. Resultados del cálculo de los máximos de estación para cada asignación de operaciones en el ejercicio con desplazamiento .....	60
Tabla 24. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados con desplazamiento.....	61
Tabla 25. Tiempos de setup establecidos para el cambio de una herramienta a otra .....	62
Tabla 26. Resultados de los cálculos de la sumatoria para el ejercicio con setup.....	63
Tabla 27. Guía para la asignación de operaciones para el ejercicio con setup.....	63
Tabla 28. Resultados de los cálculos de los coeficientes para el ejercicio con setup.....	65

Tabla 29. Resultados del cálculo de los máximos de estación para cada asignación de operaciones con setup.....	67
Tabla 30. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados con setup.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre la variedad de producto y volumen de producción a lo largo de los años.....	16
Figura 2. Sistema de Ensamble de Estructura de Matriz.....	22
Figura 3. Enfoques de solución para los problemas de scheduling.....	28
Figura 4. Ilustración grafica de los principios de un MSAS.....	39
Figura 5. Gráfico de Precedencias.....	41
Figura 6. Diagrama operación tiempo.....	41
Figura 7. Disposición de estaciones de trabajo para el ejercicio.....	44
Figura 8. Diagrama de Gantt.....	44
Figura 9. Diagramas de Gantt con los resultados al aplicar SPT y LPT.....	46
Figura 10. Resultados del ejercicio al asignar por operaciones con las reglas de despacho SPT y LPT.....	47
Figura 11. Diagrama de Gantt para el ejercicio resuelto con la heurística LR-O para MSAS Simple.....	49
Figura 12. Comparación de los makespan.....	51
Figura 13. Gráfico de precedencias para el trabajo 1 con operaciones simultaneas.....	51
Figura 14. Diagrama de Gantt para el ejercicio 1 de la fase 2.....	54
Figura 15. Tiempos de desplazamiento entre estaciones.....	55
Figura 16. Diagrama de Gantt para el ejercicio de desplazamiento resuelto con sumatoria de la fase 3.....	57
Figura 17. Diagrama de Gantt para el ejercicio de desplazamiento resuelto con coeficiente de la fase 3.....	59
Figura 18. Diagrama de Gantt para el ejercicio de desplazamiento resuelto con el máximo de la fase 3.....	60
Figura 19. Diagrama de Gantt para el ejercicio de setup resuelto con la sumatoria.....	64
Figura 20. Diagrama de Gantt para el ejercicio con setup resuelto con coeficientes.....	65
Figura 21. Diagrama de Gantt para el ejercicio con setup resuelto con máximo.....	66

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo para la utilización de las estaciones de trabajo.....	40
Ecuación 2. Cálculo para el Makespan óptimo .....	40
Ecuación 3. Sumatoria para la elección de estación.....	56
Ecuación 4. Coeficiente para la asignación de estaciones.....	58
Ecuación 5. Máximo para la asignación de estaciones con desplazamiento .....	59
Ecuación 6. Mínimo para elección de estación con desplazamiento.....	59
Ecuación 7. Sumatoria para la asignación de estaciones con tiempos de setup .....	62
Ecuación 8. Coeficiente para la asignación de estaciones.....	64
Ecuación 9. Máximo para la asignación de estaciones con tiempos de setup .....	66
Ecuación 10. Mínimo para elección de estación con tiempos de setup.....	66

## RESUMEN

La siguiente investigación se compone de tres fases principales en las cuales se estudia un Sistema de Ensamble de Estructura de Matriz bajo diversas características, en las cuales se pretende evaluar el comportamiento de dicho sistema al aplicar diferentes reglas de despacho y métodos de solución al problema de scheduling. Inicialmente, se plantea la problemática y se realiza una revisión de la literatura existente para así construir la metodología y plantear las diferentes fases. En la fase número uno, se evalúa el desempeño de un sistema bajo condiciones ideales; en la fase número dos, se añade al sistema una condición de simultaneidad en las operaciones; y finalmente, en la fase número tres se adicionan las características de tiempos de desplazamiento y setup.

***PALABRAS CLAVE:*** *Sistemas de Ensamble de Estructura de Matriz, Problema de Scheduling, Reglas de despacho, Heurística, Medidas de desempeño.*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio frecuente en las preferencias y necesidades del mercado es inevitable, ya que se ven influenciadas por las nuevas tecnologías, tendencias y la sociedad en general, estos cambios apuntan a la personalización en masa y a la respuesta rápida para atender estos requerimientos, por lo tanto, crear soluciones flexibles e innovadoras en los entornos productivos se convierte en una prioridad para las empresas, ya que así pueden garantizar su permanencia a través del tiempo, además de captar nuevos clientes y obtener rentabilidad. Los Sistemas de Ensamble de Estructura de Matriz (MAS) es un nuevo método que propone una solución efectiva a estas necesidades, generando flexibilidad en el sistema a través de la conformación de estaciones de trabajo, ubicadas matricialmente y preparadas para la realización de diferentes operaciones, brindando una amplia gama de opciones para la asignación de estas, teniendo en cuenta variables como distancia entre estaciones, tiempos de espera, tiempos de alistamiento y tiempo de procesamiento. Sin embargo, esta metodología es muy reciente y no presenta antecedentes de investigación, por lo tanto, el problema de scheduling se convierte en una oportunidad de estudio, el cual es el tema principal de este trabajo, abordado por medio de la generación de un caso de estudio en el cual se evaluarán diferentes reglas de despacho para observar su desempeño, por medio de tres diferentes fases, donde cada una se enfoca en una característica inherente al sistema, pero no fueron evaluadas al mismo tiempo, para observar mejor el comportamiento de cada una de ellas.

Adicionalmente, se busca que este trabajo sea una base para futuras investigaciones relacionados con la mejora de este tipo de sistemas o de sistemas de ensamble similares que vayan a la par con las necesidades que presenta la sociedad, además de motivar a estudiantes de Ingeniería Industrial y carreras afines a investigar más sobre avances en temas relacionados a la producción.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El objetivo de toda empresa es satisfacer las necesidades de su cliente, las cuales cambian según el entorno en el que se encuentran. Hoy en día la personalización es considerada como una tendencia en crecimiento y con gran potencial, así lo confirma un estudio de Accenture una empresa multinacional de consultoría estratégica, servicios tecnológicos y externalización, donde entrevistó a 3.000 consumidores del retail, obteniendo que el 63% prefiere recibir productos y servicios personalizados (Marketing directo, 2019). Lo anterior, sumado con el consumismo actual, pone a las empresas en el gran reto de fabricar productos altamente personalizados en grandes volúmenes al menor costo y en el menor tiempo posible. Debido a esto, las empresas deben buscar la manera más eficiente de realizar los procesos dentro de la planta, por lo cual, surgen nuevos sistemas de manufactura que permiten combinar los altos niveles de variedad y volumen, estos son los llamados Sistemas de Ensamble de Estructura de Matriz o (MSAS *Matrix-Structure Assembly Systems*) los cuales responden a las demandas del mercado permitiendo producir una amplia gama de productos en diferentes volúmenes de salida (Schönemann et al., 2015).

Este nuevo sistema de ensamble requiere de nuevas estrategias para gestionar los tiempos de producción y la asignación de tareas a las estaciones de trabajo, esta selección, así como lo plantea (Schönemann et al., 2015) puede basarse en objetivos de optimización predefinidos e individuales, como tiempo/distancia de transporte corto, tiempo de entrega corto o alta utilización total del sistema. Esto conduce a un comportamiento dinámico y estocástico del sistema que aumenta la complejidad de las tareas de planificación (pp. 1-2).

Por lo tanto, se hace necesario la investigación sobre el desempeño de las reglas de despacho a la hora de darle solución al problema de scheduling en este tipo de sistemas y así poder brindarles a las empresas nuevas perspectivas para los problemas actuales que se presentan en el entorno productivo y puedan responder a las exigencias del mercado.

### **1.1. Pregunta de Investigación**

¿Cómo es el desempeño de las reglas de despacho para el problema de scheduling en los MSAS?

### **1.2. Sistematización del Problema**

- ¿Qué es un MSAS?
- ¿Cuáles son las principales características del problema de scheduling de los MSAS?
- ¿Cuáles son las reglas de despacho que se pueden aplicar para solucionar el problema de scheduling en los MSAS?
- ¿Cómo se desempeñan las reglas de despacho para programar trabajo en los MSAS?

### **1.3. Hipótesis**

Las reglas de despacho del problema de scheduling tienen un buen desempeño cuando se aplican en un MSAS.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Evaluar el desempeño de las reglas de despacho para el problema de scheduling en los MSAS.

### **2.2. Objetivos Específicos**

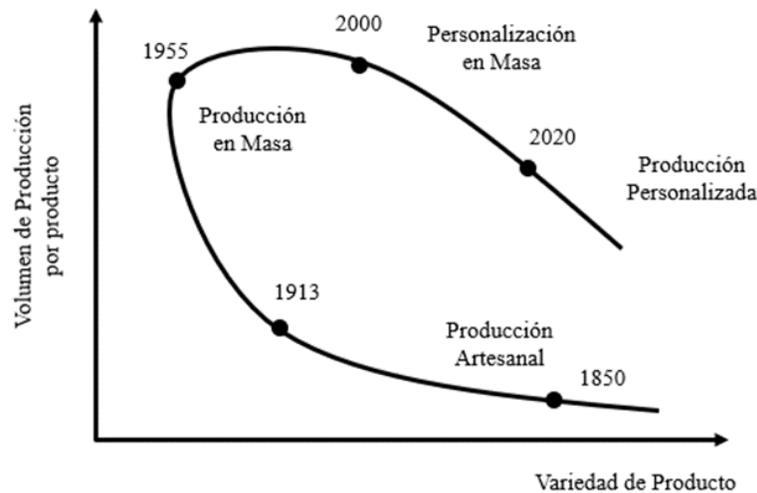
- Describir las características funcionales de los MSAS.
- Definir los parámetros del problema de scheduling en los MSAS
- Diseñar un caso de estudio hipotético que permita la aplicación de diversas reglas de despacho en los MSAS.
- Analizar el desempeño de las reglas de despacho para el problema de scheduling en los MSAS.

## **3. JUSTIFICACIÓN**

La investigación pretende mostrar el comportamiento de las diferentes reglas de despacho que existen para la solución de un problema de scheduling aplicado a un MSAS, con el fin de determinar cuál de ellas se desempeña mejor dadas las condiciones del entorno productivo, ya que la creciente necesidad de un sistema como este debido a las tendencias actuales del mercado deja ver la ausencia de bibliografía respecto al tema, a pesar de que surgió hace varios años. Las necesidades que fueron surgiendo a lo largo de los años y los sistemas que respondieron a estas se pueden ver en la figura 1.

Los diferentes sistemas que surgieron dieron paso a nuevos problemas de programación de la producción, lo cuales han sido ampliamente investigados en muchos sistemas de fabricación concentrándose principalmente en la clase de sistemas llamados líneas de flujo (Flow shop), en donde los componentes se mueven linealmente a través del sistema (Zhang et al., 2005), pero no se han abordado investigaciones respecto a los problemas que presentan nuevos sistemas como el MSAS, donde las piezas se mueven de acuerdo con la necesidad de maquinaria, lo que dificulta que las empresas se actualicen sobre estos nuevos temas.

Figura 1. Relación entre la variedad de producto y volumen de producción a lo largo de los años.



Fuente: (Schönemann et al., 2015)

La herramienta por utilizar será la revisión de la literatura existente sobre las características del MSAS y las reglas de despacho, a partir de esto se plantean las características necesarias para la solución del problema y se evaluarán los desempeños obtenidos de las distintas reglas de despacho aplicadas. Con la realización de la investigación se busca aportar bases para la solución del problema de scheduling y servir como referencia para estudios e implementaciones futuras.

## 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 Antecedentes de la Investigación

La evolución de las tendencias de consumo hace que surjan nuevos sistemas de manufactura y ensamble que permiten a las empresas responder de manera eficiente a dichos cambios, estos comenzaron en la década de los 90's debido al auge de la globalización, lo cual causó la rápida variación de la demanda de productos e introducción de nuevos productos, por esto las empresas manufactureras pensaron en un nuevo tipo de sistema de fabricación para hacer frente a cambios impredecibles en el mercado (Koren et al., 2018). Durante los últimos años, los Sistemas de Manufactura Flexible (FMS) han sido la herramienta más usada para enfrentar los distintos retos que presenta el entorno, brindando flexibilidad a la hora de producir o introducir nuevas referencias (Schönemann et al., 2015). Estos sistemas flexibles surgen gracias a la aparición de máquinas de control numérico por ordenador (CNC) (Koren et al., 2018) y posteriormente se dividieron en dos categorías diferentes, los FMS y los Sistemas de Ensamble Flexible (FAS). La diferencia entre estos es que los FMS se concentran

principalmente en la elaboración de las piezas y los FAS son los encargados de ensamblar dichas piezas, además, el número de piezas que se pueden realizar en el FAS es mucho mayor que las que se pueden realizar en el FMS, debido a que el primero se pueden ensamblar varias piezas a la vez y su tiempo de procesamiento es menor (Gultekin et al., 2008). A pesar de que los FMS respondían a una parte de los nuevos retos, no lograban cumplir con todos los requisitos del mercado, lo que hizo necesario la aparición de otros sistemas como los Sistemas de Fabricación Reconfigurables (RMS), que están diseñados desde el principio para un cambio rápido en la estructura, así como en los componentes de hardware y software, para ajustar rápidamente la capacidad de producción y la funcionalidad dentro de una familia de piezas (GOLA & ŚWIĆ, 2012). Al igual que los FMS, los RMS no lograron cumplir con las variaciones presentes en el entorno, por lo cual surgen los Sistemas de Manufactura de Estructura de Matriz (MMS) que reúne las principales fortalezas de los sistemas anteriores y busca suplir las carencias de estos, al igual que los FMS se dividió en dos categorías diferentes, los MMS y los MSAS. Este último combina las características de las líneas de flujo y de los MMS, entre sus características se encuentran la escalabilidad y la reconfigurabilidad. La escalabilidad se puede lograr duplicando los recursos de cuello de botella a nivel de estación o equipo y la reconfigurabilidad se realiza por el diseño modular de las estaciones de montaje, así como los recursos asociados (Göppert et al., 2021).

Stricker et. al., 2021 explica que, aunque los MSAS proporcionan diferentes formas de reaccionar ante las perturbaciones, estos aumentan la complejidad de la programación exponencialmente, por lo cual se necesitan soluciones de alta calidad y eficiencia (Stricker et al., 2021) esto genera la necesidad de encontrar información sobre los problemas de scheduling para su aplicación, sin embargo, se puede observar una ausencia de teoría, por lo cual se justifica la importancia de su investigación así como lo expresa Hofmann et.al, (2022) los MSAS requieren un control de la producción mucho más complejo, por esta razón el problema de scheduling de este tipo de sistemas de ensamble se convierte en un tema de estudio relevante, debido a la complejidad de este (Hofmann et al., 2022). Dada la del problema de scheduling, se puede señalar que, la programación del ensamble de las piezas es el punto de partida para lograr la eficiencia en el proceso, el cumplimiento de tiempos de entrega y una producción a bajo costo, por lo cual Echsler (2020) expresa que el principal desafío es producir económicamente una mezcla fluctuante de variantes con cantidades totales fluctuantes. Los MSAS destinados a una producción en tamaño de lote uno desacoplada de un takt time son, por lo tanto, un objeto de investigación actual. Además del diseño de estos sistemas, la planificación y el control de la producción desempeñan un papel cada vez más importante, ya que los flujos de materiales en dichos sistemas de producción son muy complejos (Echsler Minguillon, 2020).

## **4.2 Estado del Arte**

El objetivo de esta revisión del estado del arte de los MSAS es conocer su definición e identificar las características y métodos de solución para el problema de scheduling en los mismos, para esto, la búsqueda de literatura se basó en los criterios mostrados en la tabla 1, con el propósito de obtener hallazgos significativos.

*Tabla 1. Criterios para la búsqueda de literatura.*

<b>Criterio</b>	<b>Justificación</b>
El título, resumen y palabras claves, deben estar relacionados con los MSAS y el problema de scheduling.	Estos aspectos dentro un texto brindan información sobre el tema abordado en todo el documento por lo cual permiten filtrar la información.
Construcción de la metodología y/o desarrollo del documento.	En los diferentes puntos de estos aspectos se puede encontrar información relevante para la investigación.
Ejercicios de aplicación.	Permite obtener información y/o técnicas para la solución del problema de scheduling en el mismo sistema y en sistemas similares.
Alcances obtenidos en resultados y conclusiones.	Las conclusiones muestran la resolución de los objetivos y resume los hallazgos encontrados.
Publicación en bases de datos confiables.	Permite tener confianza en la veracidad de la información hallada.

#### **4.2.1 Bases de Datos**

Para esta investigación se usaron diferentes bases de datos mayormente enfocadas en áreas de ingeniería e investigación como: Science direct, Scopus, SpringerLink, Taylor & Francis, Web of science, Sage Journal, IEEE Xplore, Google Académico y bases de datos universitarias, con el fin de no limitar los resultados obtenidos. Se establecieron las palabras clave que se pueden ver en la tabla 2, como criterios de búsqueda en dichas bases para filtrar la información necesaria. La investigación empezó a llevarse a cabo en septiembre de 2022.

*Tabla 2. Palabras clave para búsqueda en bases de datos*

“Matrix production system”
“Matrix assembly system”
“Assembly system of matrix structure”
“Matrix assembly system taxonomy”
“Matrix assembly system scheduling problem”
“Scheduling MSAS”

#### 4.2.2 Resultados de la Búsqueda

Al realizar esta investigación se obtuvieron 28 artículos que se encuentran en revistas, libros y/o son el resultado de investigaciones universitarias que representan el 29% de la literatura utilizada, en la tabla 3 se detalla la cantidad de artículos pertenecientes a las fuentes halladas en la investigación.

*Tabla 3. Cantidad de artículos por fuente de publicación*

<b>Revista/ Libro/ Base de datos</b>	<b>Cantidad de artículos</b>
Bases de datos Universitarias	8
International Journal of Production Research	2
Procedia CIRP	2
Springer International Publishing	2
Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application	1
Argos	1
Innovations in Management and Production Engineering	1
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	1
Marketing directo	1
Production Engineering - Research and Development	1
Vulkan Verlag	1
McGraw-Hill	1
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1
Contribuciones científicas y tecnológicas	1
Planning manufacturing	1
Frontiers of Mechanical Engineering	1
CIRP Annals	1
Journal of Manufacturing Systems	1
<b>Total</b>	<b>28</b>

De los artículos encontrados 10 de ellos fueron publicados entre los años 2019 y 2022, representando el mayor peso porcentual con un 35%, del total de artículos por rango de años hallados, además cabe destacar que, para el mismo rango de años, 4 de estos artículos pertenecen a bases datos universitarias. El total de artículos por años para cada fuente de publicación es detalla en la tabla 4.

Tabla 4. Artículos por rango de años

<b>Revista/ Libro/ Base de datos</b>	<b>1998- 2002</b>	<b>2003- 2006</b>	<b>2007- 2010</b>	<b>2011- 2014</b>	<b>2015- 2018</b>	<b>2019- 2022</b>	<b>Total</b>
Bases de datos Universitarias		3			1	4	8
International Journal of Production Research	1		1				2
Procedia CIRP				1		1	2
Springer International Publishing					2		2
Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application						1	1
Argos					1		1
Innovations in Management and Production Engineering				1			1
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing		1					1
Marketing directo						1	1
Production Engineering - Research and Development						1	1
Vulkan Verlag					1		1
McGraw-Hill			1				1
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1						1
Contribuciones científicas y tecnológicas			1				1
Planning manufacturing						1	1
Frontiers of Mechanical Engineering					1		1
CIRP Annals						1	1
Journal of Manufacturing Systems					1		1
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>28</b>

#### 4.2.3 Temas de Investigación

Para la elaboración de este documento se hallaron 28 artículos, en los cuales se buscaba información principalmente sobre: MSAS, sus características, ejercicios aplicados, scheduling en sistemas de ensamble, sus características, enfoques de solución, reglas de

despacho y finalmente asignación de tareas en MSAS, todo esto con el fin de tener un panorama general que permitiera tener en cuenta todos los aspectos pertinentes para la solución del problema de scheduling en los MSAS. La tabla 5 muestra la cantidad de artículos hallados por cada tema de investigación.

*Tabla 5. Cantidad de artículos por tema de investigación*

<b>Tema de investigación</b>	<b>Cantidad de artículos</b>
Antecedentes del MSAS	6
MSAS	7
Problemas de Scheduling	11
Aplicaciones	4
<b>Total</b>	<b>28</b>

Dentro de los artículos más relevantes para la investigación se encuentran “Agile Hybrid Assembly Systems: Bridging the Gap Between Line and Matrix Configurations” desarrollado por Göppert, et al. en el año 2021, donde se explican las características relevantes de los sistemas de ensamble, “Matrix Structures for High Volumes and Flexibility in Production Systems” escrito por Greschke et al. en el año 2014, donde habla sobre la definición de los MSAS y sus características, y por ultimo “Simulation of matrix-structured manufacturing systems”, la cual es una investigación realizada por Schönemann et al. en el año 2015, donde se explican los principios, funcionamiento y disposición de las estaciones de trabajo en los MSAS.

### **4.3 Marco Teórico**

#### **4.3.1 Sistemas de Ensamble de Estructura de Matriz MSAS.**

Los sistemas de ensamble están compuestos por un conjunto finito de estaciones de trabajo y de tareas, que tienen asignado un tiempo de proceso, y un conjunto de relaciones de precedencias, que especifican el orden de proceso permitido de las tareas (Capacho & Pastor, s. f.). Los sistemas de ensamble en una planta productiva son los encargados de unir las piezas que fabrica el sistema de manufactura en dicha planta, además se ocupa de la asignación de órdenes y operaciones a las estaciones de ensamble, teniendo en cuenta la disponibilidad actual de recursos o las interrupciones (Schukat et al., 2022).

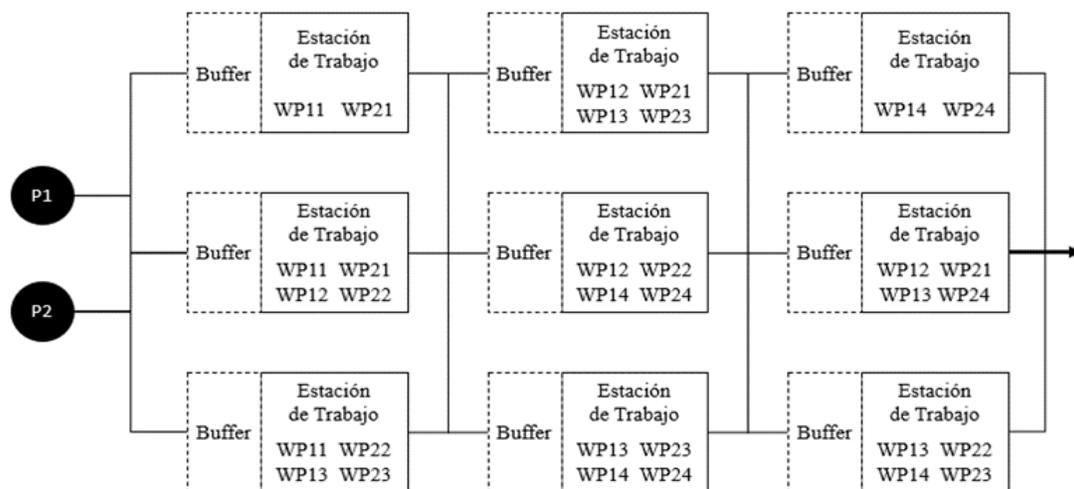
Los MSAS es una nueva distribución para el proceso de ensamble capaces de reaccionar a las cambiantes demandas del mercado, producir una amplia gama de productos diferentes, permitir la introducción de nuevos productos al conjunto actual de productos (Schönemann et al., 2015) y tienen como propósito dividir el sistema en sistemas más pequeños, formando

así subsistemas individuales (Greschke et al., 2014). Los subsistemas (estaciones de trabajo, por ejemplo) dentro de la Ley de los MSAS son autónomos y pueden ser operados en ciclos variables sin causar daños o interrupciones a otros subsistemas. Al definir cada estación de trabajo como subsistema, la fusión de todas las estaciones de trabajo a un sistema integral garantiza una alta utilización debido a su reconfigurabilidad dinámica y flexibilidad del proceso (Greschke et al., 2014). Para esto se deben modificar las condiciones técnicas del puesto de trabajo de tal manera que puedan realizar dos o más operaciones de trabajo (Greschke et al., 2014). Esto puede lograrse eliminando un tiempo de ciclo constante y permitiendo un enrutamiento flexible del producto (Schönemann et al., 2015).

El objetivo de los MSAS es diseñar un sistema de ensamble más flexible en comparación con el ensamble en línea, manteniendo la misma eficiencia y rentabilidad. La flexibilidad se logra mediante estaciones de ensamble desacopladas y estaciones de ensamble dispuestas en una estructura de matriz. Esto permite un ajuste dinámico de las secuencias del proceso de ensamble dentro de las restricciones del gráfico de precedencia de ensamble según sea necesario durante la operación (Göppert et al., 2021). Las funciones más importantes de este sistema son la liberación y supervisión de pedidos, también la programación y asignación tanto de trabajos como trabajadores, por último, el suministro de materiales y gestión de imprevistos (Schukat et al., 2022).

En los MSAS, a cada estación de trabajo se le asignan ciertos paquetes de trabajo y así estos pueden decidir hacia dónde ir, tomando en cuenta factores como máquinas ocupadas, tiempos de procesamiento y de transporte, entre otras (Schönemann et al., 2015), como se observa en la figura 2.

*Figura 2. Sistema de Ensamble de Estructura de Matriz*



Fuente: (Schönemann et al., 2015)

#### 4.3.1.1 Principios de los MSAS.

Para lograr el propósito del sistema, se plantean los siguientes principios que contribuyen a una correcta aplicación de este:

- **Tiempo de ciclo individual:** un tiempo de ciclo es el tiempo que tarda una unidad de producto en ser procesada, en MSAS, las estaciones de trabajo pueden tener un tiempo de ciclo individual que también puede ser diferente para cada tipo de producto (Schönemann et al., 2015), esto debido a que un tiempo de ciclo constante podría desequilibrar las estaciones de trabajo generando bloqueos en el sistema. (Schönemann et al., 2015)
- **Redundancia de los paquetes de trabajo (WP) ofrecidos:** con el fin de evitar el bloqueo de estaciones de trabajo, así como grandes capacidades de almacenamiento, el MSAS puede proporcionar más de una estación de trabajo para el procesamiento de un paquete de trabajo específico (WP). Por lo tanto, los productos pueden elegir entre las estaciones de trabajo disponibles y adecuadas. (Schönemann et al., 2015)
- **Múltiples paquetes de trabajo por estación:** las estaciones de trabajo se pueden configurar para realizar múltiples paquetes de trabajo proporcionando las funciones y tecnologías necesarias (Schönemann et al., 2015). Esto permite que una cantidad determinada de WP pueda trabajar en cada estación de trabajo disminuyendo el número de estaciones en la planta, siempre y cuando se cuente con las herramientas y tecnologías necesarias para dicha combinación. (Schönemann et al., 2015)
- **Enrutamiento flexible del producto:** dado que hay varias estaciones de trabajo que ofrecen los mismos paquetes de trabajo, el enrutamiento de los productos no está predeterminado. Como resultado de esta variación en el enrutamiento, el tiempo de entrega de los productos no está predeterminado, sino que es el resultado de las decisiones sobre la elección de las estaciones de trabajo (Schönemann et al., 2015)
- **Utilización:** la utilización es un indicador de rendimiento importante, ya que determina fuertemente el rendimiento económico de un sistema de fabricación (Schönemann et al., 2015). El objetivo de una utilización general elevada significa que cada puesto de trabajo debe utilizarse lo mejor posible. La utilización será alta si los tiempos de espera y los períodos no productivos en todas las estaciones de trabajo son bajos (Schönemann et al., 2015).

### 4.3.2 Problema de Scheduling

El Scheduling es un proceso de toma de decisiones que se utiliza regularmente en muchas industrias de fabricación y servicios. Se ocupa de la asignación de recursos a tareas durante períodos de tiempo determinados y su objetivo es optimizar uno o más objetivos. Los recursos y tareas en una organización pueden tomar muchas formas diferentes. Los recursos pueden ser máquinas en un taller, pistas en un aeropuerto, equipos en una obra de construcción, unidades de procesamiento en un entorno de computación, etc. Las tareas pueden ser operaciones en un proceso de producción, despegues y aterrizajes en un aeropuerto, etapas de un proyecto de construcción, ejecuciones de programas de computadora, etc. Cada tarea puede tener un cierto nivel de prioridad, una hora de inicio lo más temprana posible y una fecha de vencimiento (Pinedo, 2016). Dicha programación consiste en seleccionar una de las operaciones factibles para cada orden de producción restringida por el gráfico de precedencia (flexibilidad de operación), asignar la operación a una estación de trabajo capaz (flexibilidad de enrutamiento) y asignar un intervalo de tiempo adecuado. Las decisiones están restringidas por las estaciones de trabajo disponibles y sus capacidades de operación, por la configuración específica de la estación de trabajo y los tiempos de transporte, así como por los tiempos de operación específicos de la estación de trabajo y la variante del producto. Los objetivos comunes de optimización son la minimización del makespan, la tardanza, el tiempo de producción, la carga de trabajo máxima de la máquina, la carga de trabajo total y la maximización de la utilización (Stricker et al., 2021).

El proceso de programación de la secuencia de ensamble en un MSAS se caracteriza por una reducción de los grados de libertad en comparación con el montaje en línea (Göppert et al., 2021). Además, la ausencia de un tiempo de ciclo constante elimina la necesidad de balancear las estaciones de trabajo, de tal manera que se convierten en estaciones independientes que pueden producir piezas altamente variables dentro un mismo sistema (Göppert et al., 2021).

#### 4.3.2.1 Tipos de talleres.

Los problemas de scheduling se clasifican según el tipo de taller conformado por las máquinas o estaciones de trabajo y por las características del flujo de los materiales dentro del taller, a continuación, se describen los diferentes tipos de taller.

- **Single machine (1):** el caso de una sola máquina es el más simple de todos los entornos de máquina posibles y es un caso especial de todos los demás entornos de máquina más complicados.
- **Identical machines in parallel (Pm):** hay  $m$  máquinas idénticas en paralelo. Job  $j$  requiere una sola operación y puede procesarse en cualquiera de las máquinas  $m$  o en

cualquiera que pertenezca a un subconjunto dado. Si job  $j$  no se puede procesar en cualquier máquina, pero solo en cualquiera que pertenezca a un subconjunto específico  $M_j$ , entonces la entrada  $M_j$  aparece en el campo  $\beta$ .

- **Machines in parallel with different speeds ( $Q_m$ ):** hay máquinas en paralelo con diferentes velocidades. La velocidad de la máquina  $i$  se denota por  $v_i$ . El tiempo  $p_{ij}$  que el trabajo  $j$  pasa en la máquina  $i$  es igual a  $p_j/v_i$  (suponiendo que el trabajo  $j$  recibe todo su procesamiento de la máquina  $i$ ). Este entorno se conoce como máquinas uniformes. Si todas las máquinas tienen la misma velocidad, es decir,  $v_i = 1$  para todos  $i$  y  $p_{ij} = p_j$ , entonces el entorno es idéntico al anterior.
- **Unrelated machines in parallel ( $R_m$ ):** este entorno es una generalización más de la anterior. Hay  $m$  máquinas diferentes en paralelo. Máquina  $i$  puede procesar trabajo  $j$  a velocidad  $v_{ij}$ . El tiempo  $p_{ij}$  que el trabajo  $j$  pasa en la máquina  $i$  es igual a  $p_j/v_{ij}$  (asumiendo de nuevo que el trabajo  $j$  recibe todo su procesamiento de la máquina  $i$ ). Si las velocidades de las máquinas son independientes de los trabajos, es decir,  $v_{ij} = v_i$  para todos  $i$  y  $j$ , entonces el entorno es idéntico al anterior.
- **Flow shop ( $F_m$ ):** hay  $m$  máquinas en serie. Cada trabajo debe procesarse en cada una de las máquinas  $m$ . Todos los trabajos tienen que seguir la misma ruta, es decir, tienen que ser procesados primero en la máquina 1, luego en la máquina 2, y así sucesivamente. Después de completar una máquina, un trabajo se une a la cola en la siguiente máquina. Por lo general, se supone que todas las colas operan bajo la disciplina First In First Out (FIFO), es decir, un trabajo no puede "pasar" a otro mientras espera en una cola. Si la disciplina FIFO está en efecto, el flow shop se denomina permutation flow shop y el campo  $\beta$  incluye la entrada  $prmu$ .
- **Flexible flow shop ( $FF_c$ ):** un taller de flujo flexible es una generalización del taller de flujo y los entornos de máquinas paralelas. En lugar de  $m$  máquinas en serie hay  $c$  etapas en serie con en cada etapa un número de máquinas idénticas en paralelo. Cada trabajo tiene que ser procesado primero en la etapa 1, luego en la etapa 2, y así sucesivamente. Una etapa funciona como un banco de máquinas paralelas; en cada etapa de trabajo  $j$  requiere procesamiento en una sola máquina y cualquier máquina puede hacer. Las colas entre las diversas etapas pueden o no operar de acuerdo con la disciplina First Come First Served (FCFS). (Las tiendas de flujo flexible a veces también se conocen como tiendas de flujo híbrido y como tiendas de flujo multiprocesador.)
- **Job shop ( $JM$ ):** en un taller con  $m$  máquinas cada trabajo tiene su propia ruta predeterminada a seguir. Se hace una distinción entre los talleres de trabajo en los que cada trabajo visita cada máquina como máximo una vez y los talleres de trabajo en

los que un trabajo puede visitar cada máquina más de una vez. En este último caso el campo  $\beta$  contiene la entrada rrcr para recirculación.

- **Flexible Job shop (FJc):** un taller de trabajo flexible es una generalización del taller de trabajo y los entornos de máquinas paralelas. En lugar de  $m$  máquinas en serie hay  $c$  centros de trabajo con en cada centro de trabajo un número de máquinas idénticas en paralelo. Cada trabajo tiene su propia ruta para seguir a través de la tienda; trabajo  $j$  requiere procesamiento en cada centro de trabajo en una sola máquina y cualquier máquina puede hacer. Si un trabajo en su ruta a través de la tienda puede visitar un centro de trabajo más de una vez, entonces el campo  $\beta$  contiene la entrada rrcr para la recirculación.
- **Open shop (Om):** hay máquinas  $m$ . Cada trabajo tiene que ser procesado de nuevo en cada una de las máquinas  $m$ . Sin embargo, algunos de estos tiempos de procesamiento pueden ser cero. No hay restricciones con respecto al enrutamiento de cada trabajo a través del entorno de la máquina. El programador puede determinar una ruta para cada trabajo y diferentes trabajos pueden tener rutas diferentes (Pinedo, 2016).

#### 4.3.2.2 Tipos de problemas de scheduling.

El problema de scheduling se puede clasificar de acuerdo con diferentes características del entorno productivo como son: el volumen de producción, naturaleza de la producción, la capacidad de la producción y los tipos de sistemas de manufactura, agrupándolos en 5 diferentes niveles como se muestra en la tabla 6 (Abd, 2016).

*Tabla 6. Clasificación de los problemas de scheduling*

Classification based on	Scheduling level
Production volume	High volume scheduling Intermediate volume scheduling Low volume scheduling
Nature of production	Activity scheduling Batch scheduling Network scheduling
Production capacity	Infinite capacity scheduling Finite capacity scheduling
Manufacturing systems	Flow shop scheduling Job-shop scheduling Flexible manufacturing system scheduling
State of scheduling	Static scheduling Dynamic scheduling

Fuente: (Abd, 2016)

#### 4.3.2.3 Características del problema de Scheduling.

Las características de un problema de scheduling se basan en los elementos que componen un problema de programación lineal mencionados a continuación:

- **Variables de decisión:** las variables de decisión se emplean para combinar las actividades y los recursos para terminar los trabajos y simultáneamente para optimizar el rendimiento del sistema (Abd, 2016). La programación clásica tiene un conjunto de decisiones básicas que se deben tomar incluyen:
  - Secuenciación,
  - Calendario/publicación, y
  - Enrutamiento.

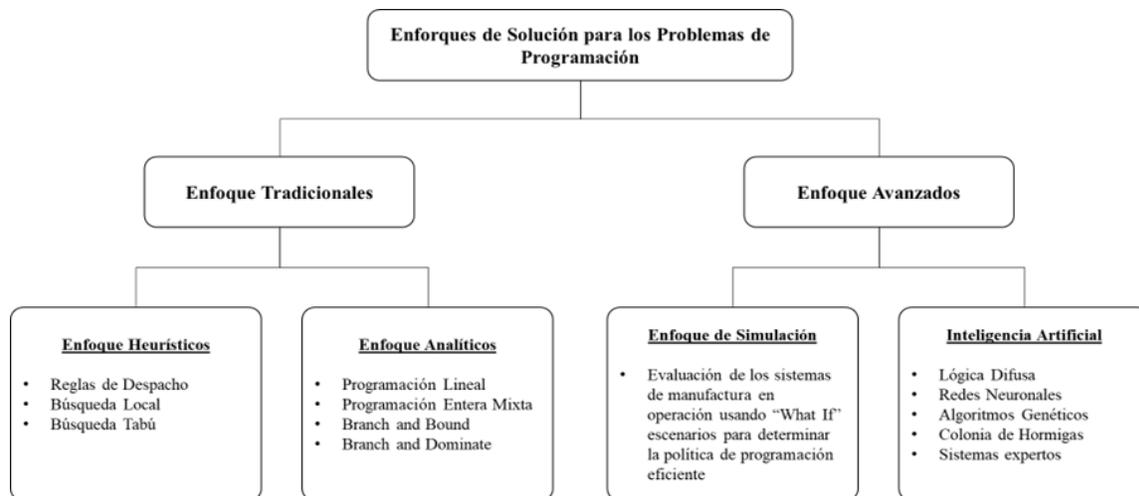
Las decisiones añadidas para los modelos de programación extendida incluyen:

- Reconfiguración de recursos y
- Reconfiguración de la actividad (Arisha, 2003).
- **Restricciones:** la mayoría de los problemas de programación de la vida real no son deterministas en tiempo polinómico difícil (NP-duro) y tienden a tener una serie de restricciones para generar una solución confiable (Abd, 2016). Las restricciones más comunes con:
  - Precedencia y restricciones de enrutamiento;
  - Herramientas, recursos, limitaciones de manejo de materiales;
  - Tipo de industria y restricciones de automatización; y
  - Patrón de demanda y limitaciones de capacidad.
- **Función objetivo:** todas las compañías buscan establecer un balance entre maximizar sus ganancias, minimizar sus costos, tiempos de realización y finalización de los trabajos para cumplir con las fechas de entrega establecidas. Algunas de las funciones objetivo, tomadas dentro de un problema de scheduling se agrupan en las siguientes categorías:
  - Basados en el tiempo de realización
  - Basados en costos
  - Basados en las fechas de entrega (Abd, 2016).

#### 4.3.2.4 Enfoques de Solución para el problema de Scheduling.

Debido a la complejidad de los problemas de programación, se han propuesto varios enfoques de solución, como se muestra en la figura 3. Estos enfoques pueden agruparse en dos tipos principales: enfoques de solución tradicionales y avanzados. Los enfoques tradicionales suelen obtener resultados casi óptimos y son más útiles para solucionar problemas académicos y de tamaño pequeño, debido a que estos enfoques son inflexibles, ineficientes y lentos para problemas de la vida real. Los enfoques avanzados se utilizan para resolver problemas de sistemas de fabricación del mundo real y sus respuestas son más prometedoras y rápidas que las de enfoques tradicionales (Abd, 2016).

Figura 3. Enfoques de solución para los problemas de scheduling



Fuente: (Abd, 2016)

#### 4.3.2.5 Indicadores de desempeño para un problema de scheduling.

Es necesario conocer el comportamiento y el desempeño del sistema de scheduling que se esté usando, para saber si hay problemas que solucionar o si se debe ajustar el sistema, los indicadores que ayudan con esta labor son los siguientes:

- **Makespan** ( $C_{max} = \max_{i \in \{1..n\}} C_i$ ) : Tiempo mínimo para completar todos los trabajos.
- **Total flow time** ( $F_{\Sigma} = \sum_{i \in \{1..n\}} F_i$ ) : es el tiempo consumido por todos los trabajos.
- **Total lateness** ( $L_{\Sigma} = \sum_{i \in \{1..n\}} L_i$ ) : la suma de todos los retrasos de los trabajos.
- **Total tardiness** ( $T_{\Sigma} = \sum_{i \in \{1..n\}} T_i$ ) : la suma de todas las tardanzas de los trabajos.
- **Total earliness** ( $E_{\Sigma} = \sum_{i \in \{1..n\}} E_i$ ) : la suma de todos los tiempos de terminación previos al tiempo comprometido.
- **Maximum lateness** ( $L_{max} = \max_{i \in \{1..n\}} L_i$ ) : el retraso del más atrasado de los trabajos.

- **Maximum tardiness** ( $T_{\max} = \max_{i \in \{1..n\}} T_i$ ) : la tardanza del más tardado de los trabajos. (Cortés Rivera, 2004)
- **W**: Tiempo total de espera de los trabajos
- **W<sub>j</sub>**: Tiempo total del trabajo:
- **NT**: Número de trabajos tardíos
- **I B(m)**: Tiempo ocioso de la máquina m antes de ser asignado el primer trabajo.
- **I B**: Tiempo ocioso de todas las máquinas antes de ser asignado el primer trabajo.
- **I(m)**: Tiempo ocioso de la máquina desde su disponibilidad hasta la terminación de todos los trabajos
- **I**: Tiempo ocioso de todas las máquinas desde su disponibilidad hasta la terminación de todos los trabajos (Salazar Alvarez, 2019).

#### 4.3.2.6 Reglas de despacho.

Las reglas de despacho son aquellas herramientas que permiten tener criterios de prioridad o elección para definir cual tarea debe ser realizada primero, y a partir de esta dar un orden de realización hasta terminar de asignar todas las operaciones que se deban llevar a cabo. Estas normas se utilizan ampliamente en la práctica debido a su simplicidad y su eficacia en entornos de fabricación altamente dinámicos y estocásticos. No solo se utilizan como mecanismos de programación independientes, sino que también se emplean como partes integrales de los algoritmos de programación analítica en línea (Sabuncuoglu, 1998).

#### - Relacionadas con el tiempo de proceso

- **SI (Shortest imminent operation time)**: seleccionar el trabajo con el menor tiempo de operación. También llamado (SIO, SPT)
- **SIS (Shortest gross imminent operation time)**: seleccionar el trabajo con el menor tiempo de operación incluyendo setup.
- **LI (Largest imminent operation time)**: seleccionar el trabajo con el mayor tiempo de operación. También llamado (LPT)
- **LIS (Largest gross imminent operation time)**: seleccionar el trabajo con el mayor tiempo de operación incluyendo setup.
- **SR (Shortest remaining processing time)**: seleccionar el trabajo con el tiempo de procesamiento restante más corto (para operaciones no realizadas).
- **LR (Largest remaining processing time)**: seleccionar el trabajo con el tiempo de procesamiento restante más largo (para operaciones no realizadas).
- **LRM (Longest remaining processing time)**: seleccionar el trabajo con el tiempo de procesamiento restante más largo (excluyendo la operación bajo consideración).

- **SIRIP:** seleccionar el trabajo con el tiempo de operación más corto donde el tiempo de procesamiento no se conoce de antemano y se determina mediante el uso del valor de error distribuido normalmente en la estimación.
  - **LSPON (Longest subsequent operation):** seleccionar el trabajo con la operación posterior más larga.
- **Relacionadas con el tiempo de vencimiento del pedido**
- **EDD:** seleccionar el trabajo con la fecha de vencimiento más próxima.
  - **OPNDD:** Seleccionar el trabajo con la fecha de vencimiento más temprana, se asignan fechas de vencimiento con el mismo espacio de tiempo entre cada operación cuando el trabajo entra al taller.
- **Relacionadas con el número de operaciones**
- **FOPNR:** seleccionar el trabajo con menos operaciones restantes.
  - **MOPNR:** seleccionar el trabajo con más operaciones restantes.
  - **LHALF (Last half preference):** otorgue una mayor prioridad al trabajo con el cual menos de la mitad de todas las operaciones quedan por realizar.
  - **FHALF (First half preference):** otorgue una mayor prioridad al trabajo con el cual más de la mitad de todas las operaciones quedan por realizar.
- **Relacionadas con los costos**
- **Valor (Value):** seleccionar el trabajo con el mayor costo.
  - **1/C:** seleccionar el trabajo que tenga el costo de penalización por unidad más alto debido a la tardanza.
- **Relacionadas el tiempo de Setup**

El tiempo de setup hace referencia al tiempo de alistamiento o ajuste de la máquina en una línea de producción.

- **NSUT:** seleccionar el trabajo que no requiere tiempo de setup.
- **MINSEQ:** seleccionar el trabajo o clase de trabajos con el tiempo de setup mínimo.
- **NB:** seleccionar el trabajo sin asignar que tenga el menor tiempo de setup relativo al trabajo recién completado.
- **NB':** utilizar la regla anterior (NB) pero comenzar con un trabajo distinto al primer trabajo en programar.

- **NB”**: aplicar la regla NB a la matriz de tiempos de setup después de restar el mínimo tiempo de setup a todos los valores de la columna de los tiempos de setup.

- **Relacionadas al tiempo de llegada y al azar**

- **FIFO**: seleccionar el primer trabajo en llegar para ser el primero en salir. 24. Random: Seleccionar los trabajos al azar.
- **FASFO**: seleccionar el primer trabajo en llegar al taller para ser el primero en salir.
- **LIFO**: seleccionar el último trabajo para que salga primero del taller.
- **S-1**: seleccionar el trabajo con la menor holgura (tiempo disponible antes de la fecha de vencimiento para las demás operaciones).
- **S-2**: seleccionar el trabajo con la menor holgura “estática” (diferencia entre fecha de vencimiento y hora de llegada).
- **S-1/OP**: seleccionar el trabajo con la menor relación entre el tiempo de holgura y el número de operaciones restantes.
- **S-2/OP**: seleccionar el trabajo con la menor proporción de holgura a la cantidad de operaciones restantes.
- **JSR**: seleccionar el trabajo con la “holgura de trabajo mínima” (Relación de la holgura del trabajo al tiempo total disponible hasta la fecha de vencimiento).
- **RSPT1**: seleccionar el trabajo con la menor proporción de holgura “estática” al tiempo de procesamiento restante.

**Nota:** se deben diferenciar los tipos de holgura (Slack) donde existe la holgura estática que se define como el tiempo disponible menos el de proceso, pero también se tiene la holgura dinámica que es la diferencia entre la fecha de entrega, el momento actual y el tiempo de proceso restante.

- **Relacionadas con la máquina**

- **NINQ**: seleccionar el trabajo que pasará a su próxima operación donde la máquina tiene la cola más corta.
- **WINQ**: seleccionar el trabajo que pasará a su próxima operación donde la máquina tiene menos trabajo.

- **Información variada**

- **ESD**: seleccionar el trabajo que tiene la fecha de inicio planificada más temprana para su operación (Salazar Alvarez, 2019).

#### 4.4 Marco Conceptual

- **Tarea:** es una unidad de trabajo indivisible  $j$  que tiene asociado un tiempo de proceso  $t_j$ . El trabajo total requerido para manufacturar un producto en una línea se divide en un conjunto de  $n$  tareas  $V = \{1, \dots, j, \dots, n\}$ .
- **Relaciones de precedencia:** están definidas por las restricciones sobre el orden en el cual las operaciones pueden ser ejecutadas en la línea de montaje. De esta forma, una tarea no puede procesarse hasta que no se hayan procesado todas las que le preceden de forma inmediata. Los diagramas de precedencias se usan para representar las relaciones de precedencia.
- **Estación:** es la parte  $k$  de la línea de montaje en donde se ejecutan las tareas; pueden estar compuestas por un operador (humano o robotizado), cierto tipo de maquinaria y equipos o mecanismos de proceso especializados.
- **Tiempo de ciclo:**  $c$  es el tiempo disponible en cada estación para completar las tareas asignadas para una unidad de producto. Puede ser el tiempo máximo o el tiempo promedio disponible para cada ciclo de trabajo.
- **Carga de trabajo:** es el conjunto  $S_k$  de tareas asignadas a la estación  $k$ .
- **Tiempo de cada estación:** es la suma de los tiempos de todas las tareas asignadas a una estación:  $\sum_{j \in S_k} t_j$ .
- **Tiempo de estación libre:** es la diferencia entre el tiempo ciclo y el tiempo de estación:  $c - \sum_{j \in S_k} t_j$ . (Capacho & Pastor, s. f.)
- **Paquetes de trabajo (WP):** es la secuencia finita de pasos de procesamiento que requiere un tipo de producto (Schönemann et al., 2015)
- **Processing Time (Pij):** el  $P_{ij}$  representa el tiempo de procesamiento del trabajo  $j$  en la máquina  $i$ . El subíndice  $i$  se omite si el tiempo de procesamiento del trabajo  $j$  no depende de la máquina o si el trabajo  $j$  solo se procesará en una máquina determinada.
- **Release Time (rj):** un trabajo  $j$  no podrá iniciar su secuencia de procesamiento antes de su fecha de disponibilidad (release date), lo cual indica que es una programación dinámica. Si el release date no se encuentra dentro de las restricciones, entonces el trabajo puede comenzar en cualquier momento, lo cual lo convierte en un problema de programación estática.

- **Due Date (Dj):** la fecha de entrega  $D_j$  del trabajo  $j$  representa la fecha de envío o entrega comprometida, es decir, la fecha en que se promete el trabajo al cliente. Se permite la finalización de un trabajo después de su fecha de vencimiento, pero luego se incurre en una multa. Cuando se debe cumplir una fecha de entrega, se denomina fecha límite y se indica con  $D_j$ .
- **Weight (Wj):** el peso ponderado  $W_j$  del trabajo  $j$  es básicamente un factor de prioridad, que denota la importancia del trabajo  $j$  en relación con los demás trabajos del sistema. Por ejemplo, este peso puede representar el costo real de mantener el trabajo en el sistema. Este costo podría ser un costo de mantenimiento o de inventario; también podría representar la cantidad de valor ya agregado al trabajo.
- **Setup Times (Sjk):** el  $S_{jk}$  representa el tiempo de configuración dependiente de la secuencia en el que se incurre entre el procesamiento de los trabajos  $j$  y  $k$ ;  $S_{0k}$  denota el tiempo de preparación para el trabajo  $k$  si el trabajo  $k$  es el primero en la secuencia y  $S_{j0}$  el tiempo de limpieza después del trabajo  $j$  si el trabajo  $j$  es el último en la secuencia (por supuesto,  $S_{0k}$  y  $S_{j0}$  pueden ser cero). Si el tiempo de configuración entre los trabajos  $j$  y  $k$  depende de la máquina, entonces se incluye el subíndice  $i$ , es decir,  $S_{ijk}$ . Si no aparece  $S_{jk}$  en el campo  $\beta$ , se supone que todos los tiempos de configuración son 0 o independientes de la secuencia, en cuyo caso simplemente se incluyen en los tiempos de procesamiento.
- **Preemptions (prmp):** las interrupciones implican que no es necesario mantener un trabajo en una máquina una vez iniciado hasta su finalización. El programador puede interrumpir el procesamiento de un trabajo en cualquier momento y colocar un trabajo diferente en la máquina. La cantidad de procesamiento que ya ha recibido un trabajo interrumpido no se pierde. Cuando un trabajo interrumpido se vuelve a colocar posteriormente en la máquina (o en otra máquina en el caso de máquinas paralelas), solo necesita la máquina para el tiempo de procesamiento restante. Cuando se permiten las interrupciones, prmp se incluye en el campo  $\beta$ ; cuando no se incluye prmp, no se permiten las interrupciones.
- **Precedence Constraints (prec):** las restricciones de precedencia pueden aparecer en una sola máquina o en un entorno de máquina paralela, lo que requiere que uno o más trabajos deban completarse antes de que se permita que otro trabajo comience su procesamiento. Hay varias formas especiales de precedencia en las restricciones, por ejemplo, si cada trabajo tiene como máximo un predecesor y como máximo un sucesor, las restricciones se denominan cadenas. Si cada trabajo tiene como máximo un sucesor, las restricciones se denominanintree. Si cada trabajo tiene como máximo un predecesor, las restricciones se denominan outtree. Si no aparece ninguna

precedencia (prec) en el campo  $\beta$ , los trabajos no están sujetos a restricciones de precedencia.

- **Job Families (fmls):** los  $n$  trabajos pertenecen en este caso a  $F$  familias de trabajos diferentes. Los trabajos de la misma familia pueden tener diferentes tiempos de procesamiento, pero se pueden procesar en una máquina uno tras otro sin requerir ninguna configuración intermedia. Sin embargo, si la máquina cambia de una familia a otra, digamos de la familia  $g$  a la familia  $h$ , entonces se requiere una configuración. Si este tiempo de preparación depende de ambas familias  $g$  y  $h$  y depende de la secuencia, entonces se denota por  $S_{gh}$ . Si este tiempo de preparación depende solo de la familia que está a punto de comenzar, es decir, la familia  $h$ , entonces se indica con  $S_h$ . Si no depende de ninguna de las familias, se indica con la  $S$ . Si los trabajos son agrupados en familias para su procesamiento en el campo  $\beta$  se anexa la nomenclatura (fmls).
- **Batch Processing (batch):** una máquina puede procesar varios trabajos, digamos  $b$ , simultáneamente; es decir, puede procesar un lote de hasta  $b$  trabajos al mismo tiempo. Los tiempos de procesamiento de los trabajos en un lote pueden no ser todos iguales y el lote completo se termina solo cuando se ha completado el último trabajo del lote, lo que implica que el tiempo de finalización de todo el lote está determinado por el tiempo en el que se completó el último trabajo. Si  $b = 1$ , entonces el problema se reduce a un entorno de programación convencional. Otro caso especial de interés es  $b = \infty$ , es decir, no hay límite en la cantidad de trabajos que la máquina puede manejar en cualquier momento.
- **Breakdowns (brkdwn):** las averías de la máquina implican que una máquina puede no estar disponible continuamente. Se puede suponer que los períodos en los que una máquina no está disponible son fijos (por ejemplo, debido a turnos o mantenimiento programado). Si hay varias máquinas idénticas en paralelo, la cantidad de máquinas disponibles en cualquier momento es una función del tiempo, es decir,  $m(t)$ . A veces, las averías de la máquina también se denominan restricciones de disponibilidad de la máquina. Si se consideran las averías en las máquinas se escribe (brkdwn) en el campo  $\beta$ .
- **Permutations (prmu):** una restricción que puede aparecer en el entorno del taller de flujo es que las colas frente a cada máquina operan de acuerdo con la disciplina primero en entrar, primero en salir (FIFO). Esto implica que el orden o permutación (prmu) en el que los trabajos pasan por la primera máquina se mantiene en todo el sistema.

- **Blocking (block):** el bloqueo es un fenómeno que puede ocurrir en los talleres de flujo. Si un taller de flujo tiene un búfer limitado entre dos máquinas sucesivas, puede suceder que cuando el búfer esté lleno, la máquina aguas arriba no pueda liberar un trabajo completado. El bloqueo implica que el trabajo completado debe permanecer en la máquina aguas arriba evitando (es decir, bloqueando) que la máquina trabaje en el siguiente trabajo. La ocurrencia más común de bloqueo es el caso con cero búferes entre dos máquinas sucesivas. En este caso, un trabajo que ha completado su procesamiento en una máquina determinada no puede salir de la máquina si el trabajo anterior aún no ha completado su procesamiento en la siguiente máquina; por lo tanto, el trabajo bloqueado también evita (o bloquea) que el siguiente trabajo comience su procesamiento en la máquina dada. En algunos modelos con bloqueo se asume que las máquinas operan según FIFO. Es decir, block implica pmu.
- **No Wait (nwt):** el requisito de sin esperas es otro fenómeno que puede ocurrir en los talleres de flujo. No se permite que los trabajos esperen entre dos máquinas sucesivas. Esto implica que la hora de inicio de un trabajo en la primera máquina debe retrasarse para garantizar que el trabajo pueda pasar por el taller de flujo sin tener que esperar a ninguna máquina. Un ejemplo de una operación de este tipo es un laminador de acero en el que no se permite que una plancha de acero espere, ya que se enfriará durante una espera. Está claro que sin esperas las máquinas también funcionan de acuerdo con la disciplina FIFO.
- **Recirculation (rcrc):** la recirculación puede ocurrir en un taller de trabajo o taller de trabajo flexible cuando un trabajo puede visitar una máquina o centro de trabajo más de una vez. Cualquier otra entrada que pueda aparecer en el campo  $\beta$  se explica por sí misma. Por ejemplo,  $P_j=P$  implica que todos los tiempos de procesamiento son iguales y  $D_j=D$  implica que todas las fechas de entrega son iguales. Como se indicó anteriormente, las fechas de entrega, a diferencia de las fechas de liberación, generalmente no se especifican explícitamente en este campo; el tipo de función objetivo da una indicación suficiente de si los trabajos tienen fechas de vencimiento o no.
- **Makespan (Cmax):** El makespan, definido como  $\max(C_1, \dots, C_n)$ , es equivalente al tiempo de finalización del último trabajo en abandonar el sistema. Un makespan mínimo implica generalmente una buena utilización de la máquina(s) (Pinedo, 2016).

#### 4.5 Marco Situacional

Esta investigación se realizará en la Universidad Tecnológica de Pereira, la cual se fundó el 4 de marzo de 1961, y está ubicada en la carrera 27 #10-02 Pereira, Risaralda; cuenta re acreditación institucional de alta calidad por 10 años desde el 2021-2031, se encuentra en

la posición número 9 a nivel nacional en el The World University Rankings realizado por Times Higher Education (Infobae, 2022).

## **5 METODOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de Estudio.**

La investigación se basa en evaluar el desempeño de las reglas de despacho del problema de scheduling aplicado a un sistema de ensamble de estructura de matriz. Debido a que no existen muchas investigaciones sobre esto, este estudio sentará bases para futuros trabajos, por lo tanto, el tipo de estudio es el exploratorio en donde se clasifican las investigaciones con temas que no se han abordado antes o que presentan pocas investigaciones previas, además, como investigadoras es un tema visto, pero se abordará desde una nueva perspectiva (Hernández Sampieri et al., 2010).

### **5.2 Tratamiento de la Información**

Para cumplir con lo planteado en los objetivos se tendrá que buscar información relevante en investigaciones anteriormente realizadas, esto con el fin de conocer los aspectos generales que están relacionados con el problema de scheduling y con los sistemas de ensamble matriciales. Cuando se tenga la información que se considere necesaria, se planteará un ejemplo donde se pueda aplicar lo hallado en la investigación, para así concluir respecto al comportamiento del sistema.

### **5.3 Diseño Metodológico**

El diseño metodológico de esta investigación se muestra en la tabla 7.

## **6 CRONOGRAMA**

El desarrollo de las actividades se muestra en la tabla 8



## 7 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO PARA EL PROBLEMA DE SCHEDULING EN LOS MSAS.

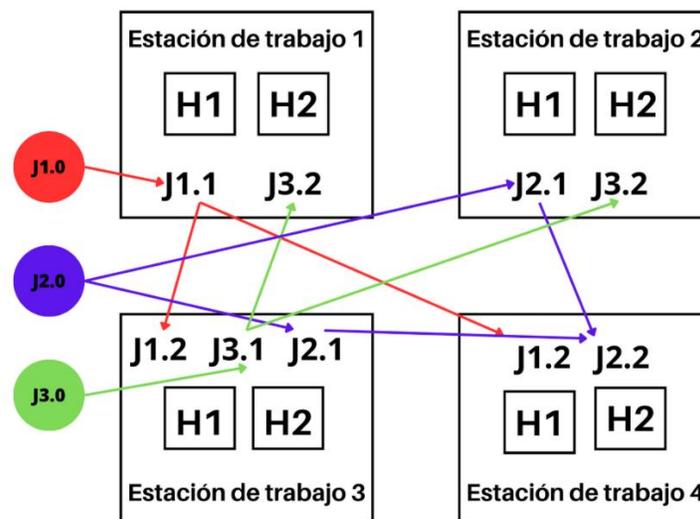
### 7.1 Características Funcionales de los MSAS

La principal característica de un MSAS es la conformación de diferentes estaciones de trabajo dispuestas en estructura de matriz, es decir, se encuentran ubicadas en filas y columnas, formando una distribución rectangular. Éstas están equipadas con herramientas y/o maquinarias, las cuales son capaces de realizar diferentes operaciones sin necesidad de tener tiempos de ciclo constantes, lo que permite eliminar la tarea de balancear el sistema (Göppert et al., 2021). Debido a la complejidad NP-hard que significa programar tareas de ensamble en los MSAS, en este trabajo de investigación se trabajará sobre un caso de estudio pequeño con un diseño del sistema conformado por cuatro estaciones de trabajo, cada una con capacidad de utilizar dos tipos de herramientas diferentes. Para garantizar la flexibilidad en el sistema y cumplir con el objetivo del caso de estudio, se tienen en cuenta los principios de los MSAS:

- **Tiempo de ciclo individual:** en el caso de estudio, a cada tarea de ensamble se le asignará un tiempo de procesamiento aleatorio entre 1 y 10 unidades de tiempo, los cuales seguirán una distribución uniforme, estas operaciones pueden ser asignadas aquella estación que se encuentre disponible y que cuente con la herramienta necesaria para realizarla, sin ser restringidas por el tiempo máximo de utilización de esta.
- **Redundancia de los paquetes de trabajo (WP) ofrecidos:** este tipo de sistema permite que cada operación tenga diferentes opciones de asignación a estaciones de trabajo debido a que cada una de ellas está equipada con más de una herramienta, para atender diferentes operaciones. En el caso de estudio, cada estación estará conformada por dos tipos de herramientas A, B o C, lo cual amplía la gama de opciones para la asignación de operaciones, de este modo, se tendrán por lo menos dos posibles estaciones a las cuales seguir con el proceso de ensamble.
- **Múltiples paquetes de trabajo por estación:** el fin de cada estación de trabajo es estar equipada con diferentes herramientas o maquinaria que le permita procesar varias operaciones y así ampliar su capacidad de ensamble, maximizando su utilización. Cada estación estará configurada con dos herramientas distintas, lo que permite el desarrollo de una amplia cantidad de tareas, esto sumado a que no presentará restricción en la cantidad de operaciones a realizar o en el tiempo disponible de la estación, como se mencionó anteriormente.

- **Enrutamiento flexible del producto:** debido a la diversidad de opciones para asignación de operaciones a estaciones, un trabajo presenta muchas combinaciones para ser realizado, por lo tanto, la elección de estación depende de la prioridad establecida al inicio del problema, teniendo en cuenta variables como: tiempo de setup, tiempo de espera, tiempo de ocio, tiempo de desplazamiento, entre otros. Para este caso de estudio, se evaluará cada una de estas prioridades para analizar su influencia en el comportamiento del sistema.
- **Utilización:** uno de los indicadores más importantes de los sistemas de producción es la utilización, ésta tiene como objetivo principal elevar el rendimiento y la ocupación de las estaciones de trabajo. Debido a que en el caso de estudio no se planteó una restricción de tiempo para las estaciones, no es posible calcular un indicador de utilización de estación, sin embargo, se puede conocer el nivel de utilización con los tiempos de espera y los tiempos ociosos que se generan en la asignación de operaciones.

Figura 4. Ilustración gráfica de los principios de un MSAS



La figura 4 ilustra los principios de un MSAS, por medio de la disposición de las cuatro estaciones de trabajo, equipadas con dos tipos de herramienta H1 y H2, donde cada una de estas puede procesar de dos a tres operaciones entre tres trabajos diferentes con tiempos de ensamble individuales. La operación de inicio y fin de cada trabajo está nombrada con 0 y 2 respectivamente, y las flechas del color correspondiente, indican las posibles rutas a seguir para completar el trabajo.

## 7.2 Parámetros del Problema de Scheduling en los MSAS

Las características de un problema de scheduling están conformadas por la definición de uno o varios objetivos, variables de decisión y restricciones del sistema. El objetivo se establece de acuerdo con las necesidades que presente el problema, las variables de decisión se definen por una operación de un trabajo que necesita un tipo de herramienta en una estación de trabajo capaz de realizarla, y las restricciones dependen de las características del sistema, las más comunes son disponibilidad de herramienta en las estaciones de trabajo, tiempo disponible de la estación de trabajo y precedencias de operaciones (Abd, 2016).

### 7.2.1 Definición de la Medida de Desempeño

Para este caso de estudio se plantea un problema inicial con diez trabajos diferentes, los cuales deben ser asignados en un taller de estructura de matriz con cuatro estaciones de trabajo equipadas cada una con dos herramientas. El objetivo principal del scheduling en los MSAS es maximizar la utilización de las estaciones de trabajo, lo cual se logra si se minimiza el makespan, dado que esto genera una reducción de los tiempos ociosos y de espera, por lo tanto, el makespan y la utilización serán las medidas para evaluar el desempeño del ejercicio. La utilización estará definida para cada estación por medio de la ecuación 1.

*Ecuación 1. Cálculo para la utilización de las estaciones de trabajo*

$$U_i = \frac{\text{Tiempo total de ensamble de la estación}}{\text{Makespan del sistema}} \times 100$$

Donde  $i$  es la estación de trabajo, el tiempo total de ensamble es igual a la suma de los tiempos de procesamiento de todas las operaciones asignadas a la estación de trabajo y el Makespan del sistema es el tiempo en que se finalizan todos los trabajos. De esta manera, la utilización total del sistema será el promedio de las  $U_i$ , considerando la mejor utilización la cercana al 100%, y el mejor makespan el más cercano al makespan óptimo ( $M_o$ ) que se obtiene según la ecuación 2.

*Ecuación 2. Cálculo para el Makespan óptimo*

$$M_o = \frac{\sum \text{tiempos de ensamble}}{\text{Número de estaciones}}$$

### 7.2.2 Determinación de las Restricciones del Problema

Dentro de las restricciones planteadas para el ejercicio, se da mayor relevancia a las precedencias de cada una de las operaciones, estas marcan el orden en que se deben realizar para completar el trabajo. Se pueden presentar dos tipos de precedencias, las lineales y no lineales, las lineales son aquella donde la precedencia solo está compuesta por una operación, por el contrario, las no lineales pueden estar compuestas por dos o más operaciones, es decir presenta operaciones simultáneas. Para el trabajo 1 mostrado en la figura 5a, se evidencia la precedencia no lineal, donde J1.4 solo puede iniciar si J1.2 y J1.3 finalizaron, por otro lado, en la figura 5b, se muestra la precedencia lineal donde J2.3 no puede iniciar sí J2.2 no ha finalizado, al igual que esta última no puede iniciar sin que J2.1 haya finalizado, es importante resaltar que en un mismo trabajo se pueden presentar ambos tipos de precedencia. Adicionalmente, la figura 6 muestra los instantes de tiempo ( $t$ ), en los cuales cada operación inicia y termina, donde la finalización de la precedencia indica el inicio de la operación posterior, además, la parte gris representa el tiempo en el cual puede realizarse J1.3, teniendo en cuenta que esta no presenta ninguna precedencia, pero es precedente de J1.4.

Figura 5. Gráfico de Precedencias

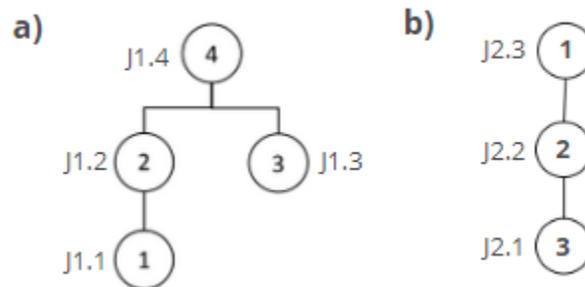
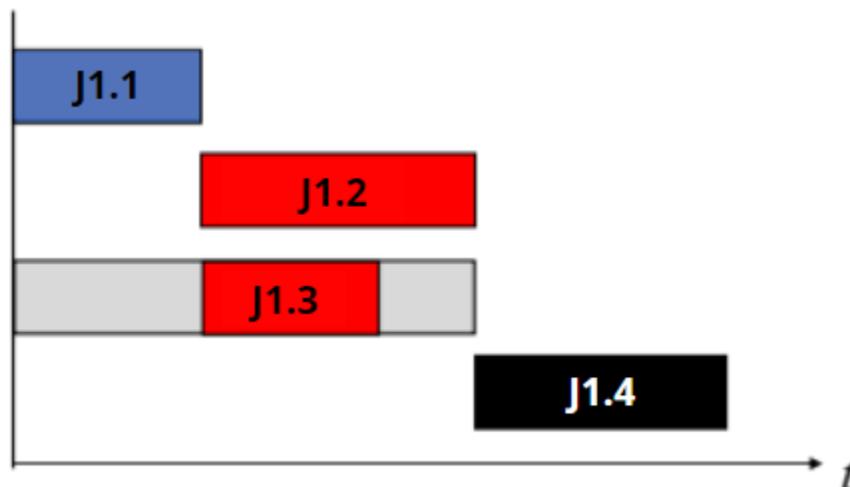


Figura 6. Diagrama operación tiempo



### **7.2.3 Consideraciones Previas**

Para la solución del caso de estudio, se asumen los siguientes aspectos:

- Las estaciones de trabajo solo pueden ensamblar una operación al tiempo, esto no impide que éstas estén trabajando al mismo tiempo.
- Los tiempos de ensamble de cada una de las operaciones son conocidos.
- No habrá restricción en la cantidad de trabajos en espera en las estaciones para ser ensamblados.
- Las estaciones no tendrán paros por reparación, daños, mantenimientos, entre otros, ya que se plantea un ambiente ideal de trabajo.
- No se limitará el tiempo disponible de las estaciones ni el uso de las herramientas.
- No se tendrá en cuenta tiempos de setup, ni de desplazamiento entre estaciones.

Sin embargo, se tendrán tres fases diferentes a lo largo del desarrollo del caso de estudio, en la primera fase se tendrá un ejercicio con diez trabajos con secuencias de ensamble lineales y los aspectos mencionados anteriormente no cambiarán, la segunda fase plantea operaciones simultáneas en el mismo trabajo y las suposiciones planteadas se mantienen, y en la tercera fase se cambia el último aspecto asumido inicialmente ya que se tendrá en cuenta en un primer ejercicio el tiempo de desplazamiento entre estaciones y en otro diferente el tiempo de setup.

Para la solución de un problema de scheduling se suelen utilizar las heurísticas para problemas de gran dimensión y, los algoritmos matemáticos para problemas con menor cantidad de variables. Debido al propósito de la investigación, se usarán las heurísticas y reglas de despacho como método de solución, aplicando algunas ya existentes como la SPT, LPT y LR.

### **7.3 Diseño Caso de Estudio para el Problema de Scheduling en los MSAS**

El propósito del caso de estudio es crear un sistema de ensamble en el cual sea posible aplicar diferentes reglas de despacho para la solución del problema de scheduling, y así analizar su desempeño al asignar operaciones a estaciones de trabajo capaces de realizarla. Para esto se plantea un ejercicio compuesto por diez trabajos, cada uno conformado por un número de operaciones entre uno y tres, se elige esta cantidad debido a que permite observar el comportamiento del sistema sin complicar su solución teniendo en cuenta que las asignaciones se realizan de manera manual.

Para la construcción del ejercicio se realizan tres aleatorios sencillos, los cuales siguen una distribución uniforme debido a que se busca que cada miembro del rango presente igual

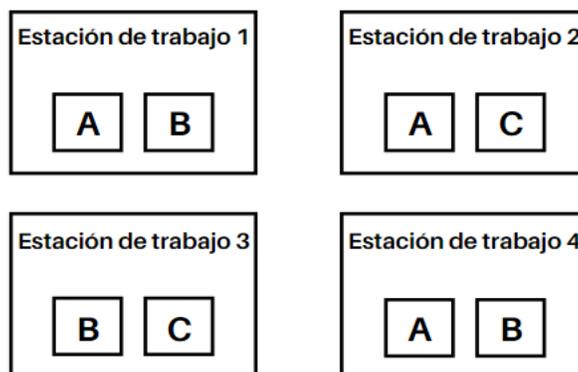
probabilidad de ocurrir. El primer aleatorio se realizó para conocer la cantidad de operaciones por trabajo estableciendo un rango entre uno y tres, el segundo aleatorio para determinar el tiempo de ensamble de cada operación en un rango de uno a diez, y por último, el tercer aleatorio para elegir el tipo de herramienta que necesita cada operación definiendo un rango entre uno y tres, siendo uno la herramienta A, dos la herramienta B y tres la herramienta C, dando como resultado la tabla 9.

*Tabla 9. Número de operaciones, tiempo de procesamiento y herramienta asignada para cada trabajo del ejercicio 1*

Jobs	Pij					
	1	Tool	2	Tool	3	Tool
1	5	A				
2	2	A	8	C		
3	5	B	6	A	8	C
4	8	B	4	C		
5	4	A				
6	6	C	8	B	7	A
7	7	A	5	B		
8	9	A	2	C	5	B
9	10	B				
10	5	B	6	A	2	C

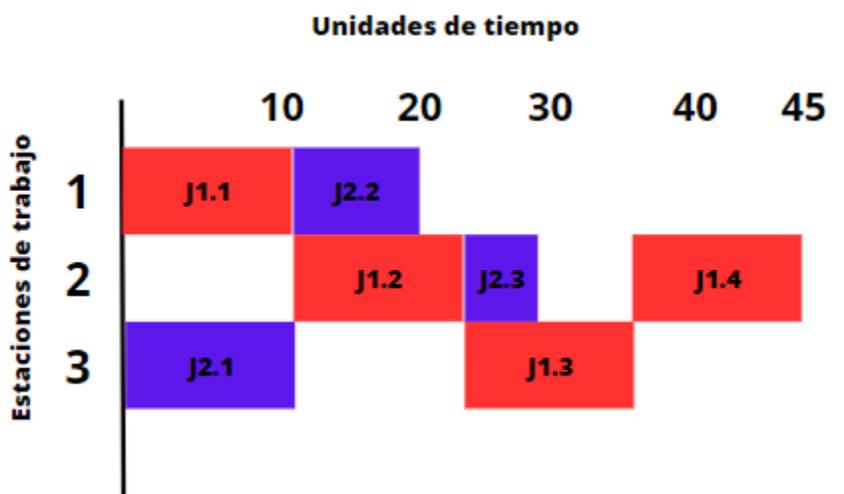
Posteriormente se plantea la cantidad de estaciones de trabajo para el ejercicio, donde se decide crear una matriz de 2x2, siendo esta la expresión más reducida de una matriz cuadrada como lo requiere un MSAS. Para proseguir, se realiza un aleatorio sencillo que sigue una distribución uniforme, con un rango entre uno y tres, donde el número uno representa la herramienta A, dos la herramienta B y tres la herramienta C, esto se realiza para establecer los tipos de herramienta que tendrá disponible cada estación, este aleatorio se ejecuta dos veces para cada estación, debido a que cada una estará equipada con dos herramientas diferentes, los resultados obtenidos se muestran en la figura 7.

Figura 7. Disposición de estaciones de trabajo para el ejercicio



La solución de este problema se expresará en un diagrama de Gantt, el cual es un esquema compuesto por tiempo y recursos disponibles que muestra la asignación de trabajos a dichas estaciones durante los tiempos de procesamiento establecidos para estos. Esta herramienta permite visualizar de mejor manera el makespan de cada problema, además ayuda a observar la ubicación de las operaciones, los tiempos ociosos, de espera y la utilización de la maquinaria. Para este caso las columnas serán unidades de tiempo y las filas serán estaciones de trabajo, por lo tanto, en cada fila (Estación de trabajo) se asignarán las operaciones, las cuales tendrán una duración delimitada por el tiempo preestablecido de ensamble, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Diagrama de Gantt



## 7.4 Evaluación del Desempeño de las Reglas de Despacho para el Problema de Scheduling en los MSAS.

### 7.4.1 Primera Fase

Como primer paso en la evaluación del desempeño del caso de estudio se seleccionan las reglas de despacho SPT y LPT, con el fin de obtener un panorama inicial del comportamiento de los trabajos y las operaciones al ser asignadas a las estaciones de trabajo. Para aplicar estas reglas se realiza la sumatoria de los tiempos de ensamble de todas las operaciones que conforman un trabajo  $J$ , las cuales se encuentran en la tabla 10, esta sumatoria se utiliza para la elección del orden de asignación de los trabajos, donde para la regla SPT será de menor a mayor, y para la regla LPT de mayor a menor. Es importante recalcar que se asignará la totalidad de las operaciones de un trabajo, antes de asignar el siguiente. Los resultados obtenidos se muestran en los diagramas de Gantt de la figura 9.

Tabla 10. Resultado de las sumatorias de cada trabajo

Jobs	Pij						$\Sigma Pij$
	1	Tool	2	Tool	3	Tool	
1	5	A					5
2	2	A	8	C			10
3	5	B	6	A	8	C	19
4	8	B	4	C			12
5	4	A					4
6	6	C	8	B	7	A	21
7	7	A	5	B			12
8	9	A	2	C	5	B	16
9	10	B					10
10	5	B	6	A	2	C	13



De este primer desarrollo se notó que al asignar trabajos completos se generan tiempos ociosos debido a que se deben respetar los tiempos de inicio de las operaciones, los cuales no siempre coinciden con el tiempo de liberación de la estación, por lo cual se plantea asignar operación por operación. Para generar este cambio se vuelve a asignar con las reglas anteriores, pero el criterio de decisión no es el tiempo total de ensamble de cada trabajo si no el tiempo de ensamble de la operación a asignar, es decir, para la regla LPT se elige el trabajo cuya próxima operación a asignar tenga el mayor tiempo de ensamble en comparación con las próximas operaciones de los demás trabajos hasta asignar todas, de este mismo modo para la regla SPT, pero asignando por operación con el menor tiempo. Al asignar las operaciones de esta manera, se obtienen los diagramas de Gantt de la figura 10.

*Figura 10. Resultados del ejercicio al asignar por operaciones con las reglas de despacho SPT y LPT*



Se puede visualizar que a diferencia de los diagramas de la figura 9, al asignar por operaciones se logra eliminar los tiempos ociosos para este ejercicio, obteniendo un makespan de 36 y una utilización de 85% para la regla SPT y, para LPT un makespan de 34 y una utilización de 90%. Con estos resultados, se observa que el sistema funciona mejor al asignar por operaciones y teniendo como prioridad el tiempo de ensamble más largo.

A partir de este comportamiento, se construye la heurística “tiempo de ensamble remanente por operaciones para Sistemas de Ensamble de Estructura de Matriz simple”, por su abreviación **LR-O para MSAS Simple**, en la cual se combina la asignación por operaciones teniendo como regla de despacho el mayor tiempo remanente por trabajos (LR), y aplicando reglas de desempate tomadas de los resultados de los ejercicios anteriores. Inicialmente, para

el ejercicio planteado se diseñó una tabla en la cual se especifica la operación a realizar, el tiempo en el que puede iniciar ( $S$ ), el tiempo remanente ( $RT$ ) y las estaciones en las que puede ser ensamblada ( $Ws$ ), como se muestra en la tabla 12, con el fin de visualizar la operación a ser asignada y si existe posibilidad de asignar más de una operación en el mismo instante, lo cual se da cuando dos o más operaciones tienen el mismo tiempo remanente y se ensamblan en diferentes estaciones de trabajo.

Tabla 12. Guía para asignación de operaciones

	S	RT	Ws
1,1	0	5	1-2-4
2,1	0	10	1-2-4
3,1	0	19	1-3-4
4,1	0	12	1-3-4
5,1	0	4	1-2-4
6,1	0	21	2-3
7,1	0	12	1-2-4
8,1	0	16	1-2-4
9,1	0	10	1-3-4
10,1	0	13	1-3-4

Los pasos para seguir para esta heurística son:

- 1- Se completa la tabla con la información de las operaciones iniciales de cada trabajo.
- 2- Se asigna aquella o aquellas operaciones con el tiempo remanente más largo a la estación que puede realizarlas. Para el ejercicio planteado la operación a asignar es la 6.1 a la estación 2.  
**Nota 1:** para las primeras operaciones, la elección de la estación es al azar.  
**Nota 2:** en caso de que dos o más operaciones presenten el mismo tiempo remanente y necesiten de la misma estación de trabajo, se elige aquel trabajo que tenga mayor número de operaciones remanentes a asignar, si presentan la misma cantidad de operaciones la elección es al azar.
- 3- Se actualiza la tabla completando la información de la siguiente operación del trabajo que se asignó, teniendo en cuenta que: el tiempo de inicio es el tiempo de finalización de la operación precedencia y el tiempo remanente ya no debe incluir el tiempo de ensamble de la operación ya asignada. Para el ejercicio se actualiza la información de la operación 6.2, como se muestra en la tabla 13.

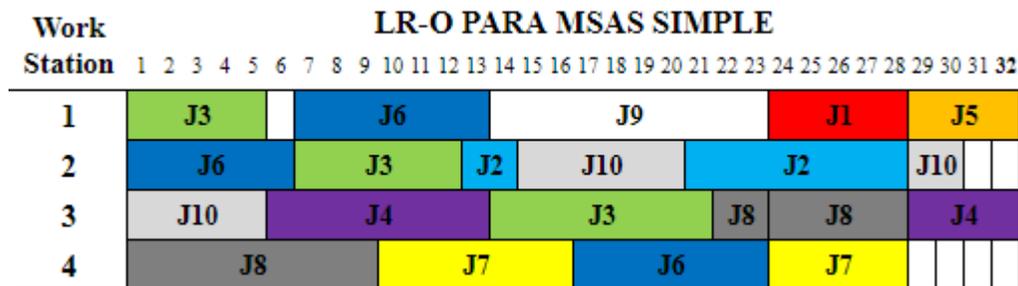
- 4- Se inicia nuevamente el proceso a partir del paso dos, hasta que se asignen todas las operaciones.

*Tabla 13. Actualización de la guía para asignación de operaciones*

	S	RT	Ws
1,1	0	5	1-2-4
2,1	0	10	1-2-4
3,1	0	19	1-3-4
4,1	0	12	1-3-4
5,1	0	4	1-2-4
<b>6,2</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>1-3-4</b>
7,1	0	12	1-2-4
8,1	0	16	1-2-4
9,1	0	10	1-3-4
10,1	0	13	1-3-4

Al finalizar la asignación de operaciones para el caso de estudio, se obtiene el diagrama de Gantt de la figura 11, donde se puede observar que el makespan es de 32 unidades de tiempo y solo se presenta un tiempo ocioso en la estación de trabajo 1, por lo cual, la utilización del sistema es de 95%.

*Figura 11. Diagrama de Gantt para el ejercicio resuelto con la heurística LR-O para MSAS Simple*



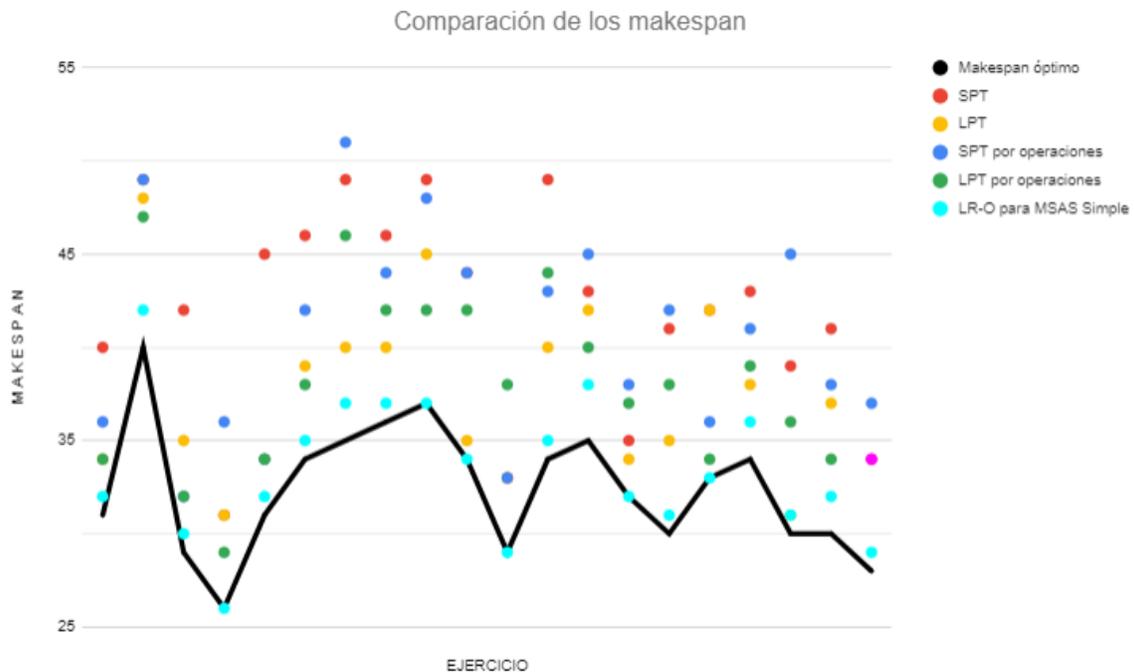
De esta primera fase se puede concluir que esta heurística es la que mejor resultado ha brindado hasta el momento para el tipo de ejercicio planteado, ponderando la relevancia del makespan y la utilización frente a los resultados obtenidos con las reglas anteriores. Para corroborar dicha conclusión se aplica esta heurística y las reglas de despacho a diecinueve ejercicios adicionales planteados bajo las mismas características del primero, los cuales muestran resultados acordes a la afirmación, como se muestra en la tabla 14, además, se presenta el resultado del cálculo del makespan óptimo para cada caso, de tal manera que se puedan comparar los makespan obtenidos en cada una de las instancias.

Tabla 14. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados

Ejercicio	SPT		LPT		SPT por operaciones		LPT por operaciones		LR-O para MSAS Simple		
	Makespan óptimo	Makespan	Ui	Makespan	Ui	Makespan	Ui	Makespan	Ui	Makespan	Ui
1	31	40	76%	34	90%	36	85%	34	90%	32	95%
2	40	49	79%	48	82%	49	81%	47	84%	42	97%
3	29	42	69%	35	83%	32	91%	32	91%	30	97%
4	26	31	84%	31	82%	36	72%	29	89%	26	99%
5	31	45	72%	34	90%	34	90%	34	90%	32	96%
6	34	46	73%	39	87%	42	80%	38	88%	35	96%
7	35	49	73%	40	88%	51	69%	46	76%	37	95%
8	36	46	78%	40	90%	44	88%	42	85%	37	97%
9	37	49	74%	45	80%	48	76%	42	86%	37	98%
10	34	44	79%	35	96%	44	77%	42	80%	34	99%
11	29	33	87%	33	87%	33	98%	38	76%	29	99%
12	34	49	73%	40	85%	43	79%	44	77%	35	96%
13	35	43	81%	42	83%	45	78%	40	88%	38	93%
14	32	35	91%	34	93%	38	84%	37	86%	32	99%
15	30	41	74%	35	86%	42	71%	38	79%	31	97%
16	33	42	77%	42	77%	36	90%	34	96%	33	98%
17	34	43	77%	38	89%	41	83%	39	87%	36	95%
18	30	39	73%	31	92%	45	65%	36	81%	31	94%
19	30	41	73%	37	81%	38	79%	34	88%	32	94%
20	28	34	82%	32	87%	37	75%	34	83%	29	96%

Se observa en los resultados presentados en la tabla 14, que el makespan obtenido para cada caso con la heurística planteada es el más cercano al óptimo, además de presentar la utilización más alta, esto también se ve representado en la figura 12, donde se muestra por medio de un gráfico de dispersión los makespan obtenidos en cada ejercicio con cada una de las reglas y la heurística y por medio de una línea de tendencia el makespan óptimo, allí se observa la cercanía que presentan los resultados de la heurística con este último, sin embargo, es importante resaltar que utilizando la regla de despacho LPT y LPT por operaciones se obtienen resultados cercanos a la heurística y por ende cercanos al óptimo. Por lo tanto, para un MSAS bajo las condiciones establecidas en esta primera fase, se obtienen mejores resultados utilizando la heurística **LR-O para MSAS Simple**.

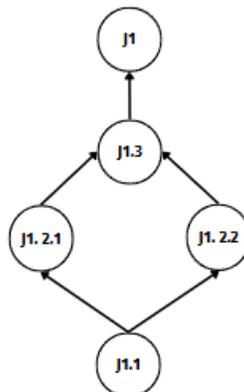
Figura 12. Comparación de los makespan



#### 7.4.2 Segunda Fase

En esta fase se evaluará una característica que se encuentra presente en la mayoría de los sistemas de ensamble, ésta es la simultaneidad de operaciones para completar un trabajo, es decir, la posibilidad de realizar dos operaciones pertenecientes a un mismo trabajo, en el mismo instante de tiempo. En este caso, el gráfico de precedencias permite visualizar la dependencia del inicio de una operación con respecto a la finalización de 2 o más operaciones, como se muestra en la figura 13, la operación 1.3 no puede empezar hasta que las operaciones 1.2.1 y 1.2.2 no hayan finalizado.

Figura 13. Gráfico de precedencias para el trabajo 1 con operaciones simultaneas



Para estudiar el comportamiento de las operaciones simultaneas en un MSAS, se plantea un nuevo ejercicio, pero manteniendo los mismos parámetros del inicio, con un total de diez trabajos, donde cada uno puede tener hasta cinco operaciones para ser completado, y presenta o no, al menos dos operaciones que pueden ser realizadas simultáneamente. En la tabla 15 se muestran los trabajos con sus respectivas operaciones, sus tiempos de procesamiento y su necesidad de herramienta, en la tabla 16 se muestra las precedencias para cada uno de los trabajos donde el signo < indica la precedencia de operaciones, por lo cual para el trabajo 1, la operación 1.1 es la precedencia para las operaciones 1.2 y 1.3, de igual forma estas últimas son la precedencia para la operación 1.4, así como se muestra en la figura 13.

*Tabla 15. Número de operaciones, tiempo de ensamble y herramienta asignada para cada trabajo del ejercicio de la fase 2*

Jobs	Pij										ΣPij
	1	Tool	2	Tool	3	Tool	4	Tool	5	Tool	
1	6	C	8	A	5	B	7	C			26
2	12	B	14	A	4	C	15	B			45
3	2	C	6	C	4	A	14	B	9	A	35
4	10	A									10
5	7	C	7	A	10	B					24
6	2	C	13	B	12	C	11	A			38
7	10	C									10
8	10	B	13	A	12	A					35
9	14	C	12	B							26
10	13	C	4	B	15	B	11	A	4	A	47

*Tabla 16. Precedencias de las operaciones para los trabajos*

Jobs	Predencias			
1	1.1	<	1.2 1.3	< 1.4
2	2.1	<	2.2 2.3	< 2.4
3	3.1	<	3.2 3.3	< 3.4 < 3.5
5	5.1 5.2	<	5.3	
6	6.1 6.2	<	6.3	< 6.4
8	8.1 8.2	<	8.3	
9	9.1	<	9.2	
10	10.1 10.2	<	10.3	< 10.4 < 10.5

Para este ejercicio, se tiene la misma asignación de herramienta y el mismo número de estaciones de trabajo planteadas para el ejercicio de la fase número 1, esto debido a que, al aumentar la cantidad de operaciones en los trabajos, se puede volver más compleja la solución manual del ejercicio. Dado que la asignación por operaciones presentó buenos resultados en la primera fase, se toma esta misma metodología para la solución del problema, por lo tanto, se aplica la heurística LR-O para MSAS Simple, sin embargo, se debe tener en cuenta que en la asignación de operaciones simultaneas, se busca que éstas sean asignadas en el mismo instante de tiempo, para comenzar la siguiente operación lo más pronto posible, además, al tener operaciones simultaneas se aumenta la cantidad de opciones de operaciones a ser asignadas en la tabla guía, como se muestra en la tabla 17. Se hace necesario aclarar que el tiempo remanente que se toma para la asignación de operaciones es el tiempo total del trabajo, es decir, la suma del tiempo de ensamble de todas las operaciones, incluyendo la operación simultánea.

*Tabla 17. Tabla guía para la asignación de operaciones en el ejercicio 1 de la fase 2*

	<b>S</b>	<b>RT</b>	<b>Ws</b>
<b>1,1</b>	0	26	2-3
<b>2,1</b>	0	45	1-3-4
<b>2,2</b>	0		1-2-4
<b>3,1</b>	0	35	2-3
<b>4,1</b>	0	10	1-2-4
<b>5,1</b>	0	24	2-3
<b>5,2</b>	0		1-2-4
<b>6,1</b>	0	38	2-3
<b>6,2</b>	0		1-3-4
<b>7,1</b>	0	10	2-3
<b>8,1</b>	0	35	1-3-4
<b>8,2</b>	0		1-2-4
<b>9,1</b>	0	26	2-3
<b>10,1</b>	0	47	2-3
<b>10,2</b>	0		1-3-4

Al realizar la asignación con la heurística planteada, se obtiene como resultado un makespan de 75 unidades de tiempo además de una utilización del 99%, como se muestra en la figura 14. En dicha figura se puede observar que los trabajos simultáneos efectivamente se están realizando en instantes de tiempo iguales, por lo cual se puede afirmar que dicha heurística

también funciona en esta fase, debido a que una de sus características es la asignación por operaciones lo cual resulta más beneficioso en cuanto a utilización en este tipo de ejercicios. Para corroborar los resultados observados, se realizó un segundo ejercicio cuyo resultado se puede observar en la tabla 18, además se adiciona el resultado obtenido al calcular el makespan óptimo para cada caso, donde se observa que los makespan obtenidos al aplicar la heurística planteada se acercan al óptimo.

*Figura 14. Diagrama de Gantt para el ejercicio 1 de la fase 2*



*Tabla 18. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados con Simultaneidad*

Ejercicio	Makespan óptimo	LR-O para MSAS Simple con Simultaneas	
		Makespan	Ui
1	74	75	99%
2	80	82	97%

### 7.4.3 Tercera Fase

Los tiempos de desplazamiento y de setup son características que se encuentran presentes en diversos sistemas productivos, para los MSAS se vuelven una prioridad al momento de realizar la asignación de operaciones, ya que dichos factores son inherentes al sistema y su eliminación no es posible en todos los casos, influyendo en los tiempos de espera del sistema y éstos en la utilización de este, por lo cual su disminución es el objetivo principal de esta fase.

#### 7.4.3.1 Tiempos de Desplazamiento entre Estaciones

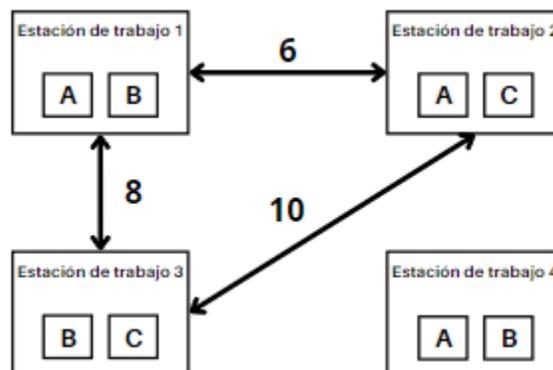
Ya que una de las principales características del MSAS es el traslado de las operaciones de una estación a otra, se hace necesario evaluar que tanto influye la distancia entre estaciones al momento de realizar la asignación de trabajos. Para esta fase se realiza una nueva asignación de tiempos de ensamble y herramientas a los trabajos, pero usando los tiempos de ensamble de la fase número 2, obteniendo como resultado la tabla 19.

Tabla 19. Número de operaciones, tiempo de ensamble y herramienta asignada para cada trabajo del ejercicio de desplazamiento de la fase 3

Jobs	Pij										$\Sigma Pij$
	1	Tool	2	Tool	3	Tool	4	Tool	5	Tool	
1	6	C	8	A	7	C	5	B			26
2	12	B	4	C	15	B	14	A			45
3	2	C	6	C	14	B	9	A	4	A	35
4	10	A									10
5	7	C	10	B	7	A					24
6	2	C	12	C	11	A	13	B			38
7	10	C									10
8	10	B	12	A	13	A					35
9	14	C	12	B							26
10	13	C	15	B	11	A	4	A	4	B	47

Ya que este ejercicio toma en cuenta los tiempos de desplazamiento, se plantean los tiempos de la figura 15, los cuales se establecieron por medio de un aleatorio sencillo entre 1 y 10 para seleccionar el tiempo de desplazamiento horizontal y vertical, el tiempo entre la estación 2 y 3 se halló por medio del cálculo de la hipotenusa. Se debe aclarar que el tiempo que tarda en ir de 1 a 2 es el mismo que tardará en ir de 3 a 4, y esta misma lógica se usará para los desplazamientos verticales y diagonales, ya que las estaciones son equidistantes.

Figura 15. Tiempos de desplazamiento entre estaciones



Inicialmente para resolver este ejercicio se establece cual será la prioridad de asignación, teniendo en cuenta que existen tiempos que afectan el inicio de la operación al ser asignada en una estación determinada, por lo cual, se plantea una sumatoria, desarrollada en la ecuación 3, que permita definir cuál será la prioridad al asignar operaciones a estaciones de trabajo.

*Ecuación 3. Sumatoria para la elección de estación*

$$Sd_i = d + TE_i$$

Donde:

- $Sd_i$  es el resultado de la sumatoria para la estación.
- $d$  es el tiempo de desplazamiento desde donde se encuentra el trabajo hasta donde irá
- $TE_i$  es el tiempo en que la estación a donde irá la operación se desocupa

Esta sumatoria se debe calcular para cada estación donde la operación a asignar pueda realizarse y a partir de las segundas operaciones de cada trabajo, entre estos resultados se elige el menor, ya que esto significa que es donde más rápido será ensamblado, las sumatorias que se realizaron para el ejercicio y la estación elegida para la operación se muestran en la tabla 20. Además de esto, se utiliza la guía propuesta en la heurística LR-O para MSAS Simple, usada para la asignación de operaciones, la cual se muestra en la tabla 21. Al realizar estos cálculos y las asignaciones correspondientes se obtiene el diagrama de Gantt de la figura 16.

*Tabla 20. Resultados del cálculo de la sumatoria para cada asignación de operaciones en el ejercicio con desplazamiento*

Operaciones	Estaciones			
	1	2	3	4
J10.1 a J10.2	6		11	8
J2.1 a J2.2		15	10	
J3.2 a J3.3	19		13	8
J8.1 a J8.2	34	39		33
J6.2 a J6.3	28	37		47
J2.3 a J2.4	25	20		22
J8.2 a J8.3	24	16		9
J1.2 a J1.3		14	17	
J9.1 a J9.2	34		25	44
J5.2 a J5.3	25	24		27
J1.3 a J1.4	9		18	15
J10.4 a J10.5	8		13	18



Al realizar la evaluación del ejercicio por medio del makespan y de la utilización, se encontraron valores de 85 y de 83,7% respectivamente, sin embargo, en medio del proceso de asignación se pudo notar que la sumatoria no tomaba en cuenta si la estación estaba o no ocupada, sólo el tiempo que tardaba en realizar el desplazamiento, por lo tanto, se estableció una nueva forma de asignar estaciones, por medio de la creación de un coeficiente, establecido en la ecuación 4.

*Ecuación 4. Coeficiente para la asignación de estaciones*

$$Cd_i = \frac{TE_i}{d}$$

Donde:

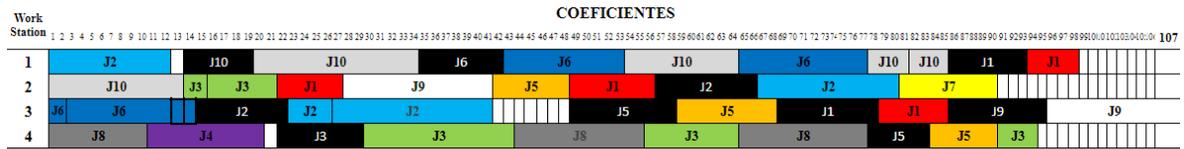
- $Cd_i$  es el resultado del coeficiente
- $d$  es el tiempo de desplazamiento desde donde se encuentra el trabajo hasta donde irá
- $TE_i$  es el tiempo en que la estación a donde irá la operación se desocupa

Al igual que la sumatoria, este coeficiente debe ser realizado para cada estación hacia donde puede ir la operación, y la estación elegida será el coeficiente con menor valor, sin embargo, se debe tener en cuenta que en algunos casos se puede presentar una indeterminación, ya que el desplazamiento es cero, dado que la operación precedencia de la que se va a asignar se encuentra en dicha estación, por lo cual, se asigna a aquella estación en la cual la operación pueda realizarse más rápido. Estos resultados pueden ser observados en la tabla 22, para este caso la guía para la asignación de operaciones es igual que para el ejercicio con sumatoria, por lo cual se muestra en la tabla 21. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en el diagrama de Gantt de la figura 17.

*Tabla 22. Resultados de los cálculos de los coeficientes para la asignación de operaciones del ejercicio con desplazamiento*

Operaciones	Estaciones de trabajo			
	1	2	3	4
J10,1 a J10,2	0/6		8/10	0/8
J2,1 a J2,2		8/6	2/8	
J3,2 a J3,3	13/6		20/10	0/8
J8,1 a J8,2	24/10		31/6	33/0
J6,2 a J6,3	20/8	34/10		41/6
J5,1 a J5,2	16/6		0/10	7/8
J2,3 a J2,4	23/8	15/10		14/6
J1,2 a J1,3		24/0	12/10	
J9,1 a J9,2	36/6		44/10	36/8
J5,2 a J5,3	13/8	22/10		9/6

Figura 17. Diagrama de Gantt para el ejercicio de desplazamiento resuelto con coeficiente de la fase 3



Los resultados de este ejercicio fueron un makespan de 107 y una utilización de 69%, por lo tanto, se puede notar que el resultado no fue mejor que el ejercicio realizado con la sumatoria ya que ambos indicadores fueron mayores, adicionalmente es un método poco eficiente, ya que en los casos donde se encuentra una indeterminación no ayuda a dar una respuesta inmediata de a cuál estación se debe asignar, por la tanto, la respuesta depende del criterio de quien se encuentra asignando. Por esta razón, se decide plantear nuevamente el ejercicio de tal manera que permita evaluar simultáneamente el tiempo de liberación de la estación y el desplazamiento de la operación, esto por medio de un valor máximo, planteado en la ecuación 5.

El cálculo del máximo ( $Maxd_i$ ) se realiza para cada estación hacia donde se puede desplazar la operación, por lo tanto, se obtendrá más de un valor máximo (uno por cada estación que se tiene como opción), entonces, para la elección de estación se elegirá el menor valor entre estos máximos, lo cual se ilustra en la ecuación 6, ya que este es el tiempo más próximo en que se puede iniciar la operación, estos valores se pueden observar en la tabla 23. Además, para este ejercicio se utiliza la guía para la asignación de operaciones que se muestra en la tabla 21.

Ecuación 5. Máximo para la asignación de estaciones con desplazamiento

$$Maxd_i = [(Fin.Oprec + d) ; TE_e]$$

Ecuación 6. Mínimo para elección de estación con desplazamiento

$$Mind_{ie} = [Max_i]$$

Donde:

- $Maxd_i$  es el componente de mayor valor
- $Fin.Oprec$  es el tiempo en que finaliza la operación precedencia
- $d$  es el tiempo de desplazamiento desde donde se encuentra el trabajo hasta donde irá
- $TE_i$  es el tiempo en que la estación a donde irá la operación se desocupa
- $Mind_{ie}$  es el valor mínimo entre todos los máximos de las estaciones



Tabla 24. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados con desplazamiento

Ejercicio	Makespan óptimo	Sumatoria para MSAS con Desplazamiento		Coeficientes para MSAS con Desplazamiento		Máximo para MSAS con Desplazamiento	
		Makespan	Ui	Makespan	Ui	Makespan	Ui
1	74	85	84%	107	69%	83	89%
2	80	97	81%	96	82%	96	83%
3	29	42	69%	48	63%	34	85%
4	26	32	81%	44	58%	32	80%
5	31	39	79%	40	77%	35	88%
6	34	37	91%	42	80%	37	91%
7	35	41	85%	47	75%	40	88%
8	36	40	90%	44	83%	39	92%
9	37	42	86%	45	81%	39	93%
10	34	38	89%	44	76%	42	81%

Se observa en la tabla 24 que, para el 90% de los casos, el máximo permite encontrar una asignación con un makespan cercano al óptimo, para el 30% de los casos la sumatoria y para el 10% el coeficiente, sin embargo, ninguno de estos métodos permitió llegar al makespan óptimo, dado que se presentan tiempos de desplazamiento que afectan los tiempos de ocios de las estaciones, por lo tanto, estos métodos de solución permiten llegar a una respuesta factible mas no óptima para los ejercicios de asignación de operaciones de un MSAS planteados bajos las condiciones de esta fase. Por lo tanto, las heurísticas nombradas como Sumatoria para MSAS con Desplazamiento, Coeficiente para MSAS con Desplazamiento y Máximo para MSAS con Desplazamiento, se sugieren como métodos de solución para problemas de scheduling de un MSAS que presente tiempos de desplazamiento entre estaciones, teniendo presente que esta última presenta mejores resultados la mayoría de los casos.

#### 7.4.3.2 Tiempos de Setup entre Estaciones

Los tiempos de setup son una característica relevante en los sistemas de ensamble, debido a que estos representan el tiempo que necesita una estación para hacer el cambio de herramienta, en los MSAS estos tiempos tienen más importancia debido a que para garantizar la flexibilidad del sistema, las estaciones presentan varias herramientas que permiten ensamblar diferentes operaciones, por lo cual estos tiempos son inherentes al sistema al igual que los tiempos de desplazamiento, por esta razón se realiza un ejercicio que presenta los mismos tiempos establecidos para el ejercicio anterior en la tabla 19, pero se anexa la tabla 25 donde se establecen los tiempos de cambio entre una herramienta y otra, los cuales fueron definidos por medio de un aleatorio sencillo entre 0 y 5, siguiendo una distribución uniforme. En esta tabla se puede observar que la diagonal es cero debido a que representa un cambio

entre la misma herramienta, además el tiempo para cambiar de A a B es el mismo que se usa para cambiar de B a A, y los demás tiempos siguen esta misma lógica.

*Tabla 25. Tiempos de setup establecidos para el cambio de una herramienta a otra*

Herramienta	Herramienta		
	A	B	C
A	0	3	4
B	3	0	2
C	4	2	0

Para la solución de este ejercicio se usa una lógica similar a los métodos planteados en el numeral 7.4.3.1, dado que el tiempo de setup y el tiempo de desplazamiento, son tomados como tiempos de ocios inherentes en un MSAS explicados anteriormente. Por lo tanto, como primer método de solución se plantea la sumatoria mostrada en la ecuación 7, en la cual los sumandos son del tiempo de setup y el tiempo en que la estación a la que puede ir la operación se desocupa.

*Ecuación 7. Sumatoria para la asignación de estaciones con tiempos de setup*

$$Sa_i = TE_e + Se$$

Donde:

- $Sa_i$  es la sumatoria
- $TE_i$  es el tiempo en que la estación a donde irá la operación se desocupa
- $Se$  es el tiempo de setup

Este cálculo debe hacerse a partir de la segunda operación que se vaya a asignar a cada estación y para cada estación en la cual la operación elegida pueda realizarse, de tal manera que se elige el menor resultado entre las sumas realizadas. Los resultados obtenidos al aplicar la ecuación 7 para cada asignación se muestran en la tabla 26, además para este ejercicio se utiliza la guía planteada en la fase uno para la asignación de operaciones, como se muestra en la tabla 27.

Tabla 26. Resultados de los cálculos de la sumatoria para el ejercicio con setup

Operación	Sumatoria			
	1	2	3	4
10.2	12		16	10
3.2		15	14	
2.2		15	21	
2.3	12		23	28
3.3	34		23	28
1.1		39	21	
9.1		39	27	
8.2	37	40		31
5.1		37	41	
6.3	37	48		43
1.2	48	48		43
10.3	48	48		51
5.2	51		43	54
2.4	48	59		51
3.4	62	59		51
6.4	65		51	63
8.3	62	59		60
1.3		76	69	
9.2	65		78	63
4.1	62	72		77
7.1	76	76		
10.4	72	72		78
5.3	72	76		78
1.4	82		88	75
3.5	79	76		84
10.5	82		88	81

Tabla 27. Guía para la asignación de operaciones para el ejercicio con setup

	S	RT	Ws
1,1	0	26	2-3
2,1	0	45	1-3-4
3,1	0	35	2-3
4,1	0	10	1-2-4
5,1	0	24	2-3
6,1	0	38	2-3
7,1	0	10	2-3
8,1	0	35	1-3-4
9,1	0	26	2-3
10,1	0	47	2-3

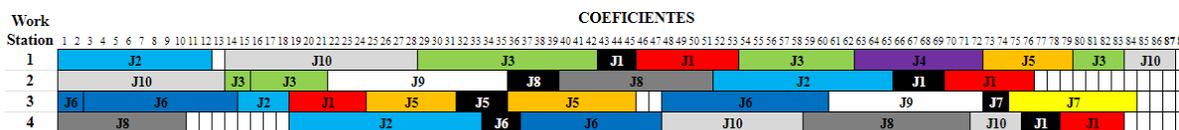


Tabla 28. Resultados de los cálculos de los coeficientes para el ejercicio con setup

Operación	Coeficientes			
	1	2	3	4
10.2	12/0		14/2	10/0
3.2		15/0	14/0	
2.2		21/0	14/0	
2.3	28/0		18/2	10/0
3.3	28/0		18/2	33/0
1.1		21/0	18/0	
9.1		21/0	24/0	
8.2	42/3	35/4		33/3
5.1		51/4	21/0	
6.3	42/3	51/0		33/3
1.2	42/3	51/0		47/0
10.3	53/0	51/0		47/0
5.2	53/3		31/4	58/3
2.4	53/0	51/0		58/0
3.4	53/0	65/0		58/0
6.4	62/3		45/0	58/3
8.3	62/0	65/0		58/0
1.3		65/4	60/2	
9.2	62/3		60/0	71/3
4.1	62/0	76/4		71/0
7.1		76/0	72/2	
10.4	72/0	76/4		71/0
5.3	72/0	76/4		75/0
1.4	79/3		84/2	75/3
3.5	79/0	76/4		84/3
10.5	83/3		84/2	84/0

Una vez realizados los cálculos y asignadas las operaciones se obtiene el diagrama de Gantt de la figura 20, en el cual se observa que se obtiene un makespan de 87 y una utilización de 86%, siendo un resultado muy cercano al obtenido con la sumatoria, presentando una unidad de tiempo adicional en su makespan, sin embargo, también se presentan tiempos ociosos adicionales a los tiempos de setup necesarios. A pesar de los valores de las medidas de desempeño, este método es dispendioso y su resultado depende del criterio de quien esté asignando, de la misma manera que la heurística Coeficientes para MSAS con Desplazamiento.

Figura 20. Diagrama de Gantt para el ejercicio con setup resuelto con coeficientes



Dado los resultados obtenidos y las observaciones que se presentaron en el momento de asignar operaciones por medio de la sumatoria y los coeficientes, se plantea un método similar a la heurística Máximo para MSAS con Desplazamiento, que se expresa en las ecuaciones 9 y 10, sin embargo, difieren debido a que para el caso anterior los tiempos de



Tabla 29. Resultados del cálculo de los máximos de estación para cada asignación de operaciones con setup

Operación	Estaciones							
	1		2		3		4	
	Fin. Operación	Tiempo + Setup						
10.2	13	12			13	16	13	10
2.2			12	21	12	14		
2.3	18	28			18	20	18	10
3.3	21	28			21	20	21	33
1.1			0	21	0	39		
9.1			0	27	2	37		
8.2	10	31	10	45			10	36
5.1			0	41	0	39		
6.3	14	43	14	45			14	36
1.2	27	43	27	45			27	47
10.3	28	51	28	45			28	47
5.2	46	54			46	48	46	50
2.4	33	51	33	56			33	47
3.4	37	51	37	56			37	61
6.4	47	63			47	58	47	64
8.3	43	60	43	56			43	61
1.3			51	73	51	73		
9.2	41	63			41	71	41	64
4.1	0	78	0	84			0	61
7.1			0	80	0	73		
10.4	56	78	56	84			56	71
5.3	58	78	58	84			58	75
1.4	80	75			80	83	80	85
3.5	60	85	60	84			60	82
10.5	75	75			75	85	75	89

Para corroborar los resultados obtenidos con los métodos de solución, se plantean nueve ejercicios adicionales bajo las mismas condiciones del ejercicio inicial donde se encontró que el 90% de los ejercicios obtiene un makespan cercano al óptimo cuando se soluciona con la sumatoria y con el máximo y 10% con el coeficiente, es importante resaltar que el 20% de los ejercicios obtuvo el mismo valor de makespan y de utilización al aplicar los tres métodos propuestos, como se muestra en la tabla 30, adicionalmente, se observa que siempre se obtienen los mismos valores en las medidas de desempeño cuando se utilizan los métodos de sumatoria y máximo, esto se debe a que la sumatoria es igual a uno de los componentes del máximo, pero en este último, ese valor se compara con el tiempo de finalización de la operación precedencia, lo que ayuda a tener mayor claridad respecto al instante en que debe iniciar la operación a asignar. De esta manera, surgen las heurísticas nombradas Sumatoria para MSAS con Setup, Coeficiente para MSAS con Setup y Máximo para MSAS con Setup, como métodos de solución para el problema de scheduling de un MSAS cuando presenta tiempos de setup.

Tabla 30. Resumen de los resultados de las heurísticas aplicadas a los ejercicios planteados con setup

Ejercicio	Makespan óptimo	Sumatoria		Coeficientes		Max para MSAS con	
		Makespan	Ui	Makespan	Ui	Makespan	Ui
1	74	86	86%	87	86%	86	86%
2	80	98	81%	106	75%	98	81%
3	34	42	82%	42	80%	42	82%
4	29	37	78%	43	67%	37	78%
5	34	41	82%	41	82%	41	82%
6	35	44	80%	44	80%	44	80%
7	32	35	91%	39	81%	35	91%
8	30	37	81%	39	77%	37	81%
9	33	38	84%	40	81%	38	84%
10	34	44	77%	41	83%	44	77%

## 8 CONCLUSIONES

- A partir de la realización de los ejercicios planteados se pudo observar la diversidad de escenarios que puede presentar este tipo de sistemas al momento de asignar operaciones a estaciones de trabajo, a pesar de haber tomado solo algunas variables para este caso de estudio que se consideraron más relevantes dado el planteamiento del problema, sin embargo, existen otro tipo de variables que pueden ser más relevantes dependiendo del sistema que se esté analizando, esto deja ver la necesidad de investigaciones respectivas al tema.
- Se logra plantear tres ejercicios diferentes que se adecuaron a los aspectos establecidos para cada una de las fases propuestas para el caso de estudio, en los cuales por medio de la evaluación de distintas reglas se obtuvieron resultados que llevaron a la construcción de diferentes heurísticas que permitieron la solución del problema de scheduling para cada uno de estos ejercicios, además de la evaluación del desempeño para cada uno de estos, logrando el objetivo general de la investigación, además de que se brindan bases para futuras investigaciones.
- La heurística LRO para MSAS Simple, permite dar una solución factible a problemas cuyo objetivo sea la asignación de operaciones a estaciones de trabajo equipadas con más de una herramienta, o para problemas que presenten operaciones simultaneas, de tal manera que se establece un método eficaz para evaluar el desempeño de sistemas que presenten estas características.
- Al plantear los ejercicios de la fase número tres, se pudo observar que estos requieren de una solución multiobjetivo, por esta razón las heurísticas construidas toman en

cuenta el tiempo disponible de la estación y los tiempos de setup o desplazamiento según corresponda y funcionan para darle una solución factible a este problema.

- Los MSAS son sistemas relativamente nuevos que permiten una producción de altos volúmenes y variedad, por lo tanto, estos sistemas requieren de un nivel de automatización que permita realizar y transportar operaciones en tiempos cortos con ayuda de máquinas especializadas y AGV's, por lo cual dar una solución al problema de scheduling de hace esencial para lograr la optimización de los recursos dentro de la empresa.

## **9 RECOMENDACIONES**

- Debido a la complejidad de la asignación manual que se realizó en esta investigación, se sugiere el uso de softwares y/o programas computacionales que faciliten la asignación de operaciones y minimicen el error humano
- Se recomienda una mayor cantidad de instancia para corroborar el comportamiento de los MSAS en cada una de las fases, además de explorar más variables presentes en este tipo de sistemas.

## REFERENCIAS

- Abd, K. K. (2016). *Intelligent Scheduling of Robotic Flexible Assembly Cells* (1st ed. 2016). Springer International Publishing: Imprint: Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-26296-3>
- Arisha, A. (2003). *Intelligent Shop Scheduling for Semiconductor Manufacturing*.  
[https://doras.dcu.ie/17199/1/amr\\_arisha\\_20120701115246.pdf](https://doras.dcu.ie/17199/1/amr_arisha_20120701115246.pdf)
- Capacho, L., & Pastor, R. (s. f.). *Generación de secuencias de montaje y equilibrado de líneas*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/509/IOC-DT-P-2004-04.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cortés Rivera, D. (2004). *Un Sistema Inmune Artificial para resolver el problema del Job Shop Scheduling* [CENTRO DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL].  
<http://alpha1000.cs.cinvestav.mx/Estudiantes/TesisGraduados/2004/tesisDanielCortes.pdf>
- Echsler Minguillon, F. (2020). *Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion* [PDF]. <https://doi.org/10.5445/IR/1000121163>
- GOLA, A., & ŚWIC, A. (2012). *DIRECTIONS OF MANUFACTURING SYSTEMS' EVOLUTION FROM THE FLEXIBILITY LEVEL POINT OF VIEW*.  
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.3013&rep=rep1&type=pdf>
- Göppert, A., Schukat, E., Burggräf, P., & Schmitt, R. H. (2021). Agile Hybrid Assembly Systems: Bridging the Gap Between Line and Matrix Configurations. En P. Weißgraeber, F. Heieck, & C. Ackermann (Eds.), *Advances in Automotive*

*Production Technology – Theory and Application* (pp. 3-11). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-62962-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62962-8_1)

Greschke, P., Schönemann, M., Thiede, S., & Herrmann, C. (2014). Matrix Structures for High Volumes and Flexibility in Production Systems. *Procedia CIRP*, 17, 160-165. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.040>

Gultekin, H., Akturk, M. S., & Karasan, O. E. (2008). Scheduling in robotic cells: Process flexibility and cell layout. *International Journal of Production Research*, 46(8), 2105-2121. <https://doi.org/10.1080/00207540601100262>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5a ed). McGraw-Hill.

Hofmann, C., Liu, X., May, M., & Lanza, G. (2022). Hybrid Monte Carlo tree search based multi-objective scheduling. *Production Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01152-9>

Infobae. (2022, octubre 12). *Estas son las universidades colombianas en el ranking de las mejores del mundo: Hay un nuevo líder*. <https://www.infobae.com/america/colombia/2022/10/12/estas-son-las-universidades-colombianas-en-el-ranking-de-las-mejores-del-mundo-hay-un-nuevo-lider/>

Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 121-136. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>

Marketing directo. (2019, julio 7). *El 63% de los consumidores del retail quiere recibir productos y servicios personalizados*. <https://www.marketingdirecto.com/marketing-general/marketing/consumidores->

retail-quiere-recibir-productos-y-servicios-  
personalizados#:~:text=el%20sector%20retail-  
,El%2063%25%20de%20los%20consumidores%20del%20retail,recibir%20product  
os%20y%20servicios%20personalizados

Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling*. Springer International Publishing.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3>

Sabuncuoglu, I. (1998). A study of scheduling rules of flexible manufacturing systems: A simulation approach. *International Journal of Production Research*, 36(2), 527-546.

<https://doi.org/10.1080/002075498193877>

Salazar Alvarez, V. (2019). *Estado del arte del problema de secuenciación de tareas implementando reglas de despacho*. Universidad Tecnológica de Pereira.

Schönemann, M., Herrmann, C., Greschke, P., & Thiede, S. (2015). Simulation of matrix-structured manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 104-112.

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.09.002>

Schukat, E., Rachner, J., Maidl, A., Göppert, A., Adlon, T., Burggräf, P., & Schmitt, R. H. (2022). *Agent-based Order Release in Matrix-Structured Assembly Systems*.

<https://doi.org/10.15488/12139>

Stricker, N., Kuhnle, A., Hofmann, C., & Deininger, P. (2021). Self-adjusting multi-objective scheduling based on Monte Carlo Tree Search for matrix production assembly systems. *CIRP Annals*, 70(1), 381-384.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.036>

Zhang, W., Freiheit, T., & Yang, H. (2005). Dynamic scheduling in flexible assembly system based on timed Petri nets model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(6), 550-558. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.12.002>