



Sistemas prácticos para el diseño del layout de plantas industriales con celdas de manufactura

Martín Darío Arango Serna
Julián Andrés Zapata Cortes
Sebastián Eduardo Cáceres Gelvez

Sistemas prácticos para el
diseño del layout de
plantas industriales con
celdas de manufactura

Sistemas prácticos para el diseño del layout de plantas industriales con celdas de manufactura

Martín Darío Arango Serna
Julián Andrés Zapata Cortes
Sebastián Eduardo Cáceres Gelvez



Medellín, 2024

658.5

A71 Arango Serna, Martín Darío

Sistemas prácticos para el diseño del layout de plantas industriales con celdas de manufactura / Martín Darío Arango Serna, Julián Andrés Zapata Cortes, Sebastián Eduardo Cáceres Gelvez. -- Primera edición. -- Medellín, Colombia : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización, 2024.

1 recurso en línea (228 páginas) : ilustraciones, diagramas, formas.

ISBNe: 978-958-505-726-5

1. GESTIÓN DE FABRICAS. 2. INGENIERÍA DE LA PRODUCCIÓN. 3. DISTRIBUCIÓN EN PLANTAS - DISEÑO. 4. MANUFACTURA. 5. GESTIÓN INDUSTRIAL. I. Zapata Cortes, Julián Andrés. II. Cáceres Gelvez, Sebastián Eduardo. III. Título.

Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín

Palabras claves

| | |
|---------------------------------------|--|
| Sistemas de producción | Problema integrado layout y scheduling |
| Clasificación de sistemas productivos | Layout |
| Manufactura esbelta | Scheduling |
| Lean manufacturing | Decisiones |
| Principios del pensamiento lean | Caso de aplicación |
| Celdas de manufactura | Algoritmos genéticos |
| Distribución de plantas | Confección de prendas de vestir |

Sistemas prácticos para el diseño del layout de plantas industriales con celdas de manufactura

© Martín Darío Arango Serna, PhD, autor, 2024

© Julián Andrés Zapata Cortes, PhD, autor, 2024

© Sebastián Eduardo Cáceres Gelvez, PhD (c), autor, 2024

© Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín,


Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización.

Grupo de I+D+i Logística Industrial- Organizacional “GICO”

Primera edición: Medellín Octubre de 2024

ISBN papel: 978-958-505-725-8 ISBN digital: 978-958-505-726-5

DOI: <https://doi.org/10.15446/edunal.1083>

Licencia Creative Commons 

Imágenes de la carátula tomadas de fuentes libres en Internet:

<https://www.automaticainstrumentacion.com/texto-diario/mostrar/3291440/inteligencia-artificial-abre-nueva-dimension-datos>

<https://ortnoticias.com.mx/reactivan-actividades-plantas-industriales-en-altamira/>

<https://harris-sliwoski.com/es/chinalawblog/how-to-avoid-china-manufacturing-problems-a-primer/>

<https://www.mecalux.com.co/blog/sistemas-automatizados-ejemplos>

Carátula: Silvana Consuelo Castañeda Pérez

Diseño y Diagramación: Silvana Ruíz Moreno, Madaly López

Edición: Todográficas Ltda.

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra y mucho menos con fines comerciales sin la autorización expresa de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

Coordinación editorial:

Centro Editorial - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Cra. 80 No. 65-223, Bloque M9 - Of. 107

Tel: (57-4) 425 5343 E-mail: ceditorial_med@unal.edu.co

Impreso y hecho en Medellín, Colombia

Contenido

| | |
|--|-----------|
| Introducción | 15 |
| Prólogo | 19 |
| 1. Generalidades de los Sistemas de producción | 23 |
| 1.1 Elementos de un sistema de producción..... | 27 |
| 1.2 Clasificación de los sistemas de producción | 28 |
| 1.2.1 Producción por pedidos..... | 29 |
| 1.2.2 Producción por lotes | 29 |
| 1.2.3 Producción en masa..... | 30 |
| 1.2.4 Producción continua..... | 31 |
| 1.3 Sistemas de apoyo a la manufactura | 33 |
| 2. Manufactura esbelta..... | 39 |
| 2.1 Los 5 principios del pensamiento Lean | 42 |
| 2.2 Las tres M's de la manufactura esbelta | 44 |
| 2.3 Desperdicios en los que se enfoque la manufactura esbelta. ... | 45 |
| 2.4 Herramientas de la manufactura esbelta: | 46 |
| 2.5 Sistemas de producción esbelta | 49 |
| 3. Sistemas de celdas de manufactura..... | 53 |
| 4. Distribución de Plantas | 61 |
| 4.1 Tipos de distribución de plantas..... | 67 |
| Distribución por Producto..... | 67 |
| Distribución por Proceso..... | 68 |

| | | |
|-----|--|----|
| | Distribución de tecnología de grupos o celular | 69 |
| | Distribución por posición fija | 69 |
| | Distribución Justo A Tiempo | 70 |
| 4.2 | Problema de la distribución de plantas | 71 |

5. Distribución en planta con áreas desiguales:

| | | |
|-------|---|-----------|
| | modelos y métodos de solución..... | 75 |
| 5.1.1 | Formulación matemática del modelo con áreas desiguales..... | 78 |
| 5.2 | Algoritmos y técnicas de solución | 81 |
| 5.2.1 | Métodos exactos | 81 |
| 5.2.2 | Heurísticas y metaheurísticas | 82 |
| 5.2.3 | Simulación | 83 |
| 5.2.4 | Métodos híbridos..... | 84 |

6. Programación de la producción..... 87

7. Programación de Modelos de programación de la producción en celdas de manufactura flow-shop y flexible flow-shop producción .. 97

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.1 | Modelos de programación de la producción en celdas de manufactura <i>flow-shop para dos máquinas ($m=2$)</i> | 99 |
| 7.2 | Modelos de programación de la producción en celdas de manufactura <i>flow-shop para varias máquinas ($m>2$)</i> | 106 |
| 7.2.1 | Modelos sin enfoques de programación matemática | 106 |
| 7.2.2 | Modelos con enfoques de programación matemática..... | 116 |
| 7.3 | Modelos de Programación de la producción en celdas de manufactura <i>flow-shop</i> con varias máquinas multiobjetivo. ... | 120 |
| 7.3.1 | Modelos sin enfoques de programación matemática | 122 |
| 7.3.2 | Modelos con enfoques de programación matemática | 127 |
| 7.4 | Modelos de simulación en la programación de la producción en celdas de manufactura <i>flow-shop</i> | 128 |
| 7.5 | Modelos de programación de la producción en celdas de manufactura <i>flow-shop</i> flexibles..... | 132 |
| 7.5.1 | Modelos sin enfoques de programación matemática | 132 |
| 7.5.2 | Modelos con enfoques de programación matemática..... | 137 |

| | |
|---|------------|
| 8. Enfoques para el problema integrado de <i>Layout</i> y <i>Scheduling</i> | 141 |
| 8.1 Enfoque de integración secuencial | 143 |
| 8.2 Enfoque de integración simultáneo..... | 146 |
| | |
| 9. Marco para la integración de las decisiones de programación de producción en celdas de manufactura y distribución en planta con áreas desiguales..... | 153 |
| 9.1 Descripción del modelo conceptual integrador..... | 159 |
| 9.1.1 Fase 1: Recolección de datos. | 159 |
| 9.1.2 Fase 2: Definición de las decisiones | 163 |
| 9.1.3 Fases 3 y 4: Optimización y selección de la mejor alternativa. | 166 |
| | |
| 10. Aplicación del modelo en caso de estudio | 169 |
| 10.1 Aplicación de las fases del modelo conceptual. | 172 |
| 10.1.1 Definición y validación de algoritmos genéticos..... | 175 |
| 10.2 Aplicación a una empresa de confección de ropa deportiva..... | 182 |
| 10.2.1 Descripción del caso de estudio. | 182 |
| 10.2.2 Aplicación y optimización de las decisiones del modelo..... | 188 |
| 10.2.3 Análisis de los resultados mediante simulación para el caso de estudio..... | 192 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 201 |
| | |
| ANEXO A..... | 221 |
| LISTADO DE SOFTWARE RELACIONADO CON LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTAS..... | 223 |

Lista de Figuras

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 2.1. | Valor de los desperdicios con respecto a las actividades que generan valor. | 50 |
| Figura 2.2. | La casa de la producción esbelta | 51 |
| Figura 3.1. | Esquemas de las alternativas básicas de distribución en planta | 57 |
| Figura 4.1. | Representación del problema de distribución de instalaciones con áreas desiguales, considerando la norma de la distancia rectilínea | 73 |
| Figura 6.1. | Jerarquía de decisiones en un sistema de producción | 90 |
| Figura 6.2. | Ejemplo de representación de una secuencia de producción en ambientes flow-shop mediante un diagrama de Gantt..... | 95 |
| Figura 8.1 | Ejemplo de modelo de integración de decisiones secuencial. . | 144 |
| Figura 8.2 | Ejemplo de codificación de la solución para el problema integrado de <i>JSSP</i> y <i>FLP</i> | 147 |
| Figura 9.1. | Plano de planta de una instalación utilizando el modelo UAFLP. | 156 |
| Figura 9.2. | Representación de una celda de manufactura de flujo en línea. | 158 |
| Figura 9.3. | Modelo conceptual para la integración de los problemas <i>FSGSP</i> y <i>UAFLP</i> | 160 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figura 10.1 | Estructura de codificación (a) y representación de la solución (b) para la distribución de plantas con áreas desiguales. | 177 |
| Figura 10.2 | Estructura de codificación (a) y representación de la solución (b) para la programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea. | 177 |
| Figura 10.3 | Procedimiento para la aplicación de los GAs en el caso de estudio. | 179 |
| Figura 10.4 | Mecanismos de cruce para los cromosomas de los modelos de a) distribución de instalaciones y b) programación de la producción en celdas de manufactura. | 180 |
| Figura 10.5 | Etapas del proceso de producción propuesto para el caso de estudio. | 184 |
| Figura 10.6 | Disposición de las máquinas en el sistema de celdas de manufactura propuesto: a) CM1, b) CM2 y c) CM3. | 187 |
| Figura 10.7 | Procedimiento de aplicación de los GAs para la optimización integrada de los modelos UAFLP y FSGSP. | 188 |
| Figura 10.8 | Desempeño del GA por generación para la optimización del costo de manejo de materiales. | 189 |
| Figura 10.9. | Desempeño del GA por generación para la optimización de la suma de las tardanzas ponderadas totales. | 190 |
| Figura 10.10. | Mejor alternativa de distribución en planta para la instalación propuesta para el caso de estudio. | 191 |
| Figura 10.11. | Modelos de simulación en Simio® para el estado actual (arriba) y para el estado propuesto (abajo). | 194 |
| Figura 10.12. | Análisis del tiempo de flujo promedio para el estado actual (arriba) y propuesto (abajo). | 198 |
| Figura 10.13. | Análisis del <i>throughput</i> promedio para el estado actual (arriba) y propuesto (abajo). | 199 |

Lista de Tablas

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabla 1.1. | Ventajas y desventajas de los sistemas de producción | 32 |
| Tabla 6.1. | Notación para problemas de programación de la producción | 92 |
| Tabla 7.1. | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con dos máquinas mediante la optimización de la función objetivo..... | 100 |
| Tabla 7.2. | Publicaciones que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con dos máquinas mediante modelos matemáticos..... | 101 |
| Tabla 7.3. | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con varias máquinas sin modelamiento matemático | 108 |
| Tabla 7.4. | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con varias máquinas utilizando modelos matemáticos | 110 |
| Tabla 7.5. | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con múltiples objetivos sin enfoques de modelamiento matemático..... | 121 |
| Tabla 7.6. | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con múltiples objetivos mediante modelos matemáticos | 124 |
| Tabla 7.7. | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura mediante modelos de simulación... | 128 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabla 7.8. | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura <i>flow-shop</i> flexibles sin el uso de modelos matemáticos | 132 |
| Tabla 7.9 | Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura <i>flow-shop</i> flexibles mediante modelos matemáticos | 133 |
| Tabla 10.1 | Descripción y requerimientos de área de los departamentos en la planta actual y propuesta..... | 185 |
| Tabla 102. | Asignación de familias de productos y máquinas a las celdas de manufactura propuestas..... | 186 |
| Tabla 10.3 | Elementos utilizados en la construcción de los modelos de simulación..... | 193 |
| Tabla 10.4 | Análisis de los tiempos de procesamiento, de preparación y de ocio promedio para las máquinas del departamento de costura..... | 196 |

Introducción

Los altos niveles de competitividad actual, generados por los cambios en los procesos de producción global y la dinámica de los mercados, han venido presionando los procesos productivos de las empresas desde las últimas décadas. Esto ha generado que muchas organizaciones se hayan visto rezagadas competitivamente, haciendo que algunas hayan perdido representatividad en el mercado, pero también otras han aprovechado esta oportunidad para crecer y ser más exitosas.

Para sobrevivir a este entorno, las empresas se han visto obligadas a avanzar en el mejoramiento de sus procesos, utilización de nuevas técnicas de optimización, aplicación de las nuevas tecnologías e inteligencia artificial aplicada y en la profesionalización de su personal, en donde los procesos de producción y distribución de las instalaciones han jugado un papel primordial.

Los sistemas de producción se refieren a la agrupación de todas las actividades relacionadas con la generación de valor en cuanto a la transformación de insumos y recursos de la empresa en aquellos productos o servicios finales que la empresa produce y que son entregados a sus clientes. Estos sistemas de producción son consumidores de una gran cantidad de recursos, los cuales si no están bien organizados pueden generar demoras en los procesos y con ello en la entrega de los productos a

los clientes, incremento de los costos de fabricación, pérdidas de calidad en los productos y los procesos, deterioro en la higiene y la salud ocupacional de los trabajadores, modificando negativamente el ambiente laboral y la productividad de la empresa, entre otros elementos que condicionan la competitividad y el éxito de las empresas.

Una de las principales acciones encaminadas a mejorar los procesos productivos y con ello solventar los inconvenientes mencionados anteriormente, es la generación de procesos ágiles y eficientes a través de una correcta distribución de las instalaciones productivas, lo que se conoce también como la distribución de la planta. La distribución de planta es la encargada de organizar y posicionar físicamente todos los elementos requeridos en el proceso productivo, como máquinas, equipos, estaciones de trabajo, personas, equipos manejo de materiales, almacenes de producto en proceso y producto terminado, entre otros, con el fin de lograr flujos de producción eficientes, seguros y con altos estándares de calidad.

En las empresas es posible encontrar diferentes formas de organizar estos procesos productivos y con ello diferentes distribuciones de planta, que básicamente se diferencian dependiendo del tipo de producto y de la cantidad (volumen) a producir. Entre estas posibilidades, la distribución por celdas de manufactura es una de las más sobresalientes, en la cual los equipos y demás elementos para la fabricación son agrupados para elaborar productos y familias de productos similares, a través de técnicas de mejora de procesos de producción, como el lean manufacturing, entre otras.

El diseño de estos sistemas de distribución y de las mismas celdas de manufactura, son una actividad compleja, que requiere de diferentes

enfoques y técnicas de optimización, de forma que permitan asegurar el mejor desempeño posible en cuando a la reducción de tiempos, costos de producción, fallas e ineficiencias en los procesos, lo cual es el objeto de estudio de este libro.

Este libro de investigación surge en el marco del proyecto de investigación titulado “Modelo para la programación de la producción en enfoques de celdas de manufactura, integrando el diseño de plantas esbeltas, para el caso del sector de la confección de prendas de vestir en Colombia” se encuentra distribuido en diez capítulos que tienen como finalidad ilustrar al lector en sistemas prácticos para el diseño de instalaciones de producción que utilizan celdas de manufactura, para lo cual, los tres primeros capítulos presentan fundamentos teóricos sobre procesos de producción (Capítulo 1), los conceptos de manufactura esbelta – Lean manufacturing (capítulo 2), y la presentación de los sistemas de celdas de manufactura (capítulo 3).

Los siguientes 5 capítulos abordan los elementos más relevantes relacionados con el diseño de los procesos productivos con celdas de manufactura. Para esto, se presentan las principales teorías y enfoques sobre la distribución de plantas (Capítulo 4), los modelos y métodos para la distribución en plantas con áreas desiguales (capitulo 5), los elementos básicos de la programación de la producción (capitulo 6), los modelos de programación en celdas de manufactura flow-shop y flexible flow-shop (capitulo 7) y los enfoques que posibilitan la integración de los problemas del layout y scheduling simultáneamente (capitulo 8).

Luego de esto, se presentan dos capítulos con el objetivo de ejemplificar la implementación de estos diseños, mediante el marco para la integración de

las decisiones de programación de producción en celdas de manufactura y distribución en planta con áreas desiguales (Capítulo 9) y un ejemplo de la aplicación de estos elementos mediante un caso de estudio (Capítulo 10).

De esta forma, invitamos al lector a continuar con la lectura de este libro, esperando que se convierta en una guía para obtener y profundizar los conocimientos que faciliten proponer mejoras en el diseño de cómo están distribuidos los componentes de trabajo de las plantas industriales (Layout) utilizando celdas de manufactura y de esta forma a aumentar los niveles de productividad y rentabilidad de las empresas.

Prólogo

El desarrollo de la sociedad en los últimos tiempos, influenciado en gran parte por los grandes saltos tecnológicos, que se han dado sustancialmente desde 1960 han generado transformaciones en la Industria moderna, llegando a posicionar las tecnologías inteligentes en el centro de los procesos productivos y de las cadenas de suministro (industria 4.0), así como generar la digitalización de estos procesos con una mayor colaboración entre maquinas, personas y las tecnologías (Industria 5.0).

Esta evolución tecnológica busca mayor competitividad, lo que implica mayor productividad, mejor posicionamiento competitivo e innovación, en los sistemas productivos. Para el logro de esto, se ha requerido la implementación de diferentes desarrollos tecnológicos en los procesos y una gestión del conocimiento permanente en las organizaciones para mejorar las capacidades del personal. Como resultado, se ha generado un mejor desempeño organizacional de los procesos productivos y de las personas, con innovaciones sorprendentes en muchos casos.

Sin embargo, para lograr la adopción de las estas tecnologías y aprovechar al máximo el potencial de las mismas, es necesario generar la mejor organización posible de los procesos al interior de las empresas, lo que conlleva a que las actividades al interior de los sistemas productivos se realicen de forma eficiente y efectiva, lo cual establece las bases para que

la tecnología se implemente correctamente y entregando todo su potencial en el desempeño productivo y competitivo a las empresas. En esta línea, los procesos productivos deben diseñarse para que su funcionamiento sea el mejor posible, lo cual se logra en parte, con la ampliación de metodologías que permitan encontrar como distribuir y disponer los elementos de trabajo al interior de las plantas y en cada las etapas productivas a lo largo del proceso productivo. Una correcta distribución de las plantas y sus procesos, conlleva a sistemas productivos capaces de aprovechar las nuevas tecnologías y con esto a mayores niveles de eficiencia, productividad y competitividad, pero también a que sus operaciones se realicen de manera más segura, flexible, amigable para los trabajadores y el ambiente, así como cumpliendo con las normatividad requerida.

Es por esto que toma importancia el presente libro titulado “Sistemas prácticos para el diseño del layout de plantas industriales con celdas de manufactura”, ya que plantea a la comunidad académica y profesional una propuesta de cómo se puede mejorar el desempeño organizacional en los procesos productivos, para lograr mayores eficiencias como producto de una distribución optima de las áreas involucradas en los procesos de manufactura que involucran celdas de producción. La calidad de esta propuesta está garantizada por las capacidades profesionales y humanas de sus autores, de las que se puede dar fe como conocedor de las competencias del profesor Martín Darío Arango Serna, adquiridas durante su caminar profesional y académico, acompañado de su gran talento humano, aspectos estos de los que soy testigo, pues fui su compañero en sus estudios doctorales en la Universidad politécnica de Valencia - España, como también en múltiples actividades desarrolladas por los dos, en los últimos 23 años. También por las capacidades desarrolladas por el profesor Julian Andres

Zapata Cortés, discípulo del profesor Arango Serna en su maestría y en su estudio doctoral, quien cuenta con grandes condiciones humanas, de lo que soy testigo, pues tuve oportunidad de participar en su proceso educativo y en estos últimos años en actividades compartidas en eventos académicos y que no decir de Sebastián Eduardo Cáceres Gelvez, que siendo discípulo de los profesores Arango Serna y Zapata Cortés, ha desarrollado múltiples competencias académicas y profesionales con la influencia de dichos grandes maestros.

El libro trata sobre los aspectos básicos de los procesos y la conceptualización sobre manufactura esbelta, los sistemas de celdas de manufactura, las principales teorías de distribución de plantas, los modelos y métodos para la distribución en plantas con áreas desiguales, los elementos básicos de la programación de la producción como insumo y consecuencia de las decisiones de distribución de la planta, los modelos de programación en celdas de manufactura *flow-shop* y *flexible flow-shop* y los enfoques que posibilitan la integración de los problemas del layout y scheduling simultáneamente. Todo esto recae en una ejemplarización de implementación de diseños, mediante el marco para la integración de las decisiones de programación de producción en celdas de manufactura y distribución en planta con áreas desiguales, mediante un caso de estudio, presentado de manera clara, delicada y precisa.

El libro ***“Sistemas prácticos para el diseño del layout de plantas industriales con celdas de manufactura”***, se convierte en una pieza cognitiva con gran valor agregado, siendo de estudio obligado en carreras de Ingeniería, así como para personas interesadas en poner al día sus conocimientos, en distribución de plantas industriales y de lectura necesarias para aquellos

y aquellas que se quieran informar de los temas abordados por el libro, siendo importante también para asesores, consultores y personas de producción, empresas, que pretendan orientar procesos de mejoramiento en plantas industriales empleando conceptos y técnicas presentadas en esta importante obra.

Con gran aprecio para sus autores.

CARLOS ARTURO CANO HERNANDEZ
Doctor Ingeniero Industrial.

1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Un sistema de producción se puede considerar como un conjunto de actividades enfocadas a la generación de valor en una empresa, en el cual se modifican unos insumos en productos finales con valor agregado, mediante una serie de operaciones, almacenamiento e inspecciones. La fabricación de un producto o servicio puede entenderse entonces como un sistema de producción. Por ejemplo, la fabricación de Zapatos implica la utilización de diversos insumos como cuero, fibras sintéticas, pegamento, hilos, cordones, cortadoras, prensas, plantillas y trabajadores, entre otros factores de producción. Una vez adquiridos estos insumos, se almacenan hasta su utilización. Y para la fabricación de estos se desarrollan múltiples operaciones manuales, como cortar, pegar, tejer y pintar, mediante las cuales los insumos se transforman en productos finales.

Durante la terminación de estas operaciones o al final de todo el proceso de fabricación se realizan actividades de inspección con el fin de asegurar que los productos cumplan con los requisitos de calidad definidos. Por último, los productos son almacenados en un lugar designado hasta su despacho a los consumidores o clientes.

En su nivel más básico, un sistema de producción es un proceso de transformación de recursos a bienes o servicios. Estos recursos, que también son llamados factores de producción, son la mano de obra, el capital, las instalaciones, las máquinas y los materiales. Un sistema de producción puede ser visto como un proceso, ya que en este se lleva a cabo la entrada de materias primas (recursos materiales, información, personas, efectivo, etc.), se realiza un conjunto de procedimientos y pasos

para transformar estos insumos en productos terminados, los cuales se entregan a los clientes o consumidores. La función de inspección tiene como finalidad realizar el control adecuado del sistema, implicando realizar retroalimentaciones a todas las etapas del proceso.

Una empresa manufacturera debe contar con sistemas que le permitan realizar eficientemente sus operaciones de producción, tales como mano de obra, equipos y procedimientos. Estos sistemas de producción se pueden dividir en dos categorías: instalaciones y sistemas de apoyo a la manufactura. Las instalaciones son el equipo físico y su disposición en la planta, mientras que los sistemas de apoyo a la manufactura abarcan los procedimientos para gestionar la producción y resolver problemas técnicos y logísticos relacionados con el flujo de materiales, el movimiento de materiales y la garantía de que los productos cumplen con criterios de calidad definidos por la empresa.

Claramente estos tipos de sistemas de producción involucran al personal, ya que son ellos quienes hacen que estos sistemas funcionen. Este personal puede clasificarse en dos categorías: el personal operativo, que está conformado por los trabajadores de producción encargados de asistir la manufactura y por las personas responsable de operar el equipo; y el personal profesional, que incluye trabajadores administrativos, los cuales se encargan de apoyar la manufactura.

En su nivel más *básico*, un sistema de producción es un proceso de *transformación* de recursos a bienes o servicios. Estos recursos, que también son llamados factores de producción, son la mano de obra, el capital, las instalaciones, las máquinas y los materiales.

Estos sistemas de producción deben estar organizados, por lo cual es fundamental su planificación, definición de su objetivo y desarrollo de un sistema de control y mejora. Los sistemas productivos no deben funcionar como entidades aisladas dentro de la organización, sino que deben ser consideradas como parte del sistema y corresponder con los intereses de la organización.

Una característica clave de los sistemas de producción son los flujos físicos que hacen parte de sí, como es el caso del flujo de materiales, de productos semiterminados y de productos terminados. También se tienen los flujos de información que acompañan y dan soporte a estos flujos físicos.

1.1 Elementos de un sistema de producción.

Los elementos más representativos de un sistema de producción son los insumos, el proceso de conversión y los productos finales, los cuales son los tres grandes componentes que generan valor de cara al cliente.

■ Insumos

Son las materias primas, además de otros componentes o piezas, los diferentes agentes de producción (operadores, coordinadores, personal administrativo, proveedores, clientes, etc.), los métodos, el tiempo y otros agentes de producción como personas máquinas, instalaciones, herramientas y equipos de soporte.

Los métodos son los medios para la realización de las actividades productivas, pudiendo ser las plantillas de instrucciones, los diseños, los procedimientos, los manuales, entre otros.

■ **Proceso de conversión**

El proceso de conversión se refiere a las operaciones y actividades directas o de apoyo que de forma manual, mecánica o química generan la conversión de los insumos en los productos finales. Las principales actividades de apoyo son la planificación y control de producción, el abasteciendo de insumos, la logística requerida, el control de la calidad, la prueba de producto, el almacenamiento de productos terminados y semiterminados, etc.

Es fundamental que el proceso de conversión tenga una capacidad acorde con la demanda de productos por parte de los clientes y del abastecimiento de proveedores, lo cual asegura que el proceso se realice de manera adecuada.

■ **Productos finales**

Los productos finales son la razón de ser de la empresa y son los que permiten asegurar el ingreso de dinero desde los clientes a través de las ventas. Estos productos pueden ser bienes como productos, piezas o partes terminadas o pueden ser servicios que presta la empresa.

1.2 Clasificación de los sistemas de producción

Los sistemas de producción pueden ser clasificados de acuerdo a la forma como desarrollan su proceso de conversión, encontrándose la producción por pedidos, la producción por lotes, la producción en masa y la producción continua, especialmente. A continuación, se realiza una descripción de estos tipos de producción y más abajo se realiza una comparación de las ventajas y desventajas de estos.

1.2.1 Producción por pedidos

La producción por pedidos, como su nombre lo dice, obedece a procesos productivos a medida de acuerdo con el pedido recibido por parte del cliente. En este tipo de producción se pueden generar una alta variedad de productos, normalmente con poco volumen de producción o demanda, los cuales deben cumplir las especificaciones de los clientes. Algunas características importantes de este tipo de producción es que debido a que normalmente son producciones a medida, los tiempos de fabricación son lentos y los costos de fabricación son altos, al no tener la capacidad de lograr grandes economías de escala, por lo que la definición de los tiempos de entrega y los costos del producto deben ser especialmente fijados por los clientes y los fabricantes.

En este tipo de sistema de producción es habitual contar con máquinas de uso general, que se distribuyen de acuerdo a las exigencias de los de productos a desarrollar, siendo habitual que cada pedido implique una secuencia y distribución diferente. Otras de las características más representativas de estos sistemas son:

- Se requiere de un alto número de insumos como materiales, herramientas y piezas para mantenimiento en inventario.
- El personal de producción es altamente calificado.
- Se requiere una planificación detallada de los equipos y las personas que den cumplimiento a los requerimientos de cada producto.

1.2.2 Producción por lotes

El sistema de producción por lotes se enfoca en la fabricación en grupos o lotes de productos, los cuales van pasando por diferentes etapas de producción, que van agregando valor a los productos. Este sistema

permite producir diferentes productos simultáneamente en cantidades predefinidas y se completan todas las etapas de producción para cada lote antes de pasar al siguiente. Dependiendo de los tipos de productos, los lotes pueden tener secuencias de producción particulares.

Habitualmente este tipo de sistema de producción fabrica una cantidad limitada de productos. Entre sus principales características se encuentran:

- La maquinaria es flexible para los diferentes productos a fabricar.
- Los tamaños de los lotes pueden variar.
- Se requieren tiempos de alistamiento de las máquinas entre lotes, especialmente cuando cambian las condiciones de los productos y los tamaños del lote.

1.2.3 Producción en masa

La producción en masa se enfoca en la producción eficiente y a gran escala de productos estandarizados, lo cual permite obtener bajos costos de fabricación. La idea es producir un mismo producto muchas veces de forma continua, utilizando distribuciones de maquinaria estandarizadas y especializadas. Habitualmente las máquinas del proceso de fabricación son ubicadas en línea de acuerdo con el diseño de producto, lo cual junto con la estandarización de procesos, hace que los productos finales sigan la misma ruta durante de producción. Entre las características por resaltar de este tipo de sistema de producción se tiene:

- Las máquinas tienen un único propósito.
- Tiene alta capacidad y velocidad de producción.
- Los productos y los procesos son estandarizados.
- Se utilizan para grandes volúmenes de productos.

- Bajos tiempos de producción.
- Permite reducir el Inventario en proceso.
- Relativa sencillas en la planificación y control de la producción.
- El flujo de producción es continuo.

1.2.4 Producción continua

La producción continua se diferencia de la producción en masa por la cantidad de trabajo mecánico que se involucra en el proceso productivo, ya que mientras en la producción en masa las personas y las maquinas se relacionan entre sí, en la producción continua, la mayoría del trabajo se realiza por sistemas automatizados, mecanizados y robóticos.

Similar a la producción en masa, en la producción continua la maquinaria se distribuye siguiendo una secuencia estándar, por la que pasan los productos hasta la salida del producto final, para lo cual normalmente se realiza el uso de dispositivos de manejo de materiales automatizados. Entre las características de este tipo de sistema de producción se tiene:

- Manejo de los materiales automatizado.
- Maquinaria dedicada.
- Sistema de producción predeterminado e inflexible.
- Planificación y programación rutinaria.
- El proceso sigue una secuencia predeterminada de operaciones.

A continuación, se presenta un análisis de ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de producción mencionados:

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de los sistemas de producción

| Sistema de producción | Ventajas | Desventajas |
|-------------------------------|---|--|
| Producción por pedidos | Debido a la diferencia y especificidad de los pedidos, los colaboradores se vuelven más creativos y recursivos. Incentiva la creatividad de los trabajadores. | Genera mayores inventarios y costos de fabricación. Pocas veces permite tener economías de escala. Constantes cambios en la configuración del sistema productivo. La planificación de la producción es compleja y variable. |
| Producción por lotes | Permite una alta utilización de la maquinaria y de la planta en sí. La inversión requerida en el sistema productivo es menor que los otros sistemas. Permite flexibilidad en los lotes y los pedidos. | Genera flujos de productos irregulares y largos. Implica altos costos de configuración debido a los cambios para nuevos lotes. La planificación de la producción es compleja. |
| Producción en masa | Permite una mayor utilización del sistema de producción. Mayor tasa de producción. Menor tiempo de ciclo de los productos. Permite reducir los inventarios. Bajo costo de fabricación unitario | Inflexibilidad en el sistema productivo. Una falla en una maquina puede hacer parar todo el sistema productivo. El tiempo de ciclo se limita por la operación más lenta. La inversión en el sistema productivo es alta. Requiere operadores menos calificados. |

| Sistema de producción | Ventajas | Desventajas |
|------------------------------|--|--|
| Producción continua | <p>La cantidad de personas requeridas es muy baja.</p> <p>Los procesos son estándar.</p> <p>Permite altos volúmenes de producción.</p> <p>Costo unitario de producción bajo.</p> | <p>Inversión muy alta.</p> <p>Inflexibilidad en el sistema productivo.</p> <p>La posibilidad de diferenciar los productos es muy baja.</p> |

Fuente: Elaboración propia.

1.3 Sistemas de apoyo a la manufactura

Una de las principales actividades de los procesos de producción es la preparación de las instalaciones, maquinas, personas, recursos y procesos administrativos requeridos para el funcionamiento y mantenimiento eficiente de estos, de forma que se logren satisfacer las necesidades de los clientes. Estas actividades componen los sistemas de apoyo a la manufactura, los cuales, si bien no tienen contacto directo con el producto, son los responsables del diseño, planificación y control de las operaciones productivas. Estos sistemas de apoyo son realizados por personal especialmente encargado de dichas funciones y habitualmente se organizan en los departamentos de Ingeniería, control de la calidad y la planeación y control de la producción.

- *Ingeniería de manufactura.* Es el área encargada de decidir, planificar y diseñar los procesos de manufactura.
- *Planeación y control de la producción.* Se encarga de planificar y organizar las actividades logísticas en la manufactura, entre las que se encuentran el abastecimiento de insumos, el cuidado de los productos, la programación y el desarrollo de la producción.

- *Control de calidad.* Se encarga de asegurar que los productos desarrollados por el proceso productivo cumplan con los requisitos establecidos por el proceso y los clientes.

Organización de los sistemas de producción

La organización de las actividades es una de las principales funciones de los administradores y los gerentes, siendo necesario la definición y desarrollo de la estructura empresarial, de las relaciones entre las partes de la empresa y la asignación del personal, para asegurar el correcto funcionamiento de todas las actividades al interior de la empresa. Los sistemas de producción son *únicamente una parte de la empresa y deben corresponder a esta estructura, de forma que este alineado con las necesidades de los clientes y los demás elementos de la empresa.* Entre los demás elementos que se deben contemplar en la organización de la empresa y que se tienen que alinear con los procesos productivos, se encuentran las áreas o departamentos de:

- Mercadeo
- Financiera
- Recursos Humanos
- Contabilidad
- Logística y administración de la cadena de suministro
- Investigación y desarrollo
- Mantenimiento e ingeniería
- Entre otros dependiendo de la empresa.

El tamaño y relevancia de cada una de estas áreas o departamentos depende enteramente del tipo de organización, el sector en que se desenvuelven, la estrategia empresarial y las decisiones de los gerentes y los administradores. Dependiendo de cómo se distribuyen y organicen estas áreas o departamentos, se puede definir el tipo de organización, encontrándose las siguientes opciones.

- Organización por funciones.
- Organización por ubicación.
- Organizaciones por cliente.
- organizaciones por clientes.
- Organizaciones por productos.
- Organizaciones por procesos.
- Organizaciones híbridas.
- Organizaciones por proyectos.
- Organizaciones matrices.

En las Organización por funciones, como su nombre lo dice, las tareas y responsabilidades son agrupadas con base en las funciones que desempeñan. De esta forma, puede haber un departamento de ventas, uno de mercadeo, otro de producción y así sucesivamente. Cada departamento se especializa en su función específica, aunque es necesaria la colaboración y coordinación con los demás departamentos para asegurar el correcto desempeño organizacional de cara al cliente.

En una organización por ubicación, la ubicación geográfica define las unidades o divisiones de la empresa. Cada ubicación puede tener su propia estructura jerárquica y equipos de trabajo. Es necesario que exista una coordinación centralizada de las diferentes ubicaciones para asegurar la coherencia y la dirección de la organización.

En una organización por cliente, las divisiones se generan de acuerdo a los diferentes grupos de clientes o segmentos de mercado, en donde cada unidad se orienta a cada uno de estos. Este tipo de organización conlleva a una mayor especialización y enfoque en la atención y satisfacción de los clientes.

Similar a la organización por clientes, en una organización por productos, divisiones se crean en función de los diferentes productos o líneas de productos de la empresa. Cada unidad se enfoca en el desarrollo, producción, comercialización, ciclo de vida y servicio al cliente del producto en que se especializa.

En una organización por procesos, las divisiones se definen de acuerdo a los diferentes procesos clave de la empresa. En este tipo de organización, en vez de concentrarse en las funciones o los productos, la organización se da en torno a las etapas del proceso empresarial, como la adquisición de materias primas, la producción, la distribución y la atención al cliente. Esto permite lograr una mejor coordinación e interacción entre las demás divisiones, logrando con esto mejoras en la eficiencia operativa de los procesos.

Las organizaciones híbridas combinan diferentes tipos de organización, pudiendo incluir elementos de varias estructuras organizativas, dependiendo de las necesidades de la empresa y los beneficios que estas generen. De esta forma, una organización híbrida puede tener unidades organizadas por funciones en algunos departamentos, mientras que en otros puede utilizar una estructura por productos o por procesos.

Por su parte, una organización por proyectos se estructura de acuerdo a proyectos específicos, para lo cual se forman equipos multidisciplinarios con roles y responsabilidades claras, con una duración definida por el proyecto. Cada vez que se termina un proyecto, los miembros son distribuidos en otros o vuelven a sus funciones originales en la organización. Este tipo de organización genera mayor especialización, permite aprovechar mejor las

capacidades de las personas y las unidades, genera flexibilidad y produce una mejor respuesta a los cambios que puedan ocurrir en los proyectos

Por su parte, las organizaciones matriciales se utilizan en empresas que están orientadas en proyectos de gran escala y habitualmente combinan dos o más tipos de estructura organizativa, generalmente una estructura funcional y una estructura por proyectos, produciendo una mejor utilización de los recursos, la especialización de las funciones y la coordinación entre departamentos. Una característica típica de esta organización es que los trabajadores tienen un jefe funcional y son asignados a equipos de proyectos.

2 MANUFACTURA ESBELTA

La manufactura esbelta (Lean Manufacturing) nació en Japón y puede definirse como una filosofía enfocada a la reducción de desperdicios (Cuggia-Jiménez et al., 2020; González Correa, 2007). Este enfoque se fundamenta en un conjunto de “Herramientas” orientadas a identificar y eliminar los posibles desperdicios incurridos en la empresa, a la mejora en la calidad y a la reducción del tiempo y del costo de los procesos productivos (González Correa, 2007). Su origen se atribuye a la industria automotriz, especialmente al caso del sistema de producción Toyota (Cuggia-Jiménez et al., 2020).

Esta filosofía ofrece múltiples beneficios a las empresas que la adoptan, entre las cuales se encuentran:

- Aumento de la calidad.
- Aumento de la vida útil de la maquinaria.
- Aumento de las horas hombre y horas máquina.
- Aumento de rendimientos.
- Continuidad en los procesos de producción.
- Disminución de la capacidad ociosa.
- Disminución de la sobreproducción.
- Eliminación de residuos.
- Limpieza de las cadenas de producción y los espacios en piso.
- Mejor uso y eficiencia de los equipos y maquinarias.
- Mejora en el balanceo de funciones en los procesos productivos.
- Mejores procesos de transporte, inventarios y control de calidad.
- Reducción de costos.
- Reducción de los tiempos de espera y tiempos muertos.
- Reducción de tiempos de ciclo.
- Reducción del tiempo de entrega de productos (lead time).

La Manufactura Esbelta implica el uso de múltiples herramientas que buscan reducir y eventualmente eliminar todas las actividades y operaciones que no le agregan valor al producto, servicio y a los procesos en la empresa, lo que en definitiva permite generar mayor valor en cada actividad.

La implantación de Manufactura Esbelta es importante en diferentes áreas, ya que se emplean diferentes herramientas, beneficiando no solo a la empresa, sino también a sus empleados (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

2.1 Los 5 principios del pensamiento Lean

La filosofía Lean contempla varios principios que ayudan a enfocar a las empresas y profesionales que buscan su implementación, como una guía para lograr la eliminación de los desperdicios, la mejora de la eficiencia y la maximización del valor para el cliente. De acuerdo con Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina (2017) los 5 principios de la filosofía Lean son:

- **Hacer Únicamente “lo que es necesario, cuando es necesario y en la cantidad necesaria”**

Lo que es necesario significa la referencia de productos que *únicamente* está pidiendo el cliente. Cuando es necesario significa que se realice en el momento en que lo pide el cliente. Y la cantidad necesaria implica producir y entregar solamente la cantidad pedida por el cliente.

- **La calidad debe ser parte inherente del proceso**

Esto implica que los operarios deben tener la autoridad para detener el proceso si existe el riesgo de producir piezas defectuosas (jidoka) y que los equipos dispongan de sistemas a prueba de fallas (poka-yoke) que impidan el procesado de piezas defectuosas.

- **El tiempo total de proceso debe ser mínimo (Lead Time ó Total Productive Cycle Time)**

El tiempo total de proceso es el tiempo total que se tarda la organización desde que llega la materia prima a las instalaciones hasta que sale el producto terminado para el cliente. Generar mayor rapidez en este tiempo de proceso, permite recuperar de forma más rápida la inversión realizada en la materia prima y los procesos, eliminando inventarios innecesarios y tiempos de espera inútiles.

- **Alta utilización de máquinas y mano de obra**

Para obtener una mayor rentabilidad en la empresa, es necesario hacer el mayor uso posible y responsable de los recursos y activos disponibles en la empresa, entre los que se tienen las máquinas y la mano de obra. Es importante considerar que una alta utilización de mano de obra NO significa excesos ni abusos de los trabajadores, sino una estandarización de las buenas prácticas para una óptima eficiencia, así como un equilibrio de las tareas de todos los empleados (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

- **Mejora Continua (KAIZEN).**

Un elemento fundamental de la filosofía lean, es entender que la mejora de los procesos nunca acaba, siendo posible encontrar siempre formas de realizarlos de forma más eficientes y productivos, lo cual aplica para procesos operativos, tácticos y estratégicos, por más que la filosofía se centre en aquellos de carácter operativos a nivel de la manufactura.

2.2 Las tres M's de la manufactura esbelta

La filosofía de la manufactura esbelta utiliza tres términos para identificar los desperdicios que deben ser eliminados en las empresas. De acuerdo con barra-Balderas & Ballesteros-Medina (2017) estos términos se definen como:

Muda.

Se define como cualquier actividad en un proceso que consume recursos y que no agrega valor al producto o servicio desde el punto de vista del cliente; la eliminación del desperdicio es la forma más eficiente de aumentar la rentabilidad de cualquier organización por eso es importante entender exactamente qué es y dónde se encuentra. Y lo que es más importante, sin aumentar el estrés de las personas. No se trata de hacer más, sino de hacerlo mejor. El gurú Taiichi Ohno identificó 7 formas diferentes de desperdicios que se dan en cualquiera de las fases de realización de un producto o servicio:

1. *Sobreproducción: producir más o antes de lo necesario.*
2. *Inventarios: cualquier acumulación de materiales o información.*
3. *Sobre proceso: procesos innecesarios.*
4. *Esperas: tiempos perdidos en las máquinas o personas.*
5. *Reprocesos: por defectos o inspecciones.*
6. *Transportes: De productos, materiales o información de un lugar a otro.*
7. *Movimientos: innecesarios de personal por zona de trabajo.*

Mura.

Cualquier variación no prevista que produce irregularidad en el proceso y provoca desequilibrio.

Muri.

Cualquier actividad que requiere un estrés o esfuerzo poco razonable por parte del personal, material o equipo, provocando cuellos de botella (la acumulación de tareas en una determinada fase del proceso), tiempos muertos.

Los tres conceptos van juntos ya que cuando un proceso no está equilibrado (mura), se produce una sobrecarga en el equipo, las instalaciones y las personas (muri) que dará lugar a actividades sin valor añadido (muda)”.

2.3 Desperdicios en los que se enfoque la manufactura esbelta.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la manufactura esbelta se centra en eliminar los posibles desperdicios en la organización, por lo cual es fundamental entender cuáles son estos tipos de desperdicios, los cuales se clasifican principalmente en desperdicios por movimientos, transporte, corrección, Inventarios, espera, sobre-procesamiento y sobre-producción:

- **Desperdicio por Movimientos:** Se refiere a los movimientos innecesarios o excesivos de los trabajadores y los equipos para poder efectuar las operaciones de las empresas.
- **Desperdicio por Transporte:** Se refiere a los movimientos innecesarios o excesivos del transporte de material entre estaciones de trabajo, área de producción, almacenes, etc.
- **Desperdicio por Corrección:** Se refiere a los reprocesos, trabajos adicionales, reprocesamiento, reparación o corrección realizada al producto por problemas de calidad. Este tipo de desperdicio incluye las inspecciones toda vez que se definen como un mecanismo para contener los errores en el lugar en que se producen.

- **Desperdicio por Inventarios:** Se refiere a los excesos de materiales como insumos, productos semiterminados, productos terminados y suministros en los que incurre la empresa para hacer frente a las variaciones del mercado o la oferta.
- **Desperdicio por Espera:** Se refiere a los tiempos muertos o tiempos ociosos en las maquinas, personas, operaciones y estaciones de trabajo como producto de la falta de equipos, insumos o información para el desarrollo de las actividades productivas en la empresa.
- **Desperdicio por Sobre-producción:** Se refiere a los elementos y productos que se producen de más en la empresa por desarrollar los procesos y actividades más rápido y en mayor cantidad de lo estipulado por las especificaciones del producto. Esto implica entregar más pronto de lo requerido por el siguiente proceso ocasionando la generación de inventarios innecesarios.
- **Subutilización del talento:** Se refiere al desaprovechamiento del conocimiento, habilidades y experiencia de los trabajadores involucrados en el proceso. Este desperdicio se evidencia en la falta de participación en los procesos de toma de decisiones, el empoderamiento y autonomía del trabajador o la ausencia o poca oportunidad de desarrollo y crecimiento de los empleados.

2.4 Herramientas de la manufactura esbelta:

La filosofía *Lean* utiliza un conjunto herramientas y técnicas que ayudan a identificar y eliminar desperdicios, mejorar la eficiencia operativa, la creación de valor de los procesos y productos de cara al cliente e impulsar la mejora continua. Las herramientas más comunes utilizadas en la filosofía Lean son:

5's: Metodología para mejorar el orden y la limpieza en el lugar de trabajo. Se basa en 5 principios que son:

- *Seiri*: Selección o clasificación.
- *Seiton*: Orden u organización.
- *Seiso*: Limpieza
- *Seiketsu*: Estandarizar
- *Shitsuke*: Disciplina.

La implementación de las **5^s** mejora la eficiencia, la seguridad y el ambiente de trabajo (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

VSM: Es una herramienta que permite la visualización y análisis de todo el proceso, para de esta manera entender completamente el flujo de materiales e información para que un producto o servicio llegue al cliente. Esta herramienta permite identificar las actividades que no agregan valor al proceso (desperdicios), cuellos de botella y oportunidades de mejora en los flujos, para posteriormente proponer actividades conducentes a mejorarlos.

Kan-Ban: Sistema de gestión de los materiales que, por medio de controles de tipo visual, mediante tarjetas y señales, permite indicar el momento y la cantidad en que estos se deben abastecer o producir, de forma que se asegure un correcto flujo de trabajo evitando excesos de inventario y sobreproducción.

Justo a Tiempo (Just-in-Time): Enfoque que propende producir y entregar los productos o servicios en el momento justo en que son demandados, permitiendo reducir los inventarios y las esperas en los sistemas productivos, lo que conlleva a disminuir costos y aumentar la eficiencia de estos.

Poka Yoke: Técnica que se basa en diseñar los sistemas y dispositivos para evitar los simples errores humanos que generan fallas y defectos en el proceso de producción.

SMED (Single Minute Exchange of Die): Técnica que busca reducir el tiempo de cambio de herramientas, configuraciones en los equipos de producción y preparación de máquinas en los procesos productivos. Permite aumentar la flexibilidad y capacidad de respuesta al permitir cambios rápidos y eficientes.

Kaizen: Filosofía de mejora continua, que tiene como fundamento la búsqueda de un mejor desempeño en cuanto a calidad, costos, respuesta, tiempos, velocidad, productividad, seguridad y flexibilidad, entre otros. Fomenta la participación activa y la generación de ideas para la mejora en la organización.

Hoshin Kanri: Sistema gerencial, que permite establecer, desplegar y controlar los objetivos de la alta dirección y los correspondientes medios para asegurar su logro en todos los niveles de la organización, basándose en el ciclo PHVA (Planear - Hacer - Verificar - Actuar) (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

Celda de manufactura: Es el conjunto de personas, máquinas, materiales y métodos ubicados en orden en un proceso de producción, generalmente más grande que una sola máquina y menor que un departamento (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

Jidoka: Se refiere a la habilidad del equipo de producción, incluido una simple máquina para identificar errores en el funcionamiento y evitar la generación de defectos. Una definición alterna es la automatización con toque humano (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

Trabajo en equipo: Los beneficios de la aplicación y las diferentes herramientas y técnicas que ofrece *Lean* no son alcanzables si no se cuenta con un elemento importante: el trabajo en equipo (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017). Hernandez-Matias et al. (2020)

Argumenta que la implementación de la manufactura esbelta no es un esfuerzo individual y por el contrario las empresas que logran los mejores resultados y rendimiento son aquellas que tienen como base el trabajo en equipo, el cual aumenta la productividad, la innovación y la satisfacción laboral.

Sistema Andón: Es usado por los operadores para indicar posibles problemas o interrupciones en la línea de ensamble. También puede ser utilizado para proveer retroalimentación al personal de materiales, mantenimiento y producción; sobre necesidades de producción, problemas con los equipos, tiempos muertos, etc. (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

Mantenimiento Productivo Total (TPM): TPM es un programa de fabricación que busca maximizar la eficacia de los equipos y eliminar averías mediante la participación y motivación de todo el trabajo equipo de trabajo, lo que ayuda a mantener las plantas de manufactura y equipos en su nivel más productivo (Khalfallah & Lakhal, 2021). Es un cambio de actitud en el operador ya que se le capacita para realizar un mantenimiento autónomo y conservar el funcionamiento óptimo de su máquina o equipo (Ibarra-Balderas & Ballesteros-Medina, 2017).

2.5 Sistemas de producción esbelta

La producción o manufactura esbelta (*lean manufacturing*) es un sistema de producción que tuvo su origen en el sistema de producción de Toyota (Womack et al., 1990) y que se enfoca en la reducción de los desperdicios (*muda*), de la variabilidad (*mura*) y de la sobrecarga de trabajo (*muri*), con el fin de lograr mayor satisfacción de los clientes, mientras se utilizan menos recursos, en comparación con otros sistemas de producción, como el sistema de producción en masa (Dennis, 2015; Womack et al.,

1990). La palabra japonesa muda se refiere a aquellas actividades que no agregan valor para el cliente, y por las cuales este no está dispuesto a pagar (Dennis, 2015). La Figura 2.1 presenta los diferentes tipos de desperdicios que se pueden identificar en una organización productiva, en donde estos representan aproximadamente el 95% del total de actividades en un proceso cuando no se han aplicado los principios de producción esbelta (Dennis, 2015; Cáceres-Gelvez, 2021).

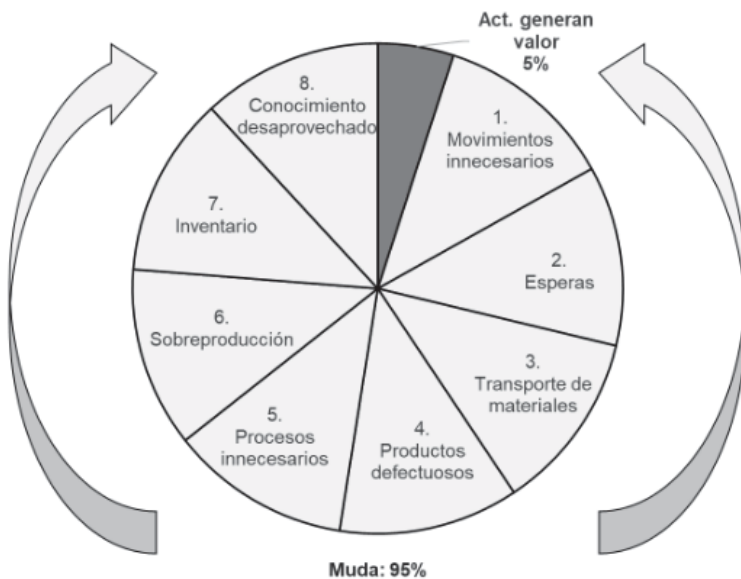


Figura 2.1. Valor de los desperdicios con respecto a las actividades que generan valor.
Fuente: Adaptado de Dennis (2015)

Los sistemas de producción esbeltos buscan eliminar todos los desperdicios que puedan identificarse en un sistema productivo, además de la variabilidad y la sobrecarga de trabajo que, en conjunto, limitan la productividad de una organización (Dennis, 2015; Socconini, 2009). Para lograr esto, la producción esbelta se fundamenta en unos principios de estabilidad y estandarización, en donde los pilares de producción justo a tiempo (just-in-time production) y automatización con toque humano (jidoka) se establecen para alcanzar las metas de una organización.

En la Figura 2.2 se muestra la casa de lean manufacturing, en donde se representan estos principios y pilares para la implementación exitosa de sistemas de producción basados en lean manufacturing.



Figura 2.2. La casa de la producción esbelta

Fuente: Adaptado de Dennis (2015) y Madariaga Neto (2013)

De acuerdo con Dennis (2015), el desafío de las organizaciones en el siglo XXI es reducir los costos mientras se mantiene una cultura de la mejora continua de la calidad y la satisfacción de las necesidades cambiantes de los clientes. Por lo tanto, los sistemas de producción esbeltos se presentan como alternativa para que las organizaciones logren este desafío en tiempos modernos.

Del mismo modo, el modelo de programación de la producción está enfocado en los ambientes de celdas de manufactura, los cuales proveen unos beneficios para los sistemas de producción esbeltos, que se mencionan en la siguiente sección, y que son fundamento para la producción Just-In-Time. Adicionalmente, el modelo de programación de la producción busca minimizar los costos de penalización por la tardanza en la entrega de los pedidos, lo que está ampliamente relacionado con la satisfacción de los requerimientos de los clientes.

3 SISTEMAS DE CELDAS DE MANUFACTURA

De acuerdo con Romero-Duque et al. (2015) *“Las celdas de manufactura y la tecnología de grupos son una expresión tecnológica de la manufactura esbelta que se ha difundido por todo el mundo por las mejoras en productividad que genera para una organización, en especial para aquellas con volúmenes bajos de producción y productos variados”*. Singh (1996) argumentó que la forma general para la implementación de celdas de manufactura implica tomar dos decisiones: La primera tiene que ver con la formación de las celdas de manufactura, es decir, en la agrupación de las partes a fabricar en familias y en las máquinas para su procesamiento, de acuerdo con las similitudes del proceso de fabricación. La segunda decisión se refiere a la determinación de la distribución al interior de estas (layout) y entre estas (Romero-Duque et al., 2015).

Los sistemas de celdas de manufactura o *cellular manufacturing systems, CMS, son sistemas de producción basados en la tecnología de grupos o group technology, GT*, la cual consiste en identificar y agrupar productos o partes de productos similares para procesarlas de forma más eficiente en máquinas o centros de trabajo agrupados en lo que se denomina como celdas de manufactura (Ham et al., 1985; Irani, 1999). Una celda de manufactura está constituida por un grupo independiente de máquinas distintas, que se sitúan juntas en el piso de la planta, y que están dedicadas a fabricar grupos de productos similares, también denominados familias de productos, cuya similitud puede estar dada por su diseño o por sus procesos de producción (Ham et al., 1985; Irani, 1999). La implementación de las

celdas de manufactura en la industria ha demostrado beneficios, entre otros, reducir las actividades que no agregan valor dentro del proceso, incremento del *throughput* o tasa de rendimiento de producción, mejora de la calidad de los productos y de la satisfacción de los trabajadores, así como en la reducción del inventario en proceso (*work-in-process, WIP*), en el manejo de materiales y en los tiempos de preparación de las máquinas (Burbidge, 1975; Ham et al., 1985; Irani, 1999; Wemmerlöv & Hyer, 1989; Cáceres-Gelvez et al., 2023).

Entre las alternativas de configuración básicas de distribución en planta que se muestran en la Figura 3.1 (Askin & Goldberg, 2002; Tompkins et al., 2011), los sistemas de celdas de manufactura han sido reconocidos como componente fundamental en los sistemas de producción actuales debido a que combinan la flexibilidad de la distribución por procesos con la eficiencia de la distribución por productos, simplificando el flujo de las partes y el tamaño de los lotes de producción, lo que permite a las industrias que implementan este sistema competir en mercados cuyos consumidores requieren amplia variedad de productos en lotes más pequeños (Askin & Goldberg, 2002; Delgoshaei et al., 2016; Logendran et al., 2005; Park & Han, 2002; Qin et al., 2016). La disminución en los lotes de producción y la reducción en los tiempos de preparación y en el manejo de materiales que conlleva la aplicación de celdas de manufactura, promueven un ambiente de eliminación de los desperdicios, de acuerdo con la filosofía de los sistemas de producción esbeltos o *lean manufacturing* (Hamed Hendizadeh et al., 2007). En *lean manufacturing*, los desperdicios, denominados con la palabra japonesa *muda*, son los elementos en un sistema de producción que no agregan valor al producto, pero sí añaden costos que las empresas deben asumir (Cuatrecasas Arbós, 2009; Dennis, 2015).

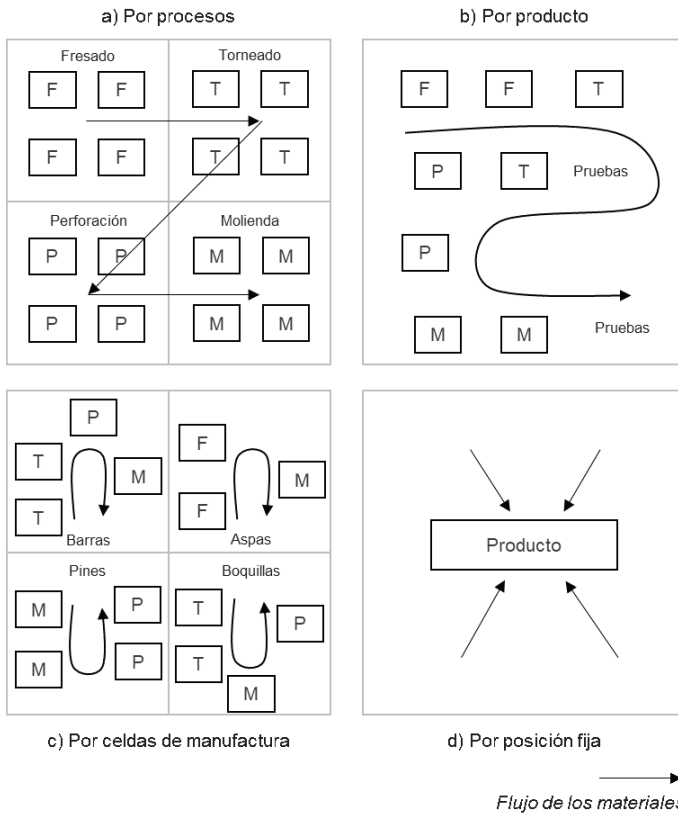


Figura 3.1. Esquemas de las alternativas básicas de distribución en planta

Fuente: Adaptado de Askin & Goldberg (2002) y Tompkins et al. (2011)

Por esta razón, los sistemas de celdas de manufactura son pilar fundamental en los sistemas de producción justo a tiempo (*just-in-time, JIT*), los sistemas de producción flexibles o automatizados y los sistemas de producción integrados a computadoras (Costa et al., 2017; Ebrahimi et al., 2016; Saravanan & Noorul Haq, 2008; Tavakkoli-Moghaddam et al., 2010; Venkataramanaiah, 2008). Recientemente, el interés por el diseño y operación de nuevos tipos de celdas de manufactura que se ajusten a estos nuevos paradigmas de producción se ha incrementado, como es el caso de las celdas de manufactura virtuales (Nomden et al., 2006), las celdas de manufactura reconfigurables

(Du et al., 2013) y las celdas de manufactura basadas en conocimiento (Yan & Li, 2017), entre otros (Cáceres-Gelvez et al., 2021).

Las celdas de manufactura virtuales se dedican a la producción de una o varias piezas o productos, cuyos recursos pueden no estar físicamente adyacentes en el piso de producción (Nomden et al., 2006), las celdas de manufactura reconfigurables Las celdas de manufactura reconfigurables son sistemas flexibles, en cuanto que permiten cambiar los componentes del sistema, para ajustar la fabricación a nuevas y requerimientos para fabricar nuevos productos (Du et al., 2013) y las celdas de manufactura basadas en conocimiento son un conjunto de estaciones de trabajo sincronizados y automatizadas con base en el conocimiento de los expertos, permitiendo que la fabricación de los productos se realice con una mayor eficiencia, calidad y rapidez (Yan & Li, 2017).

La implementación exitosa de un sistema de celdas de manufactura requiere de un conjunto de decisiones relacionadas con el diseño y la operación de la misma, como son la formación de las celdas o *Group Formation (GF)*, la distribución de las máquinas en las celdas o *Group Layout (GL)* y la programación de los trabajos en las celdas o *Group Scheduling (GS)* (Chen & Lee, 2001; Costa et al., 2017; Ebrahimi et al., 2016; França et al., 2005; Irani, 1999; Tang et al., 2010; Wemmerlöv & Hyer, 1986; Wu, Chu, Wang & Yan, 2007). La formación de las celdas (GF) es la agrupación de partes en familias de productos y la agrupación de las máquinas que procesan estas familias de productos en celdas de manufactura, de acuerdo con los conceptos de GT (Wu, Chu, Wang & Yan, 2007). La distribución de las máquinas en las celdas (GL) comprende las decisiones de ubicación de las máquinas dentro de la celda de manufactura (*intra-cell layout*) y la

distribución de las celdas de manufactura en el piso de producción (*inter-cell layout*) (Wu, Chu, Wang & Yan, 2007). La programación de los trabajos en las celdas (GS) consiste en la secuenciación de las familias de productos y la secuenciación de los productos o partes de productos dentro de las familias de productos (Schaller et al., 2000; Wu, Chu, Wang & Yan, 2007). Como se mencionó anteriormente, una celda de manufactura puede ser diseñada en un ambiente de máquinas *flow-shop* o *job-shop* (Chen & Lee, 2001; Reddy & Narendran, 2003; Venkataramanaiah, 2008). Un ambiente *flow-shop* corresponde a una configuración en línea, en donde las máquinas están ubicadas en serie y cada trabajo debe ser procesado en cada una de las máquinas en la misma secuencia, mientras que un ambiente *Job-Shop* corresponde a un taller de trabajo, en donde las maquinas no necesariamente están distribuidas en serie y cada trabajo visita a cada una de las máquinas según una secuencia de procesamiento predeterminada (Pinedo, 2016).

4 DISTRIBUCIÓN DE PLANTAS

La distribución de los equipos, estaciones de trabajo y maquinaria en planta es una de las decisiones estratégicas más relevantes para las organizaciones productivas. La decisión es tan compleja que puede generar un impacto en el funcionamiento y en las finanzas de una empresa por un largo período de tiempo. Cuando una empresa está iniciando sus operaciones productivas, bien sea, por primera vez o a través de la instalación de un nuevo establecimiento, la pregunta sobre cómo disponer sus recursos de la manera más eficiente sale a relucir. De acuerdo con el nivel de adopción de tecnologías por parte de la empresa, la pregunta se puede resolver de mejor o peor manera y puede generar un impacto positivo o muy negativo. Pero ¿por qué es tan importante definir correctamente la disposición de los equipos y áreas de trabajo en una planta industrial o de servicios?

La respuesta está en las “mudas” o desperdicios establecidos en la filosofía Lean Manufacturing. Suponga que una empresa desea iniciar la producción de una nueva zapatería y desea instalar sus procesos productivos en una planta ubicada en una zona industrial local. Suponga también que el empresario, gerente o director de operaciones de esta nueva empresa acaba de recibir sus equipos, herramientas y máquinas necesarias para la producción del calzado, pero por desconocimiento o falta de experticia, decide disponer estos en planta de acuerdo con su conveniencia o basado en experiencias anteriores. Ahora bien, asumamos que otra empresa competidora se instala en la misma zona industrial en una planta con las mismas características que la primera. En este caso, el equipo de planeación y

distribución de instalaciones de esta nueva empresa decide utilizar técnicas de optimización y simulación, junto con el conocimiento de expertos, para definir la posible distribución de los equipos y máquinas y los posibles cambios de estos, de acuerdo con la demanda pronosticada. En caso de que ambos enfoques lleguen a instalarse en cada una de las plantas y con el paso del tiempo, la primera planta empezará a presentar problemáticas que pueden relacionarse con las diferentes “mudas” del Lean Manufacturing: transportes o movimientos innecesarios de personal y materiales, grandes cantidades de producto en proceso en las áreas de trabajo, desperdicios de materias primas e insumos, carga de trabajo del personal desbalanceada, productos defectuosos y alta cantidad de reprocesos. Por su parte, la segunda planta, aunque no exenta a tener las mismas problemáticas, la fuente de estas -una distribución incorrectamente planeada de las áreas de trabajo- ha sido cuidadosamente estudiada antes de su instalación, y una decisión basada en los datos y modelos de estudio probablemente permitirían una reducción significativa de estos desperdicios.

Otra respuesta a la pregunta sobre la importancia de una correcta disposición en planta se deriva de la respuesta anterior relacionada con las “mudas” y es el impacto financiero de estas. Cada reproceso, transporte o movimiento innecesario, desperdicio de insumo o materias primas, personal insatisfecho o cansado, etc. se proyecta directamente en los costos operacionales del estado de resultados de la empresa y, estos costos, a su vez, impactan las ganancias operacionales del negocio. Este impacto negativo a las ganancias por motivo de una disposición inapropiada en planta no es fácil de solucionar en el corto plazo, debido a la naturaleza de la decisión. Al ser una decisión de largo plazo y que requiere una gran inversión por parte de las empresas, estas se ven atadas

a la organización de su planta por un plazo alrededor de los cinco a diez años, hasta que exista nuevamente un rubro o inversión significativas que permita modificar o mejorar esta organización. A lo anterior se adiciona el costo de oportunidad, el cual es mucho más difícil de calcular, y que consiste en realizar esta futura inversión para modificar una planta mal diseñada, en lugar de utilizar estos rubros para la adquisición de nuevas tecnologías, en investigación y desarrollo o en la ampliación de la empresa y sus mercados. En este sentido, el impacto de la decisión de distribución en planta va más allá de lo operacional y puede afectar significativamente la productividad y competitividad de una empresa.

El diseño de plantas o instalaciones, que incluye la definición de como estas se distribuyen, es uno de los componentes, junto con la localización de instalaciones, del proceso de planeación de instalaciones de una organización (Tompkins et al., 2011).

Una planta hace referencia a los activos fijos tangibles de una organización, que requieren ser organizados de tal manera que impulsen el logro de los objetivos de la misma (Stephens & Meyers, 2013; Tompkins et al., 2011). El componente de diseño de instalaciones considera la distribución de los equipos, la maquinaria y el mobiliario requerido en las áreas de producción y en sus áreas de apoyo, así como la ubicación de las personas, los materiales y los equipos de manejo de materiales en cada área de trabajo de una planta (Stephens & Meyers, 2013; Tompkins et al., 2011), de manera que se optimicen uno o más objetivos (Drira et al., 2007; Singh & Sharma, 2006; Stephens & Meyers, 2013; Tompkins et al., 2011). La distribución de instalaciones (facility layout) es uno de los productos finales del proceso de diseño de una instalación.

La distribución de instalaciones está ligada a los objetivos de producción de una organización, incluyendo la reducción y control de los costos, la mejora en la calidad de los productos y la satisfacción del cliente, el incremento en la velocidad de respuesta y de la flexibilidad, el uso eficiente de personas, equipos, espacio y energía, la seguridad y comodidad del personal, la integración con la cadena de suministros, el aseguramiento de la sostenibilidad, entre otros (Heragu, 2016; Stephens & Meyers, 2013; Tompkins et al., 2011). Una distribución efectiva de instalaciones se relaciona con la reducción de entre un 10% y un 30% de los costos de manejo de materiales, los cuales representan entre un 20% y un 50% de los costos totales de operación de una planta (Tompkins et al., 2011).

La distribución de plantas ha sido abordada a través de diferentes técnicas sistemáticas y de optimización, con el fin de obtener layouts acordes a las necesidades de las organizaciones. Dentro de los métodos para resolver los problemas de mejorar la distribución de plantas, se reconocen los procedimientos de planeación sistemática de la distribución de Müther (Müther, 1973), de Apple (Apple, 1977) y de Reed (Reed, 1961), siendo la planeación sistemática de la distribución de Müther (Müther's systematic layout planning, SLP) uno de los procedimientos más aplicados en la industria y en la academia, el cual está basado en las relaciones de cercanía requeridas para los departamentos de una instalación (Muther & Hales, 2015; Palominos et al., 2019; Yang et al., 2000). En las técnicas de optimización, se destacan la aplicación de algoritmos heurísticos de construcción, algoritmos metaheurísticos y procedimientos exactos, los cuales serán descritos en el apartado 5.2 para los problemas de distribución de plantas con áreas desiguales. Algunos algoritmos de construcción conocidos incluyen el método de intercambio pareado,

el método basado en gráficas, la técnica computarizada de asignación relativa de plantas (computerized relative allocation of facilities technique, CRAFT) (Armour & Buffa, 1963), BLOCPLAN (Donaghey & Pire, 1991) y el método de optimización de la distribución con cortes tipo guillotina (layout optimization with guillotine induced cuts, LOGIC) (Tam, 1992). En relación con los métodos exactos y los modelos matemáticos formulados para el problema, se reconoce el uso del modelo de asignación cuadrática (Quadratic Assignment Problem, QAP), así como diferentes formulaciones de programación no-lineal y lineal entera mixta (Anjos & Vieira, 2017; Askin & Goldberg, 2002; Hosseini-Nasab et al., 2018; Koopmans & Beckmann, 1957; Kusiak & Heragu, 1987; Tompkins et al., 2011).

4.1 Tipos de distribución de plantas

El patrón de flujo de trabajo determina los formatos para la distribución de las plantas de manufactura y está directamente relacionado con los sistemas de producción mencionados en el capítulo 1. Las posibles distribuciones de plantas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Distribución por producto.
- Distribución por proceso.
- Distribución por celdas de manufactura.
- Distribución de posición fija.
- Distribuciones para Justo a tiempo.
- Distribución híbrida.

Distribución por Producto

Es también conocida como *distribución de Taller de Flujo* y en esta los procesos y equipos son distribuidos de acuerdo con la secuencia progresiva requerida para la fabricación de los productos, es decir, los

productos siguen un camino establecido de estaciones o fases de la fabricación, en la que en cada una se agrega valor al proceso de fabricación. En las ocasiones en que la distribución de la planta se concentra en la fabricación de un conjunto limitado de productos, recibe el nombre de línea de producción.

Esta distribución permite que los productos fluyan con facilidad y normalmente se requiere de equipos especializados para cada parte del proceso. Este tipo de distribución permite que el proceso puede ser completamente automatizado o que haya interacción humana en la medida que se requiera. La distribución por producto es habitual para la fabricación de productos en donde el volumen es elevado y la variedad y variabilidad de los productos es limitada, lo que hace que los procesos en las estaciones no tengan muchos cambios, permitiendo una mayor velocidad de producción y con ello elevar el número de productos procesados.

Distribución por Proceso

La Distribución por proceso, distribución de *Taller de Trabajo* o también distribución por *Función* se basa en agrupar equipos o áreas con funciones similares de manera secuencial, en la cual cuando se termina una parte del proceso o producto, se pasa al siguiente equipo o área. Los productos se mueven entonces de acuerdo a los requerimientos que tienen hacia las estaciones en que son atendidos, por lo cual, productos con características diferentes tendrán secuencias de fabricación diferentes y especializadas.

En esta distribución las estaciones o máquinas de trabajo buscan ser posicionadas de forma adyacente o cercana, buscando que se reduzcan las

distancias y movimientos requeridos para completar la fabricación de los productos. Esta distribución es común en procesos en los que el volumen de fabricación es bajo y con alta variedad, lo cual permite aprovechar la capacidad y la funcionalidad especializada de cada una de las estaciones de trabajo, permitiendo que en cada estación se puedan realizar actividades específicas a los diferentes tipos de productos.

Distribución de tecnología de grupos o celular

Esta distribución se basa en agrupar los equipos para la fabricación en celdas o centros de trabajo para productos con características, recursos y procesos de producción similares. Esta distribución tiene similitudes con la distribución por proceso y la distribución por producto. Con relación a la distribución por proceso es similar, toda vez que estas celdas están orientadas a un conjunto de procesos específicos y con respecto a la distribución por producto, ya que estas se encargan de producir un grupo de productos limitados.

La especialización de las estaciones de trabajo agrupadas en celdas permite que cada una de estas realice un conjunto de procesos específicos, generando una mejor eficiencia en el trabajo de los operarios, el uso de los equipos de manejo de materiales y del inventario. Este tipo de distribución de fabricación es usada para productos semejantes y con volúmenes de fabricación de medio a alto.

Distribución por posición fija

En esta distribución se invierte la lógica del movimiento de los productos a través de los procesos, y en vez de esto, los productos quedan fijos y son las personas, los equipos, las máquinas y los materiales los que se desplazan

hasta estos para realizar las operaciones de fabricación, tal y como ocurre con la construcción de un edificio. Esta distribución se aplica cuando el tamaño, peso, fragilidad, volumen o otras características genera que sea más conveniente dejar el producto fijo y en vez de esto mejor acercar los elementos y recursos necesarios para su fabricación.

Este tipo de distribución normalmente se asocia con productos de bajo volumen y que pueden presentar alta variabilidad. Por esto, es necesario desarrollar con alta precisión la secuencia y los tiempos en la que se realizan las operaciones del proceso de fabricación, de forma que las actividades se realicen en el momento preciso, evitando los reprocesos o la generación de demoras para la ejecución de una actividad que retrase la fabricación del producto.

Distribución Justo A Tiempo

Esta distribución se basa en producir y utilizar un proceso únicamente cuando se requiera, es decir, justo en el tiempo en que el producto que puede ser procesado. En esta distribución las actividades pueden ser organizadas de acuerdo con principios como grupos de tecnología, de forma que los procesos que comparten procesos comunes puedan ser realizados con mayor eficiencia. Esto permite una reducción de los inventarios o un mejor flujo de proceso al interior del sistema productivo. Esta distribución es posible cuando la demanda se comporta de forma continua. Esta distribución puede ser usada para línea de flujo, como líneas de montaje y también para distribuciones por proceso.

Para lograr esto, se requiere que las áreas de trabajo o los equipos estén cercanas de las subsiguientes y el producto es arrastrado desde la salida

del primero hasta el inicio del segundo en el momento en que se requiere para la fabricación. Básicamente lo que se hace es reemplazar las unidades que han sido inmediatamente procesadas. Cuando la distribución es en línea, el sistema se encarga de pasar los productos de un área o máquina a otra y cuando es por funciones, se utilizan equipos de manejo de materiales para ello.

4.2 Problema de la distribución de plantas

El problema de distribución de plantas (facility layout problem, FLP) consiste en organizar un número de departamentos o áreas de trabajo (n) dentro de un plano de planta con unas dimensiones de ancho, W , y largo, L , dadas, teniendo en cuenta unos requerimientos específicos de áreas de los departamentos y evitando la sobreposición entre los mismos (Armour & Buffa, 1963; Drira et al., 2007; Singh & Sharma, 2006). El costo de manejo de materiales es uno de los criterios más utilizados para optimizar la distribución de una planta, debido al impacto que tiene la disminución de estos costos en la eficiencia y productividad (Anjos & Vieira, 2017; Hosseini-Nasab et al., 2018; Sule, 2008; Tompkins et al., 2011). El costo de manejo de materiales es una medida basada en la distancia, en donde el costo de mover una unidad de material entre dos departamentos i y j , C_{ij} , se multiplica por el flujo de materiales, f_{ij} , y por la distancia entre estos departamentos, d_{ij} , usualmente medida desde las coordenadas centrales (centroides) de cada departamento (Kang & Chae, 2017). La medición de la distancia entre dos departamentos i y j , con coordenadas de los centroides (x_i, y_i) y (x_j, y_j) dadas, usualmente se calcula según alguna de las siguientes normas:

- La norma de la distancia rectilínea o Manhattan, la cual es la más utilizada en aplicaciones reales y es la suma de las distancias

absolutas recorridas en los ejes x y y entre dos puntos, de manera que $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ (Gonçalves & Resende, 2015).

- La norma de la distancia euclidiana, que es la distancia en línea recta entre dos puntos, y está dada como $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ (Carro Paz & González Gómez, 2014; Gonçalves & Resende, 2015).

Estas ecuaciones de distancia son la base para definir los costos de movimiento de materiales y de los equipos utilizados para ellos, ya que normalmente estos costos son una función de la distancia requerida más los costos fijos de los equipos utilizados.

Cuando el problema de distribución de plantas (FLP) considera una representación continua de los departamentos en el plano de planta y estos a su vez pueden tener requerimientos de área desiguales entre ellos, el problema es conocido como de distribución de plantas con áreas desiguales (unequal-area facility layout problem, UAFLP). Este problema fue abordado inicialmente por Armour & Buffa (1963) y es un problema ampliamente reconocido de clase NP-hard (Castillo & Westerlund, 2005; Gonçalves & Resende, 2015; Paes et al., 2017). Las características del UAFLP se encuentran frecuentemente al momento de la distribución de plantas de la vida real (Balamurugan et al., 2006; Konak et al., 2006; Meller & Gau, 1996; Ulutas & Kulturel-Konak, 2012).

La Figura 4.1 muestra una representación del problema de distribución de instalaciones con *áreas desiguales*, considerando la norma de la distancia rectilínea entre los centroides (x_i, y_i) y (x_j, y_j) de dos departamentos i y j , respectivamente; en donde W y H son las dimensiones de la instalación (ancho y largo, respectivamente), l_j^x y l_j^y son las dimensiones de los

lados del departamento j (ancho y largo, respectivamente) y d_{ij}^x y d_{ij}^y son las distancias en los ejes x y y , respectivamente.

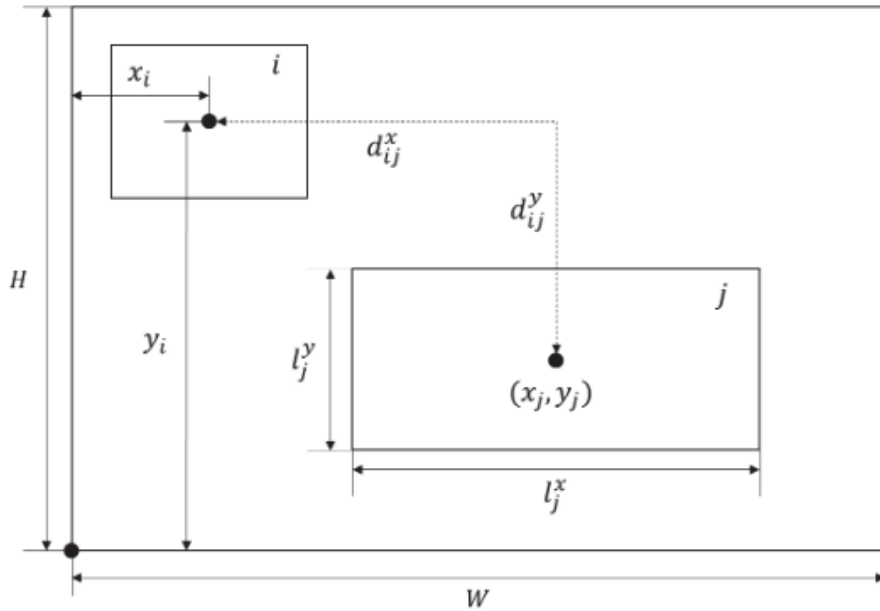


Figura 4.1. Representación del problema de distribución de instalaciones con áreas desiguales, considerando la norma de la distancia rectilínea

Fuente: Adaptado de (Kang & Chae, 2017)

El problema de distribución de instalaciones con áreas iguales es una simplificación del problema de áreas desiguales mencionado anteriormente, en donde l_j^x y l_j^y son iguales, lo que reduce la dificultad de solución de este problema, sin embargo como se mencionó, su aplicación es poca, debido a que en la realidad alcanzar las condiciones del diseño de instalaciones en las que todas las áreas son iguales en tamaño, es poco probable. El problema de la distribución en planta con áreas desiguales y sus procedimientos de solución, son abordados en el siguiente capítulo.

5

DISTRIBUCIÓN EN PLANTACIONES CON ÁREAS DESIGUALES: MODELOS Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN

La distribución en planta es un problema que ha sido ampliamente estudiado y con una amplia aplicación en el ámbito industrial y de servicios (Armour & Buffa; 1963; Meller & Gau, 1996; Castillo & Westerlund, 2005; Balamurugan et al., 2006; Konak et al., 2006; Ulutas & Kulturel-Konak, 2012; Gonçalves & Resende, 2015; Paes et al., 2017; Kang & Chae, 2017). Como se ha mencionado anteriormente, una amplia variedad de modelos, técnicas de solución e incluso software se han propuesto para resolver este problema complejo (Castillo & Westerlund, 2005; Gonçalves & Resende, 2015; Paes et al., 2017). Sin embargo, el modelo de distribución en planta con áreas desiguales es una de las variantes de este problema que destacan. El modelo de distribución en planta con áreas desiguales elimina algunas de las suposiciones impuestas en modelos más básicos, como el modelo de distribución basado en el problema de asignación cuadrática (*Quadratic Assignment Problem, QAP*), acercándolo a distribuciones en planta más realistas.

En primer lugar, el modelo con áreas desiguales representa los departamentos de manera continua y no discreta. Es decir, un departamento ubicado en planta es representado a través de una figura geométrica -rectángulos-, con dimensiones de ancho y largo continuas que pueden moverse a lo largo del área del plano de planta. El modelo, en este caso, busca ubicar los departamentos arriba/debajo o a derecha/izquierda de otros departamentos. En el modelo *QAP*, los departamentos son representados como cuadrados con dimensiones de lado fijas, en donde el modelo asigna cada departamento a disponer en planta en cada uno de estos cuadrados. En segundo lugar, el modelo con áreas desiguales permite dimensiones de ancho y largo desiguales

entre ellas para cada departamento. Es decir, los departamentos pueden tener formas más realistas realistas (Balamurugan et al., 2006; Konak et al., 2006; Meller & Gau, 1996; Ulutas & Kulturel-Konak, 2012), en comparación con los cuadrados de dimensiones fijas del modelo QAP.

Estos nuevos elementos en la disposición con áreas desiguales acercan el modelo a ambientes de distribución en planta reales, en donde los departamentos o áreas de trabajo pueden tener diferentes formas, y la definición de las distancias entre los mismos puede calcularse de manera más aproximada a la situación real (Balamurugan et al., 2006; Konak et al., 2006; Meller & Gau, 1996; Ulutas & Kulturel-Konak, 2012). Lo anterior facilita la traducción del modelo a una distribución y planeación en planta acorde a las necesidades de una empresa, por parte del diseñador o ingeniero de planta. Sin embargo, el costo de levantar estas suposiciones, con respecto al modelo QAP, está dado por una mayor complejidad del problema de clase NP-completo a la hora de formular una solución. Un problema NP-Completo (Problema polinomial completo no determinístico) son un tipo de problemas polinómicos completos, cuya solución se puede verificar de manera eficiente en tiempo polinómico, pero no se puede resolver en un tiempo razonable debido a su alta complejidad computacional (Hou et al., 2024).

Los siguientes apartados abordan específicamente el modelo de distribución en planta con áreas desiguales desde el punto de vista de la formulación matemática del problema, y los algoritmos y técnicas disponibles para su solución.

5.1.1 Formulación matemática del modelo con áreas desiguales

El modelo de distribución en planta con áreas desiguales consiste en ubicar un conjunto de departamentos dentro de un plano de planta, considerando

los requerimientos de área y aspecto asociados a cada uno de estos departamentos. Adicionalmente, en cada departamento se identifican las coordenadas de su centroide, desde donde se asume la entrada y salida del flujo de materiales provenientes y salientes hacia otros departamentos. Desde este punto centroide, se inicia la medición de la distancia rectilínea entre los departamentos. Una formulación matemática ampliamente utilizada para el problema de distribución con áreas desiguales a través de un modelo de programación no-lineal entera mixta fue presentado por Kang & Chae (2017) y se describe a continuación.

Notación y parámetros

| | |
|------------|---|
| n | número de departamentos |
| i, j | índices para los departamentos, $i < j$ |
| L^x, L^y | dimensiones de la instalación para ancho y alto, respectivamente |
| a_i | requerimientos de área para el departamento i |
| β_i | requerimiento de tasa de aspecto máxima para el departamento i , $\beta_i \geq 1$ |
| f_{ij} | volumen de flujo de materiales entre los departamentos i y j |

Variables de decisión

| | |
|----------------|---|
| d_{ij} | distancia rectilínea entre los departamentos i y j |
| l_i^x, l_i^y | dimensiones de ancho y alto para el departamento i , respectivamente |
| c_i^x, c_i^y | coordenadas del centroide en los ejes x y y para el departamento i , respectivamente |
| z_{ij}^x | 1, si el departamento i se ubica a la izquierda del departamento j . 0, de lo contrario. |
| z_{ij}^y | 1, si el departamento i se ubica debajo del departamento j . 0, de lo contrario |

$$\text{Minimizar } MHC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n f_{ij} d_{ij} \quad (5.1)$$

Sujeto a:

$$d_{ij} = |c_i^x - c_j^x| + |c_i^y - c_j^y|, \quad \forall i, j (i \neq j) \quad (5.2)$$

$$a_i = l_i^x * l_i^y, \quad \forall i \quad (5.3)$$

$$\sum_i^n a_i \leq L^x * L^y \quad (5.4)$$

$$\frac{\max\{l_i^x, l_i^y\}}{\min\{l_i^x, l_i^y\}} \leq \beta_i \quad (5.5)$$

$$c_i^x + \frac{l_i^x}{2} \leq c_j^x - \frac{l_j^x}{2} + L^x(1 - z_{ij}^x), \quad \forall i \neq j \quad (5.6)$$

$$c_i^y + \frac{l_i^y}{2} \leq c_j^y - \frac{l_j^y}{2} + L^y(1 - z_{ij}^y), \quad \forall i \neq j$$

$$\frac{l_i^x}{2} \leq c_i^x \leq L^x - \frac{l_i^x}{2}, \quad \forall i \quad (5.7)$$

$$\frac{l_i^y}{2} \leq c_i^y \leq L^y - \frac{l_i^y}{2}, \quad \forall i$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x + z_{ij}^y + z_{ji}^y = 1, \quad \forall i \neq j \quad (5.8)$$

El modelo consiste entonces en minimizar el MHC, definido como la sumatoria de los flujos entre los departamentos multiplicado por las distancias entre los mismos, como se presenta en la ecuación (5.1). A partir de aquí, las restricciones definen las características propias del modelo con áreas desiguales. La restricción (5.2) define la norma de la distancia rectilínea entre departamentos. La restricción (5.3) asegura que los requerimientos de área de cada departamento se satisfagan, siendo esta limitación la que incrementa la complejidad del problema por su naturaleza no lineal. La restricción (5.4) asegura que el área total de los departamentos esté dentro de las dimensiones del piso de planta disponible. El requerimiento de relación de aspecto, el cual permite únicamente una tasa de aspecto máximo entre los lados más largos y cortos de los departamentos, se establece en la restricción (5.5). El conjunto de restricciones (5.6) y (5.7) previenen que los departamentos se superpongan entre ellos y aseguran que estos estén ubicados dentro del piso de planta, respectivamente. Finalmente, la restricción (5.8) define la ubicación de cada departamento

en relación con otros departamentos, mientras que la restricción (5.9) establece las condiciones binarias de estas variables de ubicación.

5.2 Algoritmos y técnicas de solución

Los algoritmos y técnicas que se han propuesto para la solución del modelo con áreas desiguales varían entre métodos exactos, algoritmos heurísticos y metaheurísticos y técnicas de simulación. A continuación, se mencionan algunos ejemplos de cada una de estas categorías.

5.2.1 Métodos exactos

Debido a la complejidad del problema y su naturaleza combinatoria y no lineal, el modelo de distribución en planta con áreas desiguales es sumamente difícil de resolver de manera exacta, es decir, evaluando todas las posibles combinaciones o alternativas de planta y seleccionando la mejor. A continuación, se mencionan algunas de las técnicas exactas disponibles.

- *Uso de software de optimización:* Actualmente, las capacidades computacionales y los softwares de optimización han podido reducir la brecha que sigue existiendo para la solución de problemas altamente complejos. Dentro de estas alternativas, el uso de solvers de programación matemática como CPLEX de IBM (IBM, sf), en combinación con solvers específicos de programación no lineal como SNOPT (Gill, Murray & Saunders, 2005), KNITRO (Artelys, 2024) o BARON (The Optimization Firm, sf.) permiten obtener soluciones exactas para instancias moderadas del problema. Cabe resaltar que, en la mayoría de los casos, el modelo de distribución con áreas desiguales debe ser reformulado con el objetivo de facilitar su optimización por parte de los solvers.

- *Reformulación matemática del modelo*: Uno de los enfoques más frecuentes en combinación con el uso de solvers de optimización es la aplicación de técnicas de aproximación o métodos de reformulación del modelo de programación matemática. Estas técnicas consisten en formular el problema de áreas desiguales de manera que se facilite su optimización, considerando conceptos matemáticos aplicados, por ejemplo, la aproximación lineal para el reemplazo de restricciones no lineales del modelo, o el uso de conjuntos y funciones *convexas* equivalentes al problema original. Ejemplos de estas aplicaciones pueden encontrarse en (Konak et al., 2006) (Jankovits et al., 2011) (Ahmadi and Akbari Jokar, 2016) y (Anjos & Vieira, 2016) entre otros. El libro sobre optimización convexa escrito por (Boyd & Vandenberghe, 2004) también sirve de guía avanzada para el uso de esta rama de la optimización en la solución de problemas.

5.2.2 Heurísticas y metaheurísticas

El uso de heurísticas y metaheurísticas para resolver problemas complejos de forma subóptima o sin garantía de la calidad de la solución se ha extendido ampliamente como alternativa a los métodos exactos debido a su capacidad de obtener soluciones *aceptables* en tiempos computacionales prácticos. Entre las heurísticas y metaheurísticas utilizadas para resolver el modelo con áreas desiguales están los siguientes tipos:

- *Heurísticas constructivas*: Se refiere a los algoritmos enfocados en construir una solución factible a través de la ejecución de un conjunto de procesos y lógicas. Ejemplos de algoritmos heurísticos constructivos para el problema de distribución en planta con áreas desiguales incluyen los métodos de intercambio pareado, el método basado en gráficas, la técnica computarizada de asignación relativa en planta (CRAFT),

BLOCPLAN y el método de optimización de la distribución con cortes tipo guillotina (LOGIC), entre otros. Aplicaciones de algunos de estos algoritmos pueden consultarse en (Tompkins et al., 2011).

- *Metaheurísticas poblacionales:* Se refiere a la aplicación de algoritmos heurísticos de alto nivel (“metaheurísticas”) que están inspiradas en procesos sociales, físicos o de la naturaleza y que se han demostrado efectivos ante la solución de problemas de gran complejidad. Usualmente, estos algoritmos contienen estructuras que permiten representar la solución del problema, así como realizar operaciones basadas en el objeto de inspiración, con el fin de buscar soluciones aceptables sin una garantía de calidad de esta. Adicionalmente, los algoritmos metaheurísticos pueden poblacionales, es decir, pueden buscar una buena solución dentro de un conjunto de soluciones factibles. Ejemplos de algoritmos metaheurísticos poblacionales incluyen los algoritmos búsqueda tabú, templado simulado, algoritmos genéticos, optimización de enjambre de partículas, entre otros. Para conocer más sobre el funcionamiento y aplicaciones de estos algoritmos, se puede consultar en (Talbi, 2009) y (Gendreau & Potvin, 2009).

5.23 Simulación

La simulación es una de las técnicas más robustas para la solución de problemas complejos y situaciones realistas de distribución en planta. El uso de técnicas de simulación en conjunto con software especializado para la distribución en planta permite obtener diferentes alternativas de distribución considerando diferentes escenarios y elementos de incertidumbre. Software de simulación especializado para la integración de diseños 3D en planta incluyen a Arena[®], Simio[®], Flexsim[®], AnyLogic[®],

Simul8®, Twinzo®, ProModel®, entre otros¹. Otra alternativa al uso de software de simulación especializado es la construcción de modelos de simulación de eventos discretos (*discrete-event simulation, DES*). Una fuente de interés para conocer más sobre el uso y aplicación de DES es el libro escrito por (Banks, 2010).

5.2.4 Métodos híbridos

El uso de técnicas híbridas, es decir que incluyen por lo menos dos de los elementos de los métodos anteriormente mencionados, se está haciendo cada vez más popular debido a la robustez de los resultados y a la complejidad de los problemas que se pueden abordar con estas técnicas de solución. Ejemplos de métodos híbridos incluyen, entre otros, las siguientes:

- Algoritmos metaheurísticos híbridos: Estos algoritmos consisten en la aplicación de una técnica heurística constructiva para la generación de una solución inicial o la búsqueda local de una solución dada, la cual es posteriormente integrada en el proceso búsqueda de un algoritmo metaheurístico, el cual se encarga de utilizar esta solución como semilla y así mejorar dicha solución a través de las operaciones propias de la metaheurística utilizada.

- *Algoritmos matheurísticos*: Se refiere a la aplicación de técnicas heurísticas para la construcción de una solución inicial o la búsqueda local de una solución dada, integrada a la optimización de un modelo de programación matemática del problema a través de un solver de simulación. Una fuente para conocer más sobre matheurísticas es el libro escrito por (Maniezzo et al., 2010).

1. El Anexo **A** incluye un listado del software mencionado a lo largo de este libro con links de acceso a las páginas web correspondientes.

- *Optimización basada en simulación y “sim-heurísticas”*: Uno de los enfoques más recientes es el uso de técnicas que combinan la optimización de modelos de programación matemática o de heurísticas con elementos de simulación. El libro de (Gosavi, 2015) explica con claridad el concepto de optimización basada en simulación, mientras que (Juan et al., 2015) proveen una revisión completa de sim-heurísticas para la optimización de problemas combinatorios con elementos de incertidumbre.

6

PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

La programación de la producción o *scheduling* es un proceso de toma de decisiones que se realiza de forma regular en empresas manufactureras, con el fin de asignar recursos a tareas en un período de tiempo dado y de esta manera optimizar uno o más objetivos (Pinedo, 2016), usualmente relacionados con la minimización del tiempo o el costo de las operaciones. La programación de la producción es una actividad que hace parte de la jerarquía de decisiones de un sistema de producción (Nahmias & Olsen, 2015), como se observa en la Figura 6.1, en donde se organizan el personal y los equipos para cumplir las fechas de entrega de las tareas u órdenes de pedido pactadas con el cliente. Nahmias & Olsen (2015) mencionan que el problema de la programación de la producción consiste en que, dadas unas tareas (n) que deben procesarse en unas máquinas o centros de trabajo (m), se debe encontrar la secuencia de tareas que optimice ciertos criterios establecidos.

Pinedo (2016) presenta algunas de las posibles entradas para los campos de la notación $\alpha/\beta/\gamma$, y que serán utilizadas a lo largo del presente documento. Los problemas más comunes de *scheduling* se llevan a cabo en ambientes de flujo en línea (*flow-shop*) y de taller de trabajo (*job-shop*), debido a su amplia aplicación en la industria. En los ambientes *flow-shop*, las máquinas están ubicadas en serie y cada trabajo (producto) debe ser procesado en cada una de las máquinas en la misma secuencia, a lo cual se le conoce como un ambiente *flow-shop* con permutación y en los ambientes *job-shop*, (producto) cada trabajo visita a cada una de las máquinas según

una secuencia de procesamiento predeterminedada (Pinedo, 2016). Los ambientes *flow-shop* y *job-shop* son denominados flexibles cuando están conformados por estaciones de trabajo, en donde cada estación cuenta con un número de máquinas idénticas ubicadas en paralelo (Pinedo, 2016).

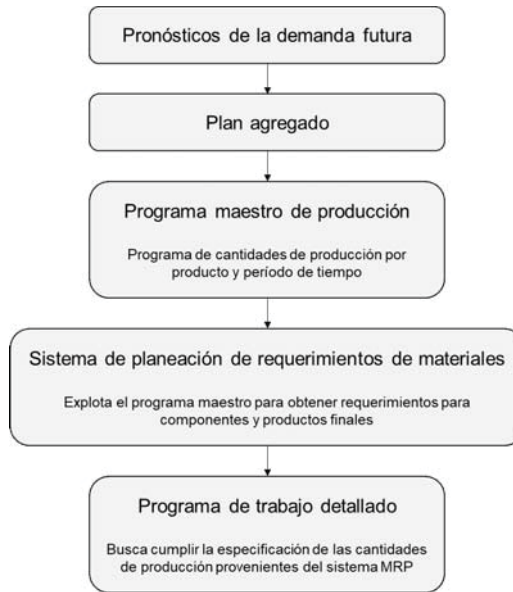


Figura 6.1. Jerarquía de decisiones en un sistema de producción
Fuente: Adaptado de Nahmias & Olsen (2015)

Los sistemas de celdas de manufactura son una característica de procesamiento del problema de programación de producción, en donde una celda de manufactura puede ser de ambiente *flow-shop* o *job-shop*, de acuerdo con la similaridad entre las familias de productos a procesar (Chen & Lee, 2001; Reddy & Narendran, 2003). Otra característica de procesamiento común y con un efecto significativo en los problemas de *scheduling* son los tiempos de preparación dependientes de la secuencia (*sequence-dependent setup times*) (Lu & Logendran, 2013; Panwalkar et al., 1973). Esta característica se presenta cuando, después de terminar el procesamiento de

un trabajo (producto), se requiere un tiempo de preparación de la máquina para procesar el siguiente trabajo (Pinedo, 2016).

También se encuentra la característica de familias de trabajos (*job families*) la cual hace referencia a la agrupación de productos similares en familias de productos, que pueden ser procesadas de forma continua sin requerir un tiempo de preparación entre ellas; sin embargo, cuando una máquina cambia de procesar una familia de productos para procesar otra, se incurre en un tiempo de preparación que puede ser dependiente de la secuencia de las familias (Pinedo, 2016), a lo cual se le denomina tiempo de preparación de familias dependiente de la secuencia (*sequence-dependent family setup time*) (Neufeld et al., 2016).

Los objetivos a optimizar en scheduling pueden estar relacionados con los tiempos de terminación de los productos o con las fechas de entrega de los pedidos (Pinedo, 2016). El tiempo de terminación del último trabajo (*makespan*), el tiempo de terminación total (*total completion time*) y el tiempo de terminación ponderado total (*total weighted completion time*) son algunos de los objetivos relacionados con los tiempos de terminación de los trabajos, los cuales se enfocan en mejorar la utilización y la productividad de los recursos (Lu & Logendran, 2013). Los objetivos relacionados con las fechas de entrega de los pedidos buscan medir la conformidad con las fechas de entrega pactadas, por lo que están más alineados con los requerimientos de los clientes y filosofías como la producción justo a tiempo en los sistemas de manufactura esbelta (Behnamian et al., 2010; Lu & Logendran, 2013). La tardanza máxima (*maximum tardiness*), la tardanza ponderada total (*total weighted tardiness*) y el número ponderado de trabajos tardíos (*weighted number of tardy jobs*) son algunos objetivos relacionados con las fechas de

entrega de los trabajos (Lu & Logendran, 2013). Un pedido que se termina en una fecha anterior a la fecha de entrega pactada es denominado como un pedido temprano (early job), mientras que un pedido que se termina después de la fecha pactada es un pedido tardío (tardy job) (Pinedo, 2016; Egilmez et al., 2014). Los pedidos tempranos y los pedidos tardíos pueden tener una penalización o costo, por parte de los proveedores o clientes, debido a que no son entregados en la fecha pactada (Behnamian et al., 2010; Keshavarz et al., 2019).

La Tabla 6 1 resume la notación matemática utilizada en los problemas de programación de la producción.

Tabla 61. Notación para problemas de programación de la producción

| Campo | Notación para los problemas de programación de la producción | |
|------------------|--|------------|
| | Entrada ¹ | Notación |
| Notación general | Trabajo/Pedido (<i>job</i>) | (j) |
| | Máquina | (i) |
| | Tiempo de procesamiento de trabajo en máquina | (p_{ij}) |
| | Fechas de entrega de trabajos (<i>due date</i>) | (d_j) |
| | Ponderación (<i>weight</i>) | (w_j) |

1. Remitirse a Pinedo (2016) para definiciones de las entradas.

Fuente: Adaptado de Pinedo (2016)

| Campo | Notación para los problemas de programación de la producción | |
|--|---|--------------------|
| | Entrada ¹ | Notación |
| Ambiente de máquinas (α) | Una sola máquina | (1) |
| | Máquinas idénticas en paralelo | (P_m) |
| | Máquinas en paralelo con diferentes velocidades | (Q_m) |
| | Máquinas no relacionadas en paralelo | (R_m) |
| | Flujo en línea (<i>Flow-shop</i>) | (F_m) |
| | Flujo en línea flexible (<i>Flexible Flow-shop</i>) | (FF_c) |
| | Taller de trabajo (<i>Job-shop</i>) | (J_m) |
| | Taller de trabajo flexible (<i>Flexible Job-shop</i>) | (F_{jc}) |
| | Taller abierto (<i>Open-shop</i>) | (O_m) |
| Características y restricciones de proceso (β) | Prioridades (<i>Preemptions</i>) | ($prmp$) |
| | Tiempos de preparación dependientes de la secuencia (<i>sequence dependent setup times</i>) | (S_{jk}) |
| | Familias de trabajos (<i>job families</i>) | ($fmls$) |
| | Procesamiento por lotes (<i>batch processing</i>) | ($batch(b)$) |
| | Averías (<i>breakdowns</i>) | ($brkdwn$) |
| | Restricciones de elegibilidad de máquinas | (M_j) |
| | Permutación (<i>permutation</i>) | ($prmu$) |
| | Bloqueo (<i>blocking</i>) | ($block$) |
| | Sin espera (<i>no-wait</i>) | (nwt) |
| Objetivos a minimizar (γ) | Tiempo de terminación máximo (<i>Makespan</i>) | (C_{max}) |
| | Demora máxima (<i>Maximum lateness</i>) | (L_{max}) |
| | Tiempo de terminación ponderado total (<i>Total weighted completion time</i>) | ($\sum w_j C_j$) |
| | Tardanza total ponderada (<i>Total weighted tardiness</i>) | ($\sum w_j T_j$) |

Uno de los objetivos al que apunta el modelo integrado de programación de la producción en enfoques de celdas de manufactura con diseño de instalaciones esbeltas es la minimización del costo por tardanza de los pedidos, es decir, la tardanza ponderada total, en donde las ponderaciones

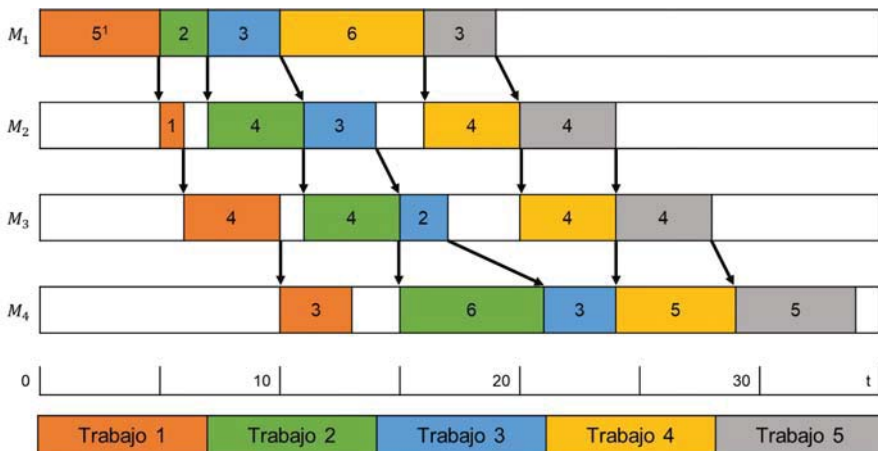
son costos por entregar los pedidos después de la fecha pactada. La tardanza es definida como el tiempo transcurrido entre la terminación de un trabajo (C_j) y la fecha de entrega pactada para el trabajo (d_j) (Pinedo, 2016; Egilmez et al., 2014). Cuando el tiempo de terminación del trabajo es anterior o coincide con la fecha de entrega pactada, la tardanza tiene un valor de cero. Por lo tanto, la tardanza (T_j) es un valor no negativo (Pinedo, 2016; Egilmez et al., 2014), que puede representarse de forma matemática como se muestra en la ecuación (6.1). La tardanza ponderada total (*total weighted tardiness*) es entonces la sumatoria de las tardanzas de los n trabajos multiplicado por las ponderaciones o costos por tardanza (w_j) (Pinedo, 2016).

$$T_j = \max\{0, C - d_j\} \quad (6.1)$$

Tradicionalmente, el problema de programación de la producción ha sido abordado utilizando reglas de secuenciación o de prioridad y heurísticas constructivas (Heizer et al., 2017; Jacobs & Chase, 2018; Nahmias & Olsen, 2015), en donde solo se obtiene una única secuencia de trabajos para un problema de *scheduling* dado (Naderi & Salmasi, 2012). Otros enfoques para la solución de los problemas de programación de la producción incluyen las heurísticas de mejora y las metaheurísticas.

La solución de un problema de *scheduling* usualmente se representa con la secuencia de los trabajos en las máquinas y los tiempos asignados en un diagrama de Gantt, (Heizer et al., 2017; Jacobs & Chase, 2018), el cual es una herramienta visual ampliamente utilizada para controlar el progreso en la producción de las tareas. La figura 6.2 muestra un ejemplo de la representación de una secuencia de producción de 5 trabajos utilizando

un diagrama de Gantt, para un ambiente de producción *flow-shop* con 4 máquinas. Esta figura muestra como el trabajo 1 (en color naranja) toma 5 unidades de tiempo (minutos, segundos, etc.) en procesarse en la máquina 1. Inmediatamente finaliza el trabajo en la máquina 1, el trabajo 1 pasa a ser procesado en la máquina 2, tomando 1 unidad de tiempo, y así sucesivamente hasta que finaliza en la máquina 4, en la unidad de tiempo 13. La máquina 1, una vez finaliza de procesar el trabajo 1 (en color naranja), pasa a procesar el trabajo 2 (en color verde), que toma 2 unidades de tiempo, y así sucesivamente con los demás trabajos. Los espacios en blanco indican los tiempos de ocio de las máquinas en el horizonte de planeación. Objetivos como el *makespan* o el tiempo de terminación total buscan disminuir estos tiempos de ocio de las máquinas, al obtener una secuencia de trabajos que mejore la utilización de las máquinas (Lu & Logendran, 2013).



¹ Los valores al interior de cada recuadro representan los tiempos de procesamiento de cada trabajo en cada máquina.

Figura 6.2. Ejemplo de representación de una secuencia de producción en ambientes *flow-shop* mediante un diagrama de Gantt.

Fuente: Adaptado de Pinedo (2016)

7

PROGRAMACIÓN
DE MODELOS DE
PROGRAMACIÓN
DE LA PRODUCCIÓN
EN CELDAS DE
MANUFACTURA
FLOW-SHOP Y
FLEXIBLE FLOW-
SHOP PRODUCCIÓN

7.1 Modelos de programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* para dos máquinas ($m=2$)

Schaller et al. (2000) definieron la programación de la producción en enfoques de celdas de manufactura en línea o *flow-shop* al considerar un conjunto de trabajos n , cada uno de ellos agrupado en una de las K familias de productos, que requieren ser procesados en las m máquinas agrupadas en celdas de manufactura, en el mismo orden tecnológico, es decir, con un flujo en línea; en donde N_f es el conjunto de trabajos pertenecientes a la familia f , ($N_f = \{1, 2, \dots, n_f\}$) y $F = \{1, 2, \dots, K\}$ el conjunto de K familias de productos (J. E. Schaller et al., 2000). La programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* o de flujo en línea es una extensión del problema de programación de la producción en configuraciones de máquinas *flow-shop* tradicional, en donde la diferencia radica en la búsqueda de una secuencia tanto para los trabajos pertenecientes a cada familia de productos, como para las familias de productos, teniendo en cuenta los tiempos de preparación entre ellas (J. E. Schaller, 2000, 2001). De acuerdo con Blazewicz & Kovalyov (2002), las primeras publicaciones relacionadas con la programación de producción en tecnología de grupos se deben a Petrov (1968) y a Yoshida et al. (1973). Sin embargo, desde el trabajo de J. E. Schaller et al. (2000), el problema de programación de la producción en celdas de manufactura ha aumentado el interés de las comunidades académica e industrial, por lo que diferentes enfoques de modelado y técnicas para resolver múltiples variantes del problema se han propuesto en la literatura científica.

Una de las variantes del problema se presenta cuando las celdas de manufactura que conforman el problema de programación de la producción están conformadas por dos máquinas ($m=2$), asimilándose a casos reales de la industria como en la producción de tableros de circuito impreso (printed circuit boards, PCB), en donde las dos etapas del proceso son realizadas por dos máquinas que conforman la celda de manufactura y se requieren procesar grupos de tableros similares. A partir de formulaciones propuestas para esta variante del problema, algunos modelos matemáticos se han presentado para el problema de programación de la producción con más de dos máquinas. Estas formulaciones fueron obtenidas usando búsquedas en bases de datos científicas como Scopus, la cual contiene publicaciones de alto impacto académico, y utilizando las palabras clave “flowshop”, “flow-shop” y “group scheduling”. La Tabla 7-1 y la Tabla 7-2 resumen algunos de los enfoques para la programación de la producción en celdas de manufactura flow-shop con dos máquinas.

Tabla 7.1. Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con dos máquinas mediante la optimización de la función objetivo

| Autor(es) | Objetivo | Características del problema | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos | |
|------------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|----|-----|----|---|---|
| | | | Ex. | PD | He. | Me | | |
| (D.-L. Yang & Chern, 2000) | C_{max} | t_j | | | x | | * Heurística basada en la regla de Johnson | Datos generados aleatoriamente |
| (Blazewicz & Kovalyov, 2002) | $\sum C_j$ C_{max} | s_{ij} gta | x | x | | | * Programación dinámica | No menciona |
| (Logendran et al., 2003) | $av.F_j$ | s_{ij} t_j | | | x | x | * Heurística <i>Minsetup</i> * Búsqueda tabú (TS) modificado | Datos de la producción de tableros de circuito impreso (PCB) |
| (Liu & Liu, 2010) | $\sum C_j$ | s_{ij} t_j | | | | x | * Optimización por enjambre de partículas (PSO) modificado | Datos generados aleatoriamente |
| (Liu et al., 2013) | C_{max} | s_{ij} $prmu$ t_j | | | | x | * Híbrido entre algoritmos genéticos (GA) y PSO | Datos generados aleatoriamente y datos utilizados en (Salmasi et al., 2010) |

Convenciones: Ex.: Métodos exactos, He.: Heurísticas, Me.: Metaheurísticas. C_{max} : tiempo de terminación del último trabajo en la última máquina, $\sum C_j$: tiempo de terminación total de los trabajos, $av.F_j$ tiempo de flujo promedio. Fuente: Autores.

Tabla 7.2. Publicaciones que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con dos máquinas mediante modelos matemáticos

| Autor(es) | Objetivo | Características del problema | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------|---|---------------------|----|----|------------------|--|---|
| | | | | | Ex | He | Me | Método utilizado | | |
| (Logendran, Salmasi, et al., 2006) | C_{max} | s_{rf} $prmu$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempos de terminación de trabajos * Tiempos de preparación de grupos * Binaria de asignación en secuencia * Binaria de secuencia de grupos | | | x | | <ul style="list-style-type: none"> * Búsqueda tabú (TS) con memoria a corto plazo (TS-STM) * TS con memoria a largo plazo (TS-LT), sobre máxima y mínima frecuencia (TS-LTM-MAX, TS-LTM-MIN) | Datos Generados aleatoriamente |
| (Yazdani Sabouni & Logendran, 2013) | $\sum w_j F_j$ $\sum w_j T_j$ | s_{carry} $fmls$ t_j | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de grupo asignado * Tiempo de terminación de grupo * Tiempo de preparación dependiente del traspaso * Tiempo de inicio y terminación del kit * Tardanza del grupo * Binaria de asignación de grupo * Binaria de secuencia de grupos | | | x | | <ul style="list-style-type: none"> * Heurística de inserciones/intercambios mejorados hacia adelante (FIEI) * Algoritmo genético (GA) * Algoritmo búsqueda tabú (TS) | Datos utilizados en (C.A. Gelogullari & Logendran, 2010) y de la producción de tableros de circuito impreso (PCB) |

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los enfoques de solución en donde se optimiza la función objetivo mediante algoritmos heurísticos y de mejora, Yang & Chern (2000) consideraron el problema de programación de la producción en grupos de flujo en línea en ambientes de dos máquinas, con el fin de minimizar el tiempo de terminación máximo o *makespan* (C_{max}). Los autores incluyeron en el problema tiempos de retirada (t_j) después de que cada trabajo terminado y tiempos de transporte entre las máquinas. D.-L. Yang & Chern (2000) adaptaron el algoritmo de Maggu & Das (Maggu & Das, 1980) con la regla de Johnson (Johnson, 1954) para solucionar el problema descrito. La complejidad de dos problemas de programación de producción en donde se tiene en cuenta la suposición de la tecnología de grupos fue presentado por Blazewicz & Kovalyov (2002). En primer lugar, los autores comprobaron la complejidad del problema de máquinas paralelas para minimizar el tiempo total de terminación ($\sum C_j$), el cual fue solucionado utilizando un algoritmo de programación dinámica. Los autores, además, probaron la complejidad en el sentido ordinario del problema de taller abierto (open-shop) con dos máquinas para minimizar el *makespan* m (C_{max}), sin embargo, la complejidad del problema en el sentido estricto no pudo ser comprobada. (Logendran et al., 2003) discutió el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia (s_{ij}) y traspasos mediante banda transportadora (t_j), adaptándolo al caso de la producción de tableros de circuito impresos (PCB). Los autores tuvieron en cuenta una celda con dos máquinas y tiempos de preparación anticipatorios, es decir realizados antes de que las tareas lleguen a las máquinas. Los autores propusieron una heurística denominada *Minsetup* para alcanzar un límite inferior para el problema minimizando el tiempo de flujo medio ($av.F_j$). Adicionalmente, los autores desarrollaron un algoritmo de búsqueda basado en la búsqueda tabú (*Tabu Search*, *TS*) para resolver las instancias

grandes del problema, identificando la secuencia de los grupos de tableros y la secuencia de las tareas dentro de cada grupo.

(Liou & Liu, 2010) desarrollaron tres métodos para determinar límites inferiores (*lower bounds*) para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia (s_{ij}) y transporte de los trabajos entre máquinas (t_j). Los autores propusieron una modificación al método metaheurístico optimización de enjambre de partículas (*particle swarm optimization, PSO*), el cual fue inicialmente desarrollado para problemas continuos, con el fin de aplicarlo a la generación de secuencias de trabajos discretas en el problema de programación de grupos. Los autores aplicaron el *PSO* utilizando instancias de datos generadas aleatoriamente, obteniendo resultados que demuestran la robustez y la eficiencia de la metaheurística. (Liou et al., 2013) continuó con su investigación en el mismo problema, desarrollando cuatro métodos para obtener límites inferiores (*lower bounds*). Adicionalmente, los autores generaron datos aleatorios del problema y formularon un algoritmo híbrido basado en las metaheurísticas algoritmo genético (*genetic algorithm, GA*) y *PSO* para obtener valores mínimos de *makespan* (C_{max}). Los resultados numéricos indicaron que el algoritmo propuesto se desempeñó mejor que las metaheurísticas *PSO* y *GA* estándar por separado, especialmente para problemas de gran dimensión.

Los enfoques mediante modelado matemático para el problema de programación de la producción en celdas de manufactura de dos máquinas en la literatura inician con lo realizado por (Logendran, et al., 2006), quienes tuvieron en cuenta los tiempos de preparación dependientes de la secuencia para minimizar el *makespan* (C_{max}). Los autores propusieron

diferentes mecanismos para obtener límites inferiores para el problema reducido del problema original de dos niveles, entre ellos dos mecanismos basados en una sola máquina y tiempos de preparación dependientes de la secuencia, y un mecanismo con la estructura de dos máquinas en ambientes en donde los tiempos de preparación son independientes de la secuencia (s_j). El último mecanismo propuesto incluyó un modelo de programación matemática que mantiene la estructura de dos máquinas y los tiempos de preparación dependientes de la secuencia (s_{ij}), sin embargo, el modelo tuvo en cuenta únicamente el nivel superior del problema de programación de grupos, que es la secuencia de las familias o grupos de productos. El modelo estaba conformado por variables de decisión binarias relacionadas con la secuenciación de los grupos en una posición dentro del programa y del procesamiento de dos grupos de forma continua en una secuencia. Adicionalmente, el modelo comprendía las variables de tiempo de terminación en una secuencia y máquina dadas, y los tiempos de preparación para un grupo en una posición de una máquina dada. Para resolver instancias grandes del problema, los autores propusieron tres algoritmos basados en búsqueda tabú (TS), teniendo en cuenta términos de memoria a corto y largo plazo, y diseñaron un experimento computacional para evaluar la metaheurística en tres escenarios diferentes relacionados con los tiempos de preparación. Los resultados arrojaron que el método TS con memoria de largo plazo sobre máxima frecuencia obtuvo mejores resultados para el *makespan* que los algoritmos TS con memoria de corto plazo y con memoria de largo plazo sobre mínima frecuencia. Adicionalmente, los autores encontraron que los algoritmos metaheurísticos requieren menor tiempo computacional para encontrar buenas soluciones en comparación con los métodos utilizados para evaluar los límites inferiores.

(Yazdani Sabouni & Logendran, 2013) desarrollaron un modelo matemático de programación lineal entera mixta (*MILP*) para abordar el problema de programación de grupos de tableros de circuito impresos (*PCB*) con tiempos de preparación dependientes de la secuencia de traspaso en ambientes de dos máquinas (*carryover sequence-dependent setup times*). Los autores utilizaron las instancias de datos generadas por (C.A. Gelogullari & Logendran, 2010), recopiladas de ambientes industriales en el campo de la electrónica, y desarrollaron una heurística de intercambios/inserciones de mejora hacia adelante (*FIEI*) para obtener valores mínimos de tiempo de flujo ponderado total ($\sum w_j^F t_j$) y tardanza ponderada total ($\sum w_j^T t_j$). Los autores compararon los resultados de la heurística FIEI con las metaheurísticas algoritmo genético (genetic algorithm, GA) y búsqueda tabú (TS), logrando concluir que la heurística propuesta es más eficiente, en términos computacionales, que GA y TS, y obtiene resultados de la función objetivo similares a TS.

Los enfoques descritos en esta sección muestran la relevancia académica e industrial de los modelos de programación de la producción en celdas de manufactura con dos máquinas. El uso de técnicas avanzadas de optimización como el uso de la programación matemática y de heurísticas y metaheurísticas en contextos industriales demuestra la evolución del campo de celdas de manufactura y la efectividad de estas técnicas para su solución en el área de operaciones. Estos enfoques y técnicas de solución pueden extrapolarse a los contextos de celdas de manufactura con más de dos máquinas, como se muestra en la siguiente sección, pero también a otros contextos industriales en donde los procesos puedan separarse en etapas que incluyan dos máquinas y los productos puedan agruparse usando la tecnología de grupos.

7.2 Modelos de programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* para varias máquinas ($m > 2$)

Aquí se habla de programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* con varias máquinas con un objetivo. El enfoque de celdas de manufactura de flujo en línea conformadas por más de dos máquinas es el ambiente de programación de producción más frecuente en la industria y la literatura científica. La Tabla 7-3 y la Tabla 7-4 contienen los enfoques programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* con más de dos máquinas, sin enfoques de programación matemática y utilizando programación matemática, respectivamente.

7.2.1 Modelos sin enfoques de programación matemática

(Schaller et al., 2000) describieron el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia de la familia de productos (S_{ij}), y encontraron sus límites inferiores utilizando el método de Ramificación y Acotamiento (*Branch & Bound*, *B&B*), mediante una generalización realizada al problema de programación de producción en ambientes *flow-shop* tradicional. Con el límite inferior hallado, los autores desarrollaron y evaluaron algoritmos heurísticos para minimizar el tiempo de terminación máximo, o *makespan* (C_{max}), tanto para la secuenciación de trabajos dentro de cada familia de productos como para la secuenciación de las familias de productos. Para la secuenciación de los trabajos dentro de las familias, Schaller et al. utilizaron el procedimiento Campbell-Dudek-Smith, CDS (Campbell et al. 1970) y el procedimiento NEH (Nawaz et al., 1983), o algoritmo N. Para la programación de las familias, teniendo en cuenta la dependencia en los tiempos de preparación, los autores utilizaron diferentes procedimientos heurísticos, entre ellos los métodos de Gupta y Darrow (Gupta & Darrow, 1986), de Baker (Baker,

1990) y el método basado en el Problema del Agente Viajero (Gupta, 1986), o también conocido como *Traveling Salesman Problem*, *TSP*. A su vez, los autores presentaron una heurística de descenso que proporciona una solución mejorada dentro del vecindario de soluciones.

Del mismo modo, Schaller et al. (2000) generaron aleatoriamente 30 instancias de datos mediante distribuciones uniformes en tres clases de pruebas, según el tamaño del tiempo de preparación, siendo estos pequeños, medianos o grandes. Los resultados computacionales mostraron que el algoritmo de descenso propuesto, inicializado conjuntamente con los algoritmos CDS y el algoritmo NEH modificado (algoritmo CMD), obtuvo los mejores resultados en todas las instancias generadas. Este enfoque propuesto en (Schaller et al., 2000) sería el punto de partida para futuras publicaciones relacionadas con la programación de la producción en celdas de manufactura. Algunos de estos modelos y técnicas de solución se describen a continuación, con la finalidad de que sean de amplio conocimiento para su potencial aplicación en casos donde se utilicen celdas de manufactura de flujo en línea y no se cuente con el presupuesto o capacidad computacional para resolver el problema usando programación matemática.

El enfoque propuesto en (Schaller, 2001), el autor aplicó el método B&B, utilizado por (Hitomi & Ham, 1976), para obtener un límite inferior más ajustado para instancias pequeñas del problema. Para instancias grandes, el autor desarrolló una heurística de dos fases, la cual usaba el método B&B para determinar la secuencia de familias en la primera fase y un procedimiento de intercambio para determinar la secuencia de los trabajos dentro de las familias en la segunda fase. El autor identificó que, utilizando el nuevo límite inferior para el problema con celdas de manufactura *flow-shop*, tanto el método B&B para instancias pequeñas, como el método

heurístico para instancias grandes, obtuvieron valores de makespan buenos en tiempos computacionales más cortos.

Tabla 7.3. Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con varias máquinas sin modelamiento matemático

| Autor(es) | Objetivo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos |
|---------------------------------|--|---------------------|-----|-----|---|--|
| | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| (J. E. Schaller et al., 2000) | C_{max} | x | x | | * Branch & Bound (B&B) * Heurísticas basadas en CDS, NEH, Gupta-Darrow, Baker * Heurística de descenso * Algoritmo CMD | Datos generados aleatoriamente |
| (J. E. Schaller, 2001) | C_{max} | x | x | | * B&B * Heurística integrando B&B con heurística de intercambio | Datos generados aleatoriamente |
| (J.N.D. Gupta & Schaller, 2006) | $\sum F_j$ | x | x | x | * B&B * Heurística Append y Append extendida * Heurística NEH y NEHextendida * Heurística de descenso * Heurística de mejora iterativa * Algoritmo genético (GA) * Búsqueda tabú (TS) y TS modificado | Datos utilizados en (J. E. Schaller et al., 2000) |
| (Neufeld et al., 2015) | C_{max} | | x | | * Heurísticas basadas en CDS, NEH, CMD, iterativa, de mejora | Datos utilizados en (J. E. Schaller et al., 2000) |
| (Qin et al., 2016) | C_{max} $\sum C_j$ $\sum w_j C_j$ L_{max} | | x | x | * Heurísticas basadas en reglas de secuenciación * GA * Algoritmo de evolución diferencial de inspiración cuántica (QDEA) | Producción de paneles sándwich de aluminio en forma de panel |
| (França et al., 2005) | C_{max} | | x | x | * Heurística Multi-Start (MS) * GA * Algoritmo memético (MA) | Datos utilizados en (J. E. Schaller et al., 2000) |
| (Keshavarz & Salmasi, 2014) | $\sum C_j$ | x | | x | * Branch & Price (B&P) * B&B * GA modificado | Datos utilizados en (Salmasi et al., 2010) |
| (Ibrahim et al., 2014) | $\sum C_j$ | | | x | * GA * Algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) | Datos utilizados en (Salmasi et al., 2011) |
| (Liou & Hsieh, 2015) | C_{max} | | | x | * Híbrido entre PSO y GA | Datos generados aleatoriamente |
| (Costa et al., 2017) | C_{max} | | | x | * Híbrido basado en GA (HGA) | Datos utilizados en (Salmasi et al., 2011) |
| (He, et al. 2021) | $\sum F_j$ | | | x | * Algoritmo inspirado en solución de rompecabezas (JPA) con heurística LRx (JPALRx) | Datos utilizados en (J. E. Schaller et al., 2000) |

Convenciones: Ex.: Métodos exactos, He.: Heurísticas, Me.: Metaheurísticas. C_{max} : tiempo de terminación del último trabajo en la última máquina, $\sum F_j$: tiempo de flujo total, $\sum C_j$: tiempo de terminación total, $\sum w_j C_j$: tiempo de terminación ponderado total, L_{max} : retraso máximo.

Fuente: Autores.

(Gupta & Schaller (2006) consideraron como función objetivo la minimización del tiempo de flujo total (*total flow time*, $\sum F_j$), el cual es la sumatoria de los tiempos de terminación de todos los trabajos. El método B&B fue propuesto para encontrar el tiempo de flujo total óptimo para el problema. Adicionalmente, los autores abordaron el problema mencionado utilizando combinaciones de métodos heurísticos como son los algoritmos Append (Rajendran & Chaudhuri, 1992), NEH, los métodos de descenso y de mejora iterativa utilizados en (Schaller, 2000), y las metaheurísticas algoritmos genéticos, GA, y búsqueda tabú, TS. Los experimentos computacionales realizados con instancias del problema generadas aleatoriamente indicaron que los algoritmos de descenso, de mejora, el TS y dos algoritmos basados en TS obtuvieron mejores resultados que el algoritmo genético. Sin embargo, se encontró que los algoritmos basados en TS requirieron una capacidad computacional superior.

Neufeld et al. (2015) decidieron continuar con la investigación realizada por (Schaller et al., 2000), proponiendo heurísticas basadas en los algoritmos CDS, NEH y CMD para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y considerando los tiempos de ocio de las máquinas, para minimizar el *makespan*. Los autores evaluaron las heurísticas propuestas y encontraron que la heurística IHD obtuvo un error relativo medio de 3,09%, en comparación con el mejor algoritmo CMD (3,75%), el cual fue la mejor heurística presentada por Schaller et al.

Tabla 7.4. Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con varias máquinas utilizando modelos matemáticos

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos |
|--------------------------|------------|---------------------|--|---------------------|-----|-----|---|---|
| | | | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| (Salmasi et al., 2010) | $\sum F_j$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempos de terminación de trabajos * Tiempos de terminación de la posición en la secuencia * Tiempo de preparación de grupos * Binaria de asignación de grupo * Binaria de asignación de trabajo * Binaria de secuenciación de grupos | x | x | x | <ul style="list-style-type: none"> * Branch & Price (B&P) * Búsqueda tabú (TS) * Híbrido basado en optimización por colonia de hormigas (ACO), integrando la heurística NEH (HACO) | Datos utilizados en (Schaller et al., 2000) Datos generados aleatoriamente |
| (Salmasi et al., 2011) | C_{max} | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempos de terminación de trabajos * Tiempos de terminación de la posición en la secuencia * Tiempo de preparación de grupos * Binaria de asignación de grupo * Binaria de asignación de trabajo * Binaria de secuenciación de grupos | | | x | <ul style="list-style-type: none"> * Híbrido basado en ACO, integrando la heurística NEH (HACO) | Datos generados aleatoriamente |
| (S.-W. Lin & Ying, 2019) | C_{max} | BIP | <ul style="list-style-type: none"> * Binaria de asignación de ciudades en el tour | x | x | | <ul style="list-style-type: none"> * Heurística Lin-Kernighan-Helsgaun (LKH) | Datos utilizados en (Schaller et al., 2000) y en (França et al., 2005) |
| (Naderi & Salmasi, 2012) | $\sum C_j$ | MILP | <p>Modelo 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Binaria de secuenciación de trabajos * Binaria de secuenciación de grupos | | | x | <ul style="list-style-type: none"> - Híbrido entre algoritmo genético (GA) y templado simulado (SA): (GSA) | Datos utilizados en (Salmasi et al., 2010) |

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos |
|--------------------------|------------|---------------------|--|---------------------|-----|-----|---|-------------------------------------|
| | | | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de último trabajo de grupo * Tiempo de inicio de primer trabajo de grupo * Tiempo de terminación de trabajos Modelo 2: <ul style="list-style-type: none"> * Binaria de posición de trabajo en secuencia * Tiempo de terminación de trabajo en posición de secuencia | | | | | |
| (Behjat & Salmasi, 2017) | $\sum C_j$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de último trabajo de grupo * Tiempo de inicio de primer trabajo de grupo * Tiempo de terminación de tareas * Binaria de secuenciación de tareas * Binaria de asignación de grupos | | | x | * PSO con modificaciones (5 algoritmos) * Búsqueda en vecindario variable (VNS) (2 algoritmos) | Datos utilizados en (Salmasi, 2005) |

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos |
|--------------------------|---------------------------|---------------------|--|---------------------|-----|-----|--|---|
| | | | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| (Keshavarz et al., 2019) | $\sum(w_j E_j + w_j T_j)$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de tareas * Tiempo de terminación de grupos * Tiempo de inicio de grupos * Anticipación de tareas * Tardanza de tareas * Binaria de procesamiento de tareas * Binaria de secuenciación de grupos | x | x | x | <ul style="list-style-type: none"> * B&P * Heurísticas basadas en las reglas de secuenciación * Híbridos basados en PSO (HPSO) (4 algoritmos) | Datos utilizados en (Salmási et al., 2010) y Datos generados aleatoriamente |
| (He et al., 2023) | C_{max} | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempos de terminación de las operaciones en las máquinas * Binaria de secuenciación de tareas * Binaria de secuenciación de grupos | x | x | | <ul style="list-style-type: none"> * Branch & Cut (B&C) * Algoritmo Voraz Iterado (IG) | Datos utilizados en (Schaller et al., 2000) |

Convenciones: Ex.: Métodos exactos, He.: Heurísticas, Me.: Metaheurísticas, MILP: Programación Lineal Entera Mixta, BIP: Programación Entera Binaria, C_{max} : tiempo de terminación del último trabajo en la última máquina, $\sum F_j$: tiempo de flujo total, $\sum C_j$: tiempo de terminación total, $\sum(w_j E_j + w_j T_j)$: tiempo total de anticipo y tardanza ponderadas.

Fuente: Autores.

(Qin et al. (2016) tuvo en cuenta el efecto de aprendizaje como característica del problema de programación de grupos en ambientes *flow-shop*. En primer lugar, los autores introdujeron cuatro heurísticas basadas en reglas de secuenciación de grupos, como son la regla del programa aleatorio ocupado (*random busy schedule rule, Random*), la regla de primero el tiempo de procesamiento más pequeño de grupo con efecto de aprendizaje (*group smallest processing time first with learning effect, GSPT-LE*), la regla de primero el tiempo de procesamiento promedio más pequeño de grupo con efecto de aprendizaje (*group average smallest processing time first with learning effect, GASPT-LE*) y la regla de primero el tiempo de procesamiento ponderado más corto de grupo (*group shortest weighted processing time first, GSWPT*). Adicionalmente, los autores propusieron las metaheurísticas algoritmo genético (*GA*) y algoritmo evolutivo diferencial de inspiración cuántica (*quantum differential evolution algorithm, QDEA*). Los autores desarrollaron pruebas de tasas del peor caso (*worst-case ratio tests*), encontrando límites superiores para las heurísticas propuestas. Sin embargo, los autores también encontraron desempeños con desviaciones de 5,34% al 21,1% con respecto al óptimo para las heurísticas. En cuanto al desempeño de las metaheurísticas, los autores concluyeron que tanto *GA* y *QDEA* obtuvieron mejores resultados que las heurísticas propuestas, y que *GA* se desempeñó de mejor manera que *QDEA*. Los resultados presentados por los autores corresponden al caso de una planta de producción de paneles sándwich de nido de abeja en aluminio (*aluminum honeycomb sandwich panels, AHSP*), utilizados como componentes de satélites estándar.

França et al. (2005) abordaron el problema de programación de la producción en enfoques de celdas de manufactura con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y con permutación. Para ello, los autores adaptaron los algoritmos genéticos (*GA*) y memético (*memetic algorithm, MA*) y los aplicaron con y sin variaciones en la estructura de las

poblaciones. Adicionalmente, el autor comparó los algoritmos evolutivos con el mejor algoritmo presentado en (Schaller et al., 2000) y con la heurística denominada Algoritmo Multi-Start (*MS*). Los autores utilizaron las instancias de datos generadas en (Schaller et al., 2000) para evaluar los resultados del makespan de los diferentes algoritmos, encontrando que los métodos evolutivos, que utilizaron las estructuras de población propuestas por los autores, y el algoritmo *MS* alcanzaron el límite inferior conocido en la mayoría de las instancias utilizadas, en comparación con los algoritmos evolutivos sin las estructuras de población propuestas y el mejor método de Schaller et al., que solo lo alcanzaron en algunas instancias.

Keshavarz & Salmasi (2014) mejoraron el método *branch & price* (*B&P*) desarrollado por (Salmasi et al., 2010) y desarrollaron un método *B&B* para obtener límites inferiores y superiores para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y con el supuesto de permutación. Los autores desarrollaron un algoritmo híbrido basado en *GA* y compararon sus resultados con los algoritmos de optimización por enjambre de partículas (*PSO*), propuesto por (Hajinejad et al., 2011), y el algoritmo híbrido entre *GA* y *SA* (*GSA*), desarrollado por (Naderi & Salmasi, 2012). Los autores concluyeron que el algoritmo *B&P* propuesto redujo el porcentaje de brecha promedio, en comparación con el límite inferior encontrado en (Salmasi et al., 2010). Los resultados computacionales también indicaron que el algoritmo basado en el *GA* se desempeñó mejor que las metaheurísticas *PSO* y *GSA*.

Ibrahim et al. (2014) propusieron modificaciones a las metaheurísticas *GA* y *PSO* para obtener algoritmos robustos que resuelvan satisfactoriamente el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Un diseño de experimentos fue aplicado para comparar los resultados de *GA* y *PSO* con

los límites inferiores presentados por (Salmasi et al., 2010). Los resultados estadísticos indicaron que el algoritmo PSO es más robusto que el *GA*.

(Liou & Hsieh, 2015) continuaron con el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia, incluyendo tiempos de transporte. Los autores desarrollaron un método híbrido entre el algoritmo *PSO* y *GA*, con un nuevo esquema de codificación para lograr una secuencia de tareas factible. Adicionalmente, los autores extendieron los métodos de límite inferior propuestos por (Logendran, Salmasi, et al., 2006) para el problema abordado. El algoritmo híbrido propuesto se desempeñó mejor que los algoritmos estándar *PSO* y *GA*, especialmente para problemas de gran dimensión.

(Costa et al., 2017) propusieron un algoritmo híbrido basado en *GA*, con el fin de competir con el algoritmo híbrido basado en la *PSO*, y con el algoritmo *GSA* presentado por Naderi & Salmasi. Los autores calibraron los parámetros para el algoritmo híbrido propuesto y evaluaron instancias de datos con el fin de compararlo con los algoritmos *HPSO* y *GSA*. Los resultados numéricos indicaron que el *HGA* obtuvo mejores valores para *makespan*, con respecto a los algoritmos *HPSO* y *GSA*.

Más recientemente, He et al. (2021) propusieron una heurística constructiva novedosa, denominada *JPALRx* para optimizar el tiempo de flujo total de los trabajos para el modelo con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. La heurística genera primero una secuencia de las familias de productos utilizando un algoritmo inspirado en la resolución de rompecabezas (*Jigsaw Puzzle Algorithm, JPA*), considerando los tiempos de preparación entre familias. Por su parte, la secuencia de trabajos dentro de cada familia se obtiene a través de una heurística denominada *LRx*. Finalmente, la solución se mejora en calidad de la solución utilizando un operador de inserción basado en las familias de productos.

7.2.2 Modelos con enfoques de programación matemática

(Salmasi et al., 2010) fueron los primeros en publicar un modelo para el problema de programación de familias de productos en varias máquinas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y la suposición de permutación, con el objetivo de minimizar el tiempo de flujo total. Los autores propusieron un modelo de programación lineal entera mixta (*MILP*), similar al presentado por (Logendran, Salmasi, et al., 2006) para desarrollar un límite inferior utilizando el método *Branch and Price (B&P)*. El modelo propuesto tuvo en cuenta las variables de decisión de tiempo de terminación de los trabajos en una posición de la secuencia y una máquina dadas, el tiempo de preparación para un grupo asignado en una posición y una máquina dadas, y las variables binarias relacionadas con la asignación de los grupos y los trabajos en una posición dada, y de asignación de los grupos en una secuencia dada. Adicionalmente, los autores desarrollaron un algoritmo entre la optimización por colonia de hormigas (*ant colony optimization, ACO*) y la heurística NEH (M. Nawaz et al., 1983), formando un híbrido de optimización por colonia de hormigas (*HACO*).

Los autores aplicaron el algoritmo *HACO* y la metaheurística búsqueda tabú (*TS*) a instancias de datos conformadas por 10 grupos de productos asignados a una celda de manufactura, con un rango de entre 2 y 10 tareas por cada grupo, como lo especifican las instancias presentadas por (Schaller et al., 2000), para celdas de manufactura conformadas por dos, tres y seis máquinas, con el fin de obtener valores mínimos del tiempo de flujo total. Los autores utilizaron el software ILOG CPLEX 9.0 para obtener el límite inferior del problema y llevaron a cabo experimentos computacionales, que les permitió concluir que el algoritmo híbrido obtiene mejores resultados que el *TS*, en tiempos computacionales más cortos.

En otro trabajo, (Salmasi et al., 2011) adaptaron y mejoraron el modelo de programación lineal entera mixta (MILP) propuesto por (Logendran, Salmasi, et al., 2006) para obtener límites inferiores para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia, con el fin de obtener el mínimo makespan. Los autores describieron la relajación del modelo matemático para el límite inferior, con el fin de facilitar su solución a través del software ILOG CPLEX 9.0. Los autores además propusieron un algoritmo híbrido entre la metaheurística optimización por colonia de hormigas (*ACO*) y el algoritmo NEH (Nawaz et al., 1983) y compararon sus resultados con el algoritmo memético (*MA*) de (França et al., 2005). Instancias de datos más ajustadas al sector industrial fueron propuestas para el problema por parte de los autores. Los resultados computacionales indicaron que el algoritmo híbrido basado en *ACO* se desempeñó de mejor manera que el *MA*.

(Lin & Ying, 2019) tuvieron en cuenta el supuesto de *no-wait* o de no interrupción en el procesamiento de las familias de productos con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Los autores lograron obtener resultados óptimos para el *makespan* utilizando una ‘mate-heurística’ de dos fases. En la primera fase, el problema abordado fue transformado en un problema de agente viajero asimétrico (*assymetric traveling salesman problem, ATSP*), y formulado como un modelo de programación entera binaria (*binary integer programming, BIP*), para ser resuelto inicialmente mediante el algoritmo Lin-Kernighan-Helsgaun (*LKH*) (K. Helsgaun, 2000). Esta solución inicial fue elemento de entrada para la segunda fase de la *mate-heurística*, en donde el problema fue resuelto como un modelo de programación lineal entera mixta (*MILP*) en el optimizador Gurobi 6.5. Los resultados computacionales, utilizando las instancias de datos generadas por (Schaller et al., 2000) y (França et al., 2005) mostraron que la mate-heurística obtuvo valores óptimos para

el *makespan*. Estos valores fueron comparados con los resultados obtenidos por la metaheurística templado simulado (*SA*), presentada por (Ying et al., 2012), por el algoritmo *LKH* (únicamente la primera fase) y por el modelo *MILP* (únicamente la segunda fase).

Dos nuevos modelos de programación lineal entera mixta (*MILP*) fueron propuestos por (Naderi & Salmasi, 2012), con el fin de mejorar el modelo matemático propuesto por (Salmasi et al., 2010) para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia, y con el objetivo de minimizar el tiempo de terminación total. Los autores compararon el desempeño de los dos modelos propuestos con el modelo presentado por Salmasi et al. (2010), mediante la obtención de valores óptimos usando el uso del software CPLEX 10. Adicionalmente, los autores desarrollaron y aplicaron un algoritmo híbrido que combina los beneficios de los algoritmos genético (*GA*) y templado simulado (*SA*), y compararon los resultados con los obtenidos por (Salmasi et al., 2010), a través de los algoritmos búsqueda tabú (*TS*) y optimización por colonia de hormigas (*ACO*). Los autores concluyeron que el modelo 2, permitió la obtención de valores óptimos en problemas más complejos que el modelo 1 propuesto y el modelo de Salmasi et al. En relación con la metaheurística propuesta (*GSA*), los autores indicaron que esta se desempeña mejor que los algoritmos *ACO* y *TS*.

(Behjat & Salmasi, 2017) tuvieron en cuenta el supuesto de que las tareas no pueden esperar entre dos máquinas sucesivas (*no-wait*) para el problema. Los autores propusieron un modelo matemático basado en el modelo de programación lineal entera mixta formulado por (Naderi & Salmasi, 2012), incluyendo el supuesto de *no-wait* y para minimizar el tiempo de terminación total. El modelo matemático fue resuelto para pequeñas instancias utilizando el software de optimización CPLEX 12.2,

mientras que los autores utilizaron modificaciones de las metaheurísticas optimización por enjambre de partículas (*PSO*) y búsqueda en vecindario variable (*variable neighborhood search, VNS*) para resolver las instancias grandes del problema.

(Keshavarz et al., 2019) tuvieron en cuenta los objetivos de sumatoria total de anticipación ponderada y de tardanza ponderada (total weighted earliness and weighted tardiness, $\sum(w_j E_j + w_j T_j)$) para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia de las familias y teniendo en cuenta el supuesto de permutación. Los autores formularon un modelo matemático de programación lineal entera mixta (MILP) para el problema, basado en el modelo presentado por (Naderi & Salmasi, 2012) para minimizar el tiempo de terminación total. Adicionalmente, los autores presentaron un método para encontrar límites inferiores para el problema, basado en el método desarrollado por (Salmasi et al., 2010) y mejorado por (Keshavarz & Salmasi, 2014), mediante el algoritmo *B&P*. Para resolver el problema abordado, se definieron nueve heurísticas basadas en reglas de secuenciación para obtener secuencias iniciales de tareas y de grupos de familias que, a su vez, fueron elementos de entrada para las cuatro metaheurísticas propuestas basadas en optimización por enjambre de partículas (*PSO*). Las reglas de secuenciación consideradas fueron primero el tiempo de entrega más cercano (*earliest due date, EDD*), la tasa de tardanza/anticipación más larga (*longest tardiness/earliness rate, LTER*) y un algoritmo para minimizar la anticipación y tardanza total para una sola máquina (*minimize total earliness and tardiness with loose or tight due dates for single machine, METSM*). Los autores concluyeron que la heurística *EDD-LTER*, para secuenciar trabajos y grupos, respectivamente, obtuvo el mejor desempeño. Adicionalmente, se concluyó que el método HPSO1 fue más eficiente que los demás algoritmos basados en *PSO*, a pesar de obtener resultados similares para la anticipación y tardanza ponderadas que los algoritmos HPSO3 y HPSO4.

He et al. (2023) construyeron un modelo de programación lineal entera mixto (*MILP*) con el objetivo de minimizar el *makespan* al aproximar el problema de programación en celdas de manufactura a uno de *ATSP*. Adicionalmente, los autores aplicaron un algoritmo matheurístico, en donde integraron técnicas de optimización exactas, como es el algoritmo de ramificación y corte (Branch & Cut, B&C), con la heurística algoritmo voraz iterado (*Iterated Greedy, IG*), el cual es una técnica aproximada.

7.3 Modelos de Programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* con varias máquinas multiobjetivo.

La Tabla 7.5 y la Tabla 7.6 presentan las publicaciones que abordan el problema de programación en celdas de manufactura con varias máquinas multiobjetivo sin un enfoque de modelos matemáticos y mediante modelos matemáticos.

7.3.1 Modelos sin enfoques de programación matemática

Minimizar el *makespan* y el tiempo de flujo total simultáneamente para el problema de programación de familias de productos con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y permutación fue el problema abordado por (Hendizadeh et al., 2007). Los autores primero identificaron los límites inferiores para el *makespan*, utilizando los resultados presentados por (Schaller, 2000), y para el tiempo de flujo total, adaptaron el método utilizado por (Gupta & Schaller, 2006) para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. El límite inferior fue alcanzado utilizando una adaptación del método *B&B* propuesto por (Ham et al., 1985). Los autores propusieron un algoritmo genético multiobjetivo (*MOGA*) con el fin de obtener resultados cercanos al óptimo para el *makespan* y tiempo de flujo total, para tamaños de instancias pequeñas,

Tabla 7.5. Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con múltiples objetivos sin enfoques de modelamiento matemático

| Autor(es) | Objetivo | Métodos de solución | | | | Sector / Instancia de datos |
|---------------------------------|---|---------------------|-----|-----|--|---|
| | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| (Hamed Hendizadeh et al., 2007) | C_{max} $\sum F_j$ | x | | x | * Branch & Bound (B&B) modificado * Algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) | Datos utilizados en (J. E. Schaller et al., 2000) Generados aleatoriamente |
| (S.-W. Lin & Ying, 2012) | C_{max} $\sum C_j$ y C_{max} $\sum T_j$ | | x | x | * Híbrido entre SA y algoritmo multi-start (MS) (TLMSA) | Generados aleatoriamente |
| (Venkataraman et al., 2008) | $\sum (w_1 C_{max} + w_2 F_j + w_3 I)$ | | x | x | * Híbrido basado en templado simulado (SA), integrando las reglas de despacho * Híbrido basado en SA, integrando las reglas de despacho | Generados aleatoriamente |

Convenciones: Ex.: Métodos exactos, He.: Heurísticas, Me.: Metaheurísticas. C_{max} : tiempo de terminación del último trabajo en la última máquina, $\sum F_j$: tiempo de f.ujo total, $\sum C_j$: tiempo de terminación total, $\sum T_j$: tardanza total, $\sum I$: ocio total de las máquinas. **Fuente: Autores.**

como las presentadas en (Schaller, 2000), y para tamaños de instancias grandes. Los resultados computacionales indicaron que el *MOGA* alcanzó una desviación inferior al 1% y aproximadamente 1%, con respecto al límite inferior encontrado, para los tamaños de instancias pequeñas y grandes, respectivamente. La metaheurística, adicionalmente, obtuvo resultados muy cercanos al óptimo en tiempos computacionales más cortos, en relación con el método *B&B* utilizado para encontrar el límite inferior.

(Venkataramanaiah, 2008) abordó el problema con operaciones faltantes. La característica de operaciones faltantes significa todos los trabajos mantienen un flujo de operaciones secuencial, sin embargo, ciertos trabajos pueden omitir pasar por algunas máquinas para ser procesados, debido a las características de los productos. El autor propuso una metaheurística basada en *SA* con nueve reglas de despacho: tiempo de procesamiento más corto (*SPT*), tiempo de procesamiento más largo (*LPT*), primero en entrar primero en salir (*FIFO*), selección aleatoria (*RAND*), tiempo de procesamiento incluyendo el contenido de trabajo de las órdenes en la cola (*PT+WINQ*), *PT+WINQ* considerando el tiempo de procesamiento de la siguiente operación (*PT+WINQ+NPT*), entre otras, además de un algoritmo basado en *SA* con tres reglas de despacho, incluyendo *SPT*, *PT+WINQ* y *2PT+WINQ+NPT* para encontrar la sumatoria ponderada de *makespan*, tiempo de flujo y tiempo de ocio mínimo de las máquinas. Del mismo modo, el autor comparó el desempeño del algoritmo *SA* con nueve reglas de despacho con las heurísticas *NEH* (Nawaz et al., 1983), para evaluar el *makespan*, y *RC* (Rajendran, 1993), para evaluar el tiempo de flujo. Los resultados indicaron que el algoritmo propuesto por el autor se desempeña mejor que el algoritmo *NEH* y *RC*, cuando el porcentaje de operaciones faltantes es superior al 50%.

Dos problemas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia fueron abordados por (Lin & Ying, 2012). El primer problema buscó minimizar simultáneamente el makespan y el tiempo de flujo total, mientras que el segundo problema buscó minimizar simultáneamente el makespan y la tardanza total. Los autores desarrollaron una heurística de dos niveles basada en *SA*, integrando el algoritmo *multi-start (MS)*, con el fin de obtener valores de los indicadores de desempeño mencionados, y comparando estos resultados con los obtenidos por (Hendizadeh et al., 2007), usando el *MOGA*. Los resultados computacionales y estadísticos indicaron que el algoritmo propuesto (*TLMSA*) se desempeña mejor que el *MOGA*, de manera significativa.

7.3.2 Modelos con enfoques de programación matemática

(Lu & Logendran, 2013) desarrollaron un modelo matemático de programación lineal entera mixta para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y dinamismo en los tiempos de liberación de las tareas y en la disponibilidad de las máquinas, para minimizar simultáneamente el tiempo de terminación ponderado total y la tardanza ponderada total. Del mismo modo, los autores formularon diez algoritmos basados en *TS*, modificando los mecanismos de búsqueda inicial y las características del algoritmo como la memoria a corto y largo plazo, el tamaño de la lista tabú, la frecuencia de aplicación de la memoria a largo plazo, entre otros. El software CPLEX 12.2 fue utilizado para resolver óptimamente nueve de las doce instancias del problema, y sus resultados fueron comparados con los algoritmos tabú desarrollados.

Tabla 7.6. Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura con múltiples objetivos mediante modelos matemáticos

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos |
|------------------------|----------------------------------|---------------------|---|---------------------|-----|-----|---|--|
| | | | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| (Lu & Logendran, 2013) | $\sum w_j C_j$ $\sum w_j T_j$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de tareas * Tardanza de tareas * Tiempo de preparación de grupos * Tiempo de terminación de la secuencia * Binaria de asignación de grupo * Binaria de secuenciación de tarea * Binaria de asignación de grupo en secuencia | | | x | * TS con modificaciones (10 algoritmos) | Datos generados aleatoriamente y datos utilizados en (Schaller et al., 2000) |

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | Sector/ Instancia de datos | |
|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------|---|---------------------|-----|-----|--|--|
| | | | | Ex. | He. | Me. | | |
| (Yazdani Sabouni & Logendran, 2018) | $\sum w_j F_j$ $\sum w_j T_j$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de grupo asignado * Tiempo final de ensamble de tablero de tablero * Tiempo final de kit de tablero * Tiempo de preparación de grupo * Tiempo final de grupo * Tardanza de tablero * Componente requerido por grupo asignado * Binaria de asignación de grupo * Binaria de secuenciación de grupo * Binaria de componente en alimentador para grupo * Binaria de preparación en alimentador | x | x | x | <ul style="list-style-type: none"> * B&P * Heurísticas CFIM1 y CFIM2 * TS | Datos de la producción de tableros de circuito impreso (PCB) |

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------|--|---------------------|-----|-----|---|----------------------------------|
| | | | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| (Khalid et al., 2019) | <i>WIP</i> <i>av. util.</i> | ILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de llegada de partes * Tiempo de procesamiento de partes * Tiempo de preparación de partes * Tiempo de inicio de partes * Tiempo de terminación de partes * Tiempo de espera de partes en cola | | x | x | <ul style="list-style-type: none"> * Regla de secuenciación EDD * Heurística NEH * GA * PSO * Híbrido entre PSO y heurística NEH (NEPSO) | Datos de la Industria automotriz |

Condiciones: Ex.: Métodos exactos, He.: Heurísticas, Me.: Metaheurísticas. MILP: Programación Lineal Entera Mixta, ILP: Programación Lineal Entera. $\sum w_j C_j$: tiempo de terminación total ponderado, $\sum w_j F_j$: tiempo de flujo total ponderado, $\sum w_j T_j$: tardanza ponderada total, *WIP*: inventario de trabajo en proceso, *av. util.*: utilización promedio de las máquinas. **Fuente:** Autores.

(Yazdani Sabouni & Logendran, 2018) continuaron con la investigación realizada en (Yazdani Sabouni & Logendran, 2013) y formularon un modelo de programación lineal entera mixta para el ensamble de tableros de circuito impreso (*PCB*). Los autores redujeron el número de variables en comparación con la investigación previamente realizada y presentaron un algoritmo branch & price (*B&P*) para obtener límites inferiores para el problema abordado. Los resultados del *B&P* fueron comparados con la aplicación del software ILOG CPLEX, con las heurísticas basadas en el algoritmo de movimientos de mejora hacia adelante cíclicos (*cycle forward improving moves, CFIM*) y con la metaheurística *TS*. Los autores concluyeron que el método *B&P* fue superior en obtener límites inferiores de calidad en tiempos computacionales razonables, en comparación con el software CPLEX.

(Khalid et al., 2019) buscaron optimizar los objetivos de inventario en proceso (*work-in-process inventory, WIP*) y la utilización promedio de máquinas para el caso de celdas de manufactura de flujo en línea en la producción de autopartes. Los autores formularon un modelo matemático y un método híbrido basado en la metaheurística *PSO* y el algoritmo *NEH*, al cual denominaron *NEPSO*. Los autores realizaron experimentos de simulación en donde compararon los resultados obtenidos para el *WIP*, la subutilización y el conjunto de los dos objetivos, para la regla de secuenciación de primero el tiempo de entrega más cercano (*EDD*), el algoritmo *NEH*, el *GA*, el algoritmo *PSO* y el algoritmo *NEPSO*. Los autores concluyeron que, de las 14 instancias evaluadas, 13 fueron dominadas por el algoritmo propuesto.

7.4 Modelos de simulación en la programación de la producción en celdas de manufactura flow-shop.

La simulación de la programación de la producción de celdas de manufactura puede ser realizada utilizando diferentes métodos como Heurísticas híbridas y reglas de secuenciación, Reglas de secuenciación y Simulación basada en multi-agentes (*MAS*), tal y como se muestra en la Tabla 7-7.

Tabla 7.7. Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura mediante modelos de simulación

| Autor(es) | Objetivo | Métodos de solución | | | | | Sector/ Instancia de datos |
|---------------------------|--|---------------------|-----|-----|-----|--|--|
| | | Ex. | He. | Me. | Si. | Método utilizado | |
| (Reddy & Narendran, 2003) | $av. \sum F_j$ $av. \sum T_j$ $\% U_j$ | | x | | x | * Heurísticas híbridas entre PH, MH, MJ y reglas de secuenciación FCFS, SPT, EDD | Datos generados aleatoriamente |
| (Q. Chen et al., 2006) | $av. \sum T_j$ <i>thr</i> | | | | x | * Reglas de secuenciación: FCFS, LST, NCF, LPT, NC | Datos de la fabricación de semiconductores |
| (Renna, 2011) | <i>thr time</i> $av. thr time$ <i>thr</i> WIP <i>av. util.</i> $\sum T_j$ | | | | x | * Simulación basada en multi-agentes (MAS) | Datos generados aleatoriamente |
| (M.M. Baldi, 2018) | C_{max} WIP LT | | | | x | * Software Preactor | Datos generados aleatoriamente |

Convenciones: Ex.: Métodos exactos, He.: Heurísticas, Me.: Metaheurísticas, Si.: Simulación. *av. F_j*: tiempo de flujo promedio, *av. T_j*: tardanza promedio, *%U_j*: porcentaje de tareas tardías, *thr*: throughput o tasa de salida, *thr time*: tiempo de throughput, WIP: inventario de trabajo en proceso, *av. util.*: utilización promedio de las máquinas, *C_{max}*: tiempo de terminación del último trabajo en la última máquina. **Fuente: Autores.**

(Reddy & Narendran, 2003) propusieron un método heurístico y utilizaron las heurísticas de despacho propuestas por (Frazier, 1996) y (Mahmoodi & Martin, 1997), en conjunto con las reglas de secuenciación primero en llegar-primero en servir (*FCFS*), tiempo de procesamiento más corto (*SPT*) y tiempo de entrega más temprano (*EDD*) para conformar heurísticas de programación de grupos, con el fin de resolver el problema de programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea, con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y manteniendo el orden de procesamiento de las tareas y de los grupos de tareas, característica conocida como permutación. En total, los autores probaron 9 heurísticas de programación de grupos mediante experimentos computacionales, evaluando el tiempo promedio de la tarea en el sistema, la tardanza media y el porcentaje de tareas tardías ($\% U_j$). Adicionalmente, los autores tuvieron en cuenta diferentes parámetros para factores como la tasa entre la preparación de la familia y los tiempos de procesamiento de las tareas, conocido como *S/R ratio*, los tiempos de procesamiento de las familias y el porcentaje de carga del taller, y finalmente, las fechas de entrega establecidas a la llegada de las tareas al sistema. Los autores concluyeron que la heurística propuesta, en conjunto con las reglas de secuenciación, se desempeña mejor en los indicadores medidos para el experimento computacional.

Un modelo de simulación que representaba la programación de dos celdas de manufactura para una planta de producción de semiconductores de *A&T* fue propuesto por (Chen et al., 2006). Los autores validaron el modelo utilizando datos reales de la planta, y evaluaron diferentes políticas de secuenciación, como primero en entrar-primero en servir (*FCFS*), menor tiempo de inactividad (*least slack time, LST*), necesaria en celda 2 primero (*needed by cell 2 first, NCF*), menor tiempo de procesamiento (*least processing time, LPT*) y sin conversión primero (*no conversion first, NC*). Para ello, los autores tuvieron en cuenta los indicadores de tardanza media, *average tardiness*, y *throughput (thr)*, que es la tasa real de trabajo realizado en un período de tiempo. Los autores aplicaron la simulación

en el programa Extend y concluyeron que el manejo de lotes pequeños favorece el indicador de fechas de entrega, es decir, la tardanza media, mientras que los lotes grandes favorecen el throughput o tasa de salida del sistema, por lo cual se debe mantener un balance entre estos dos indicadores mediante el uso de lotes intermedios. Adicionalmente, los autores identificaron que la política de secuenciar primero los lotes de 'no conversión' (NC) lograba buenos resultados tanto para los indicadores de tardanza como de *throughput* para la celda 2, la cual se identificó como el cuello de botella del sistema. Por su parte, para la celda 1 no existe diferencia entre las políticas de secuenciación, a excepción de la política de tiempos de procesamiento largos (LPT), la cual deteriora la medida de tardanza.

(Renna, 2011) tuvo en cuenta diferentes niveles de dinamismo en el problema de programación en enfoques de celdas de manufactura, mediante la simulación basada en agentes (*multi-agent based Simulation, MAS*). Los autores utilizaron el software Arena para la simulación, en donde se evaluaron los diferentes escenarios de dinamismo para el problema. El sistema tuvo en cuenta indicadores de desempeño como el tiempo *throughput*, el tiempo *throughput* promedio, el *throughput*, el *WIP*, la utilización promedio del sistema y el tiempo de tardanza total de las partes.

En su trabajo, (Baldi, 2018) abordó un caso real del sector de autopartes en Brasil, en donde se propuso un sistema de planeación avanzado (*advanced planning system, APS*) para la fabricación de discos y platos en ambientes de manufactura celular. El autor consideró la demanda, el listado de materiales y el listado de procesos de las familias de productos para diseñar un procedimiento de programación de la producción que impactara el *makespan*, el tiempo de entrega (*lead time, LT*) y el *WIP*. El modelo propuesto fue desarrollado a través del software Preactor.

7.5 Modelos de programación de la producción en celdas de manufactura flow-shop flexibles

La Tabla 7-8 y la Tabla 7-9 presentan las publicaciones que abordaron el problema de programación de la producción en celdas de manufactura flow-shop flexibles sin la formulación de un modelo matemático y utilizando modelos matemáticos, respectivamente.

7.5.1 Modelos sin enfoques de programación matemática

Logendran et al. (2005) abordaron el problema de programación de grupos en celdas de manufactura *flow-shop* flexibles. Este ambiente de producción se diferencia del ambiente *flow-shop* tradicional en que puede llegar a incluir dos o más máquinas idénticas, representando una o más estaciones dentro de la celda de manufactura. Las heurísticas de Petrov (*PT*) (Petrov, 1968) y de Logendran y Nudtasomboon (*LN*) (Logendran & Nudtasomboon, 1991) fueron aplicadas conjuntamente con tiempos de preparación sencillos o múltiples para minimizar el tiempo de terminación total de todos los trabajos. Los autores concluyeron mediante experimentos computacionales que el algoritmo conjunto *LN-PT* con tiempos de preparación múltiples se desempeñaba igual o mejor que los algoritmos *LN-PT* y *PT-LN* con tiempos de preparación sencillos.

(Logendran, Deszoeke, et al., 2006) aplicaron algoritmos basados en la metaheurística *TS*, teniendo en cuenta las características de memoria a corto y largo plazo, para resolver el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Los autores generaron datos aleatorios para el problema mencionado y aplicaron los algoritmos basados en *TS* para minimizar el makespan. Los autores concluyeron que el *TS* con memoria a corto plazo obtuvo mejores valores de makespan que los algoritmos *TS* con memoria a largo plazo.

Tabla 7.8. Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* flexibles sin el uso de modelos matemáticos

| Autor(es) | Objetivo | Métodos de solución | | | | Sector/ Instancia de datos |
|-------------------------------------|-----------------|---------------------|-----|-----|---|--|
| | | Ex. | He. | Me. | Método utilizado | |
| (Logendran et al., 2005) | C_{max} | | x | | * Heurísticas LN-PT-M, LN-PT-S, PT-LN-S | Datos utilizados en (Logendran et al., 1995) y datos generados aleatoriamente. |
| (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) | C_{max} | | | x | * TS con memoria a corto plazo (TS-STM) * TS con memoria a largo plazo sobre máxima frecuencia (TS-LTM-MAX) y mínima frecuencia (TS-LTM-MIN) | Datos generados aleatoriamente |
| (Zandieh et al., 2009) | C_{max} | | | x | * Híbrido entre TS y GA * Híbrido entre SA y GA | Datos utilizados en (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) y datos generados aleatoriamente |
| (Karimi et al., 2011) | C_{max} | | | x | * Algoritmo competitivo imperialista (ICA) | Datos generados aleatoriamente |
| (Zandieh & Hashemi, 2015) | $\alpha v. C_j$ | | | x | * RKGA | Datos generados aleatoriamente |

Convenciones: Ex.: Métodos exactos, He.: Heurísticas, Me.: Metaheurísticas, Si.: Simulación. C_{max} : tiempo de terminación del último trabajo en la última máquina, $\alpha v. C_j$: terminación promedio de los trabajos. Fuente: Autores.

Tabla 7.9 Enfoques que abordan la programación de la producción en celdas de manufactura *flow-shop* flexibles mediante modelos matemáticos

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | Sector / Instancia de datos |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|--|---------------------|-----|-----|---|
| | | | | Ex. | He. | Me. | |
| (Behnamian et al., 2010) | $\sum (E_j + T_j)$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Binaria de secuenciación de tareas * Binaria de secuenciación de grupo | | | x | Datos utilizados en (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) y datos generados aleatoriamente |
| (Shahvari et al., 2012) | C_{max} | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de trabajos * Tiempo de terminación de la posición dada * Tiempo de preparación de grupo asignado * Binaria de asignación de grupos * Binaria de secuenciación de trabajos * Binaria de secuenciación de grupos | | | x | Datos utilizados en (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) |
| (Keshavarz & Salmasi, 2013) | C_{max} | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de trabajos * Tiempo de inicio de trabajos de grupo * Tiempo de terminación de trabajos de grupo * Tiempo de terminación de último trabajo * Binaria de asignación de grupos * Binaria de secuenciación de tareas | | | x | Datos utilizados en (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) |
| (Bozorgirad & Logendran, 2013) | $\sum w_j G_j$ $\sum w_j T_j$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de trabajos * Tiempo de terminación de grupo * Tardanza de tareas en grupo * Binaria de tarea procesada en secuencia * Binaria de grupo asignado a máquinas * Binaria de grupo procesado en secuencia | x | | x | Datos generados aleatoriamente y datos utilizados en (Schaller et al., 2000) y (Potts & Van Wassenhove, 1982) |

| Autor(es) | Objetivo | Categoría de modelo | Variables del modelo | Métodos de solución | | | Sector / Instancia de datos |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------|--|---------------------|-----|-----|--|
| | | | | Ex. | He. | Me. | |
| (Keshavarz et al., 2014) | $\sum C_j$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de trabajos * Tiempo de inicio de tareas de grupo * Tiempo de terminación de tareas de grupo * Binaria de asignación de grupos en máquinas * Binaria de asignación de grupos en estaciones | x | | x | Datos utilizados en (Salmasi et al., 2010) y (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) |
| (Zandieh & Karimi, 2011) | $C_{max} \sum w_j T_j$ | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de trabajos * Binaria de secuenciación de tareas * Binaria de secuenciación de grupos | | | x | Datos generados aleatoriamente |
| (Naderi & Azab, 2015) | C_{max} | MILP | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de inicio de operación * Binaria de secuenciación de operación * Binaria de asignación de torretas y husos | | x | x | Datos de la industria <i>Metalmeccánica</i> |
| (He et al., 2019) | $C_{max} \sum T_j \sum w_j s_{rj}$ | TDM | <ul style="list-style-type: none"> * Tiempo de terminación de trabajos en estación * Binaria de adición de tiempo de preparación | | x | x | Datos de la <i>Fabricación de motores</i> |

Conveniones: Ex: Métodos exactos, He: Heurísticas, Me: Metaheurísticas, MILP: Programación Lineal Entera Mixta, TDM: Modelo Distribuido de Dos Capas, C_{max} : tiempo de terminación del último trabajo en la última máquina, $\sum(C_j + T_j)$: anticipación y tardanza total de los trabajos, $\sum w_j C_j$: tiempo de terminación ponderado total, $\sum w_j T_j$: tardanza ponderada total, $\sum C_j$: tiempo de terminación total de los trabajos, $\sum T_j$: tardanza total, $\sum w_j s_{rj}$: costos por tiempos de preparación. **Fuente:** Autores.

(Zandieh et al., 2009) desarrollaron metaheurísticas híbridas basadas en la combinación de las metaheurísticas *TS*, *SA* y *GA*, para minimizar el *makespan* para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Los resultados de los experimentos computacionales permitieron a los autores identificar que el algoritmo híbrido entre *SA* y *GA* obtuvo mejores resultados para el *makespan* en tiempos computacionales más cortos, que los algoritmos híbridos *TS* y *SA* presentados por (Logendran, Deszoeke, et al., 2006), y que los algoritmos *TS* y *GA*.

Con el objetivo de minimizar el *makespan* para el problema, (Karimi et al., 2011) propusieron el algoritmo competitivo imperialista (*imperialist competitive algorithm, ICA*), el cual es una metaheurística basada en el comportamiento socio-político de las colonias y los imperios, y que es utilizada para resolver problemas *NP-hard*. Los autores abordaron el problema, teniendo en cuenta los tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Los resultados computacionales de la aplicación del *ICA* fueron comparados con el algoritmo genético clave aleatoria (*random key genetic algorithm, RKGA*), el cual es un *benchmark* reconocido en problemas de programación en ambientes *flow-shop*. Los autores concluyeron que los resultados del *ICA* sobresalen sobre los de *RKGA* en calidad y desempeño.

(Zandieh & Hashemi, 2015) tuvieron en cuenta la probabilidad de ocurrencia de fallas de máquinas en el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Para abordar este problema, los autores desarrollaron un algoritmo genético (*GA*) que usa números aleatorios para codificar soluciones (*RKGA*). Los resultados para el tiempo de terminación promedio fueron obtenidos mediante experimentos computacionales.

7.5.2 Modelos con enfoques de programación matemática

(Behnamian et al., 2010) presentaron un modelo matemático, basado en ventanas de entrega, para minimizar la anticipación y tardanza (*earliness and tardiness*), para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Los autores desarrollaron una metaheurística híbrida, comprendida por los algoritmos *PSO*, *VNS* y *SA*, y generaron instancias de datos, de acuerdo con las características establecidas por (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) para obtener valores de prontitud y tardanza. La metaheurística híbrida fue comparada con los algoritmos *SA* y *GA* propuestos por (Zandieh et al., 2009), mediante experimentos computacionales, los cuales concluyeron que el algoritmo que utiliza la combinación de las metaheurísticas *PSO*, *SA* y *VNS* se desempeñó mejor que los algoritmos *SA* y *GA* de Zandieh et al (2009).

(Shahvari et al., 2012) propuso seis modificaciones al algoritmo búsqueda tabú (*TS*) para obtener valores mínimos de *makespan* para el problema, teniendo en cuenta tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Los autores generalizaron el modelo matemático desarrollado por (Salmasi et al., 2010) para la programación de grupos en ambientes *flow-shop* y con el objetivo de minimizar el tiempo de flujo total, y tomaron las instancias de datos generadas por (Logendran, Deszoeke, et al., 2006). Adicionalmente, los seis algoritmos *TS* fueron comparados con el algoritmo *TS* propuesto por Logendran, Deszoeke, et al. (2006). El algoritmo *TS3* propuesto por los autores supera los valores obtenidos de *makespan* en comparación con los otros cinco algoritmos *TS* y el algoritmo *TS* de (Logendran, Deszoeke, et al., 2006).

(Keshavarz & Salmasi, 2013) propusieron un modelo de programación entera mixta (*MILP*) para resolver el problema con tiempos de preparación de las familias dependientes de la secuencia y probabilidad de omitir máquinas (*miss*). Los autores tuvieron en cuenta los enfoques presentados por (Logendran, Deszoeke, et al., 2006) y (Shahvari et al., 2012) para proponer su modelo matemático. El software *ILOG CPLEX* 9.0 fue utilizado para resolver el problema de forma exacta, mientras que un algoritmo memético (*MA*) fue desarrollado por los autores para resolver las instancias grandes del problema, las cuales fueron tomadas de (Logendran, Deszoeke, et al., 2006). Los autores concluyeron que el modelo matemático propuesto se comportó de manera más eficiente que los modelos disponibles en la literatura. Adicionalmente, los autores indicaron que el *MA* propuesto obtuvo mejores resultados que otras metaheurísticas, como el algoritmo búsqueda tabú (*TS3*) presentado por (Shahvari et al., 2012).

Un modelo de programación lineal entera mixta con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y tiempos de disponibilidad de máquinas y de liberación de tareas dinámicos fue presentado por (Bozorgirad & Logendran, 2013). Los autores desarrollaron cuatro algoritmos basados en búsqueda tabú para resolver los criterios de tiempo de terminación ponderado total y de tardanza ponderada total. Los análisis estadísticos permitieron concluir que el cuarto algoritmo, desarrollado con tres niveles de búsqueda, se desempeñó mejor que los demás algoritmos. Los resultados de los algoritmos *TS* propuestos fueron comparados con la solución del modelo matemático utilizando el software *CPLEX* 12.2.

(Keshavarz et al., 2014) propusieron un método basado en *branch & price* para obtener límites inferiores para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia de las familias de productos. Los autores desarrollaron seis variantes del algoritmo memético (*MA*) para comparar los resultados del límite inferior encontrado. Los resultados computacionales indicaron que el porcentaje de brecha promedio es de 6,03%, en relación con el límite inferior.

Un algoritmo genético con *multi-población*, adaptado de aquel propuesto por (Cochran et al., 2003), fue presentado por (Zandieh & Karimi, 2011) para minimizar el *makespan* la tardanza ponderada total para el problema con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Los autores compararon el *GA* con multi-población (*MPGA*) con los algoritmos *GA* multi-objetivo (*MOGA*), propuesto por (C.M. Fonseca & Fleming, 1993), y *GA* de clasificación no dominado II (*non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II*). Los resultados de los experimentos realizados por los autores indicaron que, en la mayoría de las instancias de prueba, el *MPGA* se desempeñó mejor que los algoritmos *MOGA* y *NSGA-II*.

La programación de grupos en ambientes de producción flexibles con centros de maquinado fue tenido en cuenta por (Naderi & Azab, 2015). Los autores formularon un modelo de programación lineal entera mixta para obtener valores óptimos de *makespan* hasta para seis trabajos y tres máquinas. Para instancias más grandes, se desarrollaron el algoritmo voraz iterativo, el algoritmo de búsqueda iterativa local (*ILS*), y las metaheurísticas algoritmo genético, templado simulado y algoritmo inmune artificial (*artificial immune algorithm, AIA*). Los mejores

resultados fueron obtenidos a través del algoritmo *ILS*, en comparación con los otros cuatro algoritmos.

(He et al., 2019) propusieron un modelo distribuido de dos capas (*two-layer distributed model, TDM*) para el caso de la producción de motores en ambientes de múltiple variedad y lotes pequeños de productos, para optimizar simultáneamente el *makespan*, la tardanza total y el costo por tiempos de preparación. Los autores abordaron cada capa de trabajo del modelo como un problema de programación de grupos dependientes de la secuencia. Un algoritmo híbrido entre templado simulado y algoritmo genético adaptativo (*SA-AGA*) fue propuesto para resolver el problema. Los autores compararon los resultados para los tres objetivos definidos, teniendo en cuenta la aplicación de las reglas de despacho primero en entrar, primero en salir (*FIFO*), tiempo de procesamiento más corto (*SPT*) y tiempo de entrega más cercano (*EDD*) en el modelo propuesto, para el *SA-AGA* y el *GA*.

Los modelos matemáticos propuestos para el problema integrado de las decisiones de *layout* y *scheduling* se presentan en esta sección. En la actualidad, no se encuentra un modelo que considere las extensiones de áreas desiguales, para el problema de distribución de instalaciones, ni la programación de producción en celdas de manufactura de flujo en línea. Los enfoques de integración de estas decisiones pueden clasificarse en secuencial y simultáneo, siendo el enfoque simultáneo el más utilizado de los dos. A continuación, se presenta una descripción y ejemplos de estos enfoques.

8

ENFOQUES PARA
EL PROBLEMA
INTEGRADO
DE LAYOUT Y
SCHEDULING.

8.1 Enfoque de integración secuencial

En el enfoque de integración secuencial se consideran las decisiones de *layout* y *scheduling* en un modelo que comprende diferentes etapas o fases, separando las decisiones tomadas en cada una de ellas. En este tipo de enfoques, las decisiones de las primeras etapas son tenidas en cuenta al momento de tomar una decisión en las etapas posteriores. Este enfoque permite enfocarse en cada una de las decisiones por separado en los diferentes niveles jerárquicos, generando beneficios tanto a largo como a corto plazo y enmarcando las decisiones en los niveles más bajos de acuerdo con los resultados de las etapas anteriores.

La Figura 8.1 muestra un ejemplo de un modelo secuencial de tres etapas en las cuales se combinan modelos programación matemática y de simulación para las decisiones de planeación de la capacidad, planeación de instalaciones y programación de producción (Wang & Chen, 2008). El marco secuencial divide las etapas en pasos, los cuales representan una decisión que debe obtenerse mediante la optimización de un modelo de programación matemática o la validación y evaluación de las soluciones a través de modelos de simulación. Las primeras dos etapas representan las decisiones de planeación de la capacidad y de las instalaciones. En la primera etapa, por ejemplo, el marco mostrado en la Figura 8.1 representa la optimización de la decisión sobre la capacidad del sistema productivo, seguido de una examinación de estos resultados en un ambiente dinámico de simulación, para posteriormente definir los ajustes

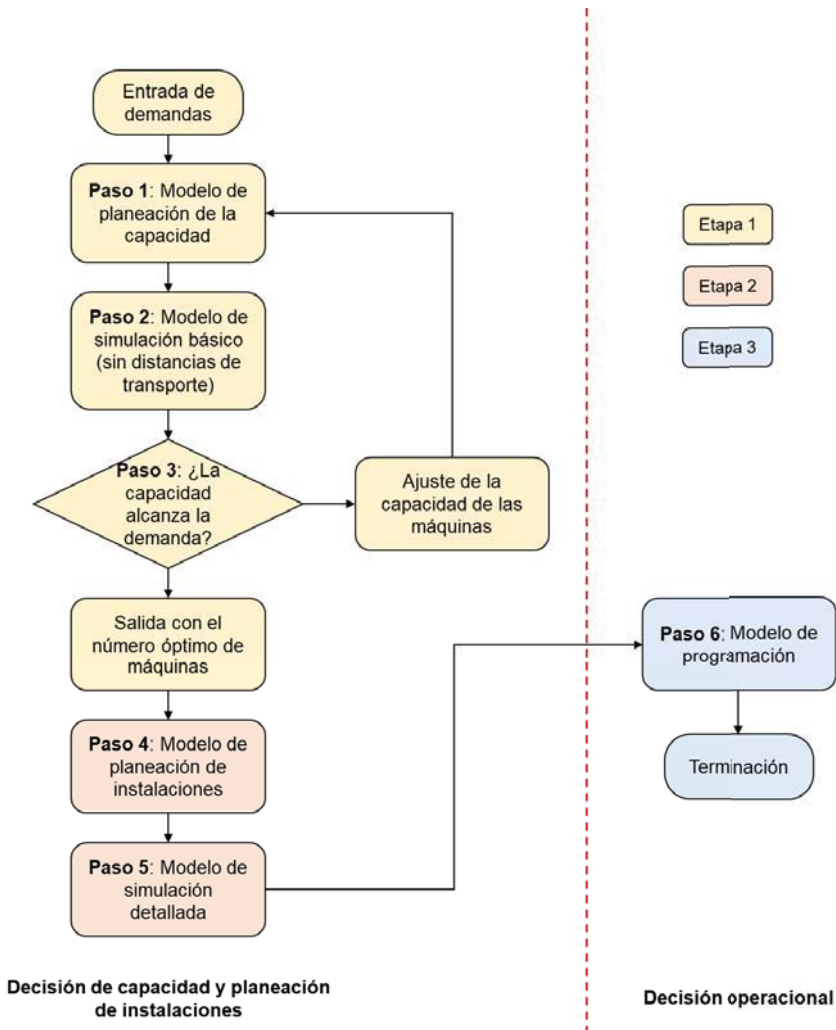


Figura 8.1 Ejemplo de modelo de integración de decisiones secuencial.
Fuente: Adaptado de Wang & Chen (2008)

necesarios para cumplir con los requerimientos de demanda entrantes. El modelo de planeación de la capacidad puede estar definido como un modelo de programación lineal o no lineal que busque minimizar uno de los objetivos de clave para el caso en estudio, como puede ser el costo total de ubicar máquinas en un espacio de tierra dado (Demartini et al., 2021; Martínez-Costa et al., 2014).

Posteriormente, la segunda etapa del modelo secuencial propone la optimización de la decisión de planeación de instalaciones, que contiene la mejor solución encontrada para la primera etapa, y que abarca a su vez una evaluación a través de un modelo de simulación más detallado que el inicial. En este caso, el modelo de simulación analiza las dinámicas de la planeación de la capacidad e instalaciones con la inclusión de distancias de transporte en un *layout* de planta específico. Este *layout* puede ser el resultado de la optimización de un modelo programación no lineal que busque minimizar el costo de manejo de materiales entre departamentos u otra función objetivo de interés para el caso en estudio (Anjos & Vieira, 2017; Heragu & Kusiak, 1991).

Finalmente, la tercera etapa del marco integrador relaciona las decisiones tomadas en las dos etapas previas con una decisión operacional como es la programación de la producción. Por lo tanto, las decisiones definidas para la planeación de la capacidad, es decir la disponibilidad de máquinas para satisfacer la demanda, y la definición de un *layout* óptimo, para el caso del modelo de la Figura 8.1, enmarcan la decisión de programación de la producción. Específicamente, la definición del ambiente de máquinas en que la programación de la producción se decide implica la selección de un modelo apropiado que se ajuste a las soluciones obtenidas en las fases

previas. En este sentido, la decisión del mejor programa de producción puede estar dado por el flujo en que los trabajos se desplazan a través de las máquinas, es decir, en línea (*flow-shop*) o en taller de trabajo (*job-shop*), la presencia de ambientes híbridos, como los de máquinas paralelas, y las demás características inherentes de los ambientes de máquinas definidos en estos problemas, como por ejemplo, la agrupación en familias de productos o el requerimiento de tiempos de preparación de las máquinas (Blazewicz et al., 2019; Pinedo, 2022). Similar a las fases anteriores, la definición de una función objetivo relevante para el caso de estudio es clave para la toma de decisiones en esta etapa.

8.2 Enfoque de integración simultáneo

A diferencia de los modelos con enfoque de integración secuencial, los modelos simultáneos generan soluciones integradas en donde estas son optimizadas utilizando variables y funciones objetivo relacionadas en un modelo que se resuelve de manera simultánea.

Usualmente, los modelos integradores con enfoque simultáneo que incluyen las decisiones de *layout* y *scheduling* son modelos de programación matemática que incluyen formulaciones de uno de los problemas, por ejemplo la formulación del problema de asignación cuadrática para la determinación de un layout óptimo, el cual se ajusta para integrar componentes de un modelo de programación de la producción en el ambiente de máquinas definido para el caso de estudio (Ripon et al., 2012; Ripon & Torresen, 2014). Debido a la complejidad en la formulación y solución de un modelo simultáneo conjunto entre dos decisiones, una alternativa es la definición del problema utilizando codificaciones de las soluciones, en conjunto con la aplicación de un algoritmo heurístico o

metaheurístico que permita encontrar soluciones subóptimas en tiempos computacionales más cortos (Talbi, 2009).

Un ejemplo de esta alternativa de codificación para el problema integrado de *layout* y *scheduling* se presenta en la Figura 8.2. En ella se muestra la representación de un cromosoma que codifica las decisiones de distribución en planta, basado en el modelo de asignación cuadrática para obtener un *layout* de bloques con cinco departamentos (*facility layout*, *FLP*), en conjunto con la decisión de programación de la producción en ambientes de taller de trabajo (*job-shop scheduling*, *JSSP*) para tres trabajos y cinco máquinas (3×5). La representación de la codificación del problema en la figura muestra una solución en dos partes tanto para el problema de *JSSP* y de *FLP*. En la primera parte de la codificación, se asignan los tres trabajos a las cinco máquinas siguiente la secuencia de operaciones, mientras que la segunda parte muestra el orden en que se ubican los cinco departamentos en la distribución de bloques del modelo de asignación cuadrática (Ripon et al., 2012; Ripon & Torresen, 2014). Los pasos siguientes consisten en aplicar los operadores de búsqueda e intensificación de las soluciones como se conoce en los mecanismos propios de los algoritmos metaheurísticos.

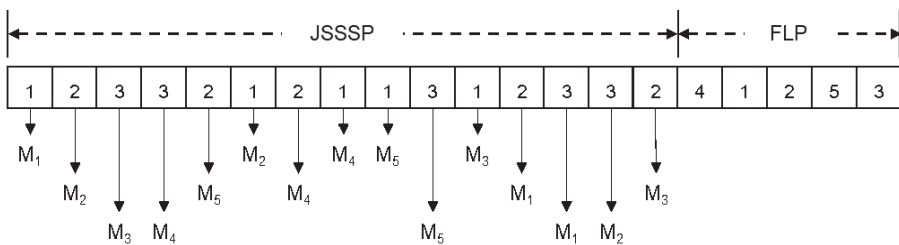


Figura 8.2 Ejemplo de codificación de la solución para el problema integrado de *JSSP* y *FLP*.

Adaptado de (Ripon & Torresen, 2014)

Otra alternativa para la solución de un modelo integrador de manera simultánea es a través de la definición de un enfoque de toma de decisiones multiobjetivo. Para ello, se formula el modelo integrando las funciones objetivo de cada problema y estas se definen utilizando uno de los enfoques presentados para el problema multiobjetivo desarrollado en Kazemi et al. (2012). Para el primer enfoque, se supone, por ejemplo, un problema con dos funciones objetivo como se presenta a continuación.

$$\max f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x) \quad 8.1$$

$$\min g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x) \quad 8.2$$

Sujeto a: $x \in X$ 8.3

En donde X representa la solución factible. En primer lugar, se asume que cada objetivo se optimiza de forma separada de la siguiente manera:

| | |
|---|-----|
| $f_i^* = \max f_i(x) \quad (i = 1, \dots, n)$ | 8.4 |
| $g_i^* = \min g_i(x) \quad (i = 1, \dots, m)$ | 8.5 |

Sujeto a:

$$x \in X$$

Ahora se supone un número real β en el intervalo de $[0, 1]$. Usando β , se puede convertir el problema de decisión multiobjetivo en un problema con un objetivo único así:

$$\max \beta \quad 8.6$$

Sujeto a:

$$\beta \leq \frac{f_i(x)}{f_i^*}, \quad i = 1, \dots, n \quad 8.7$$

$$\beta \leq \frac{g_i^*}{g_i(x)}, \quad i = 1, \dots, m \quad 8.8$$

$$x \in X$$

El segundo enfoque propuesto por Kazemi et al. (2012) es el método métrico L-P. Una formulación general del método es la siguiente, suponiendo el modelo general presentado en las ecuaciones (8.1) a 8.3).

Asumiendo nuevamente que las funciones objetivo son optimizadas de manera separada, así:

$$f_i^* = \max f_i(x) \quad (i = 1, \dots, n) \quad 8.9$$

$$g_i^* = \min g_i(x) \quad (i = 1, \dots, m) \quad 8.10$$

Sujeto a:

$$x \in X$$

El método de métrica L-P se define entonces como:

$$L - P = \left\{ \delta_1 \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^*} \right)^p + \delta_2 \sum_{i=1}^m \left(\frac{g_i(x) - g_i^*}{g_i^*} \right)^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad 8.11$$

En donde P es un valor entero y $\delta_1 + \delta_2 = 1$.

En cualquier caso, la definición del modelo que integre simultáneamente las decisiones de *layout* y *scheduling* estará dado por el contexto del caso de estudio y el impacto que se desee generar con la formulación del modelo propuesto, así como de la complejidad del modelo resultante.

En cualquier caso, la definición del modelo que integre simultáneamente las decisiones de *layout* y *scheduling* estará dado por el contexto del caso de estudio y el impacto que se desee generar con la formulación del modelo propuesto, así como de la complejidad del modelo resultante.

8.3 Métodos de solución para el problema integrado de Layout y Scheduling

Los métodos utilizados para la solución del problema integrado de *layout* y *scheduling* pueden variar de acuerdo con la complejidad del modelo formulado y a las necesidades del contexto del caso en estudio. Principalmente, las técnicas de solución varían entre los métodos exactos, los algoritmos heurísticos y metaheurísticos y las técnicas estocásticas y de simulación.

Los métodos exactos hacen referencia a aquellos que alcanzan la optimalidad del problema, entre ellos los algoritmos de ramificación o las descomposiciones y otros enfoques exactos (Chen et al., 2009). Los métodos exactos tienen la problemática de la complejidad computacional en caso de que el problema sea de la clase *NP-hard*, ya que solucionar estos problemas a optimalidad puede tomar incluso lo que tiene el universo de existir para ciertas instancias grandes. En este sentido, los algoritmos heurísticos y metaheurísticos presentan una alternativa a cambio de un costo: la optimalidad. Los algoritmos heurísticos y metaheurísticos están conformados por operaciones de búsqueda e intensificación que modifican una codificación que representa una solución, como la que se presenta en la Figura 8-2, con el objetivo de obtener soluciones subóptimas en tiempos computacionales más cortos que los métodos exactos (Talbi, 2009). Finalmente, las técnicas estocásticas y de simulación presentan

la alternativa para solucionar de manera más realista los problemas más complejos, sin embargo, estas implican la utilización de un software especializado de simulación, y el requerimiento de recolección de mayor cantidad de datos (Banks, 2010).

En este capítulo, se presentaron los diferentes enfoques propuestos para la formulación de un modelo integrador de las decisiones de distribución en plantas y programación de la producción. Principalmente, se abordaron los enfoques de integración secuencial y simultáneo, a través de ejemplos tomados de la literatura reciente sobre el tema.

Los enfoques de integración secuencial permiten la definición de las decisiones de acuerdo con los niveles de jerarquía de las mismas, enmarcando las decisiones en niveles más bajos en los resultados de las mismas en las etapas previas. Por su parte, los enfoques de integración simultáneo implican la definición del problema a través de una codificación de la solución o métodos de optimización multiobjetivo, los cuales incrementan la complejidad del problema y de su solución de acuerdo con el contexto dado.

9

MARCO PARA LA
INTEGRACIÓN DE
LAS DECISIONES DE
PROGRAMACIÓN
DE PRODUCCIÓN
EN CELDAS DE
MANUFACTURA
Y DISTRIBUCIÓN
EN PLANTA CON
ÁREAS DESIGUALES

El problema de distribución de instalaciones (*FLP*, del inglés *Facility Layout Problem*) considera la ubicación de los departamentos dentro de una planta de producción, en donde se consideran criterios basados en la cercanía o la distancia (Ingole & Singh, 2021; Kuşakci & Cesur, 2020). Dentro de las diferentes extensiones del *FLP*, se encuentra una extensión muy compleja y realista, en donde los departamentos son representados de manera continua con dimensiones diferentes de ancho y largo entre sí, haciendo que las áreas de los mismos sean desiguales. A esta extensión del problema se le conoce como problema de distribución de instalaciones con áreas desiguales (*UAFLP*, del inglés *Unequal-Area Facility Layout Problem*), propuesto inicialmente por Armour & Buffa en 1963. Usualmente, el *UAFLP* es aplicado con el objetivo de optimizar el costo total de manejo de materiales entre departamentos (*MHC*, del inglés *Material Handling Costs*), el cual es conocido como uno de los costos de operaciones representativos en las organizaciones (Drira et al., 2007; Tompkins et al., 2011). Una distribución eficaz de las instalaciones tiene un impacto positivo en la productividad y la flexibilidad de los sistemas de producción de las empresas, ya que permite a las industrias responder a las demandas actuales de los mercados. La Figura 9-1 muestra un plano de planta que representa una solución del *UAFLP* para una instalación con seis departamentos. En el plano de la Figura 9-1, los departamentos son representados por rectángulos continuos que no se sobreponen entre sí, y cuyas dimensiones de ancho y largo satisfacen los requerimientos de área y aspecto definidos para cada uno.

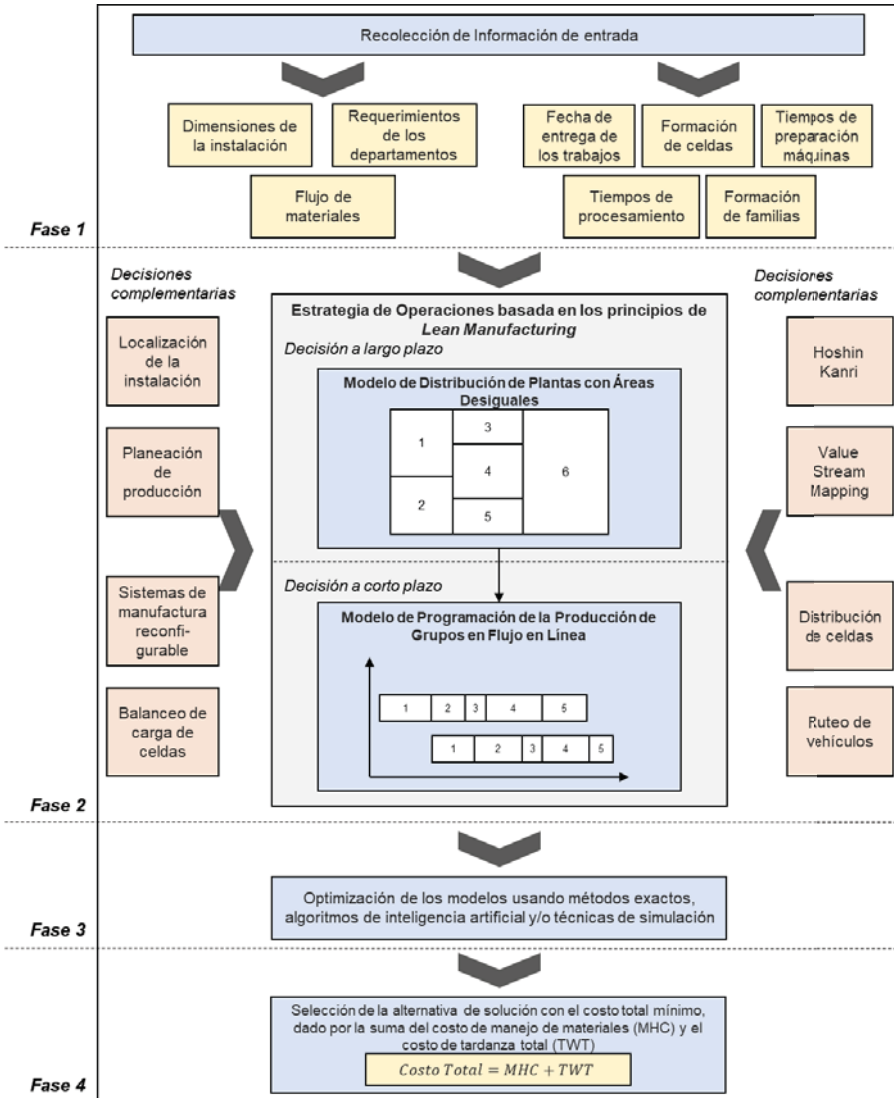


Figura 9-1. Plano de planta de una instalación utilizando el modelo UAFLP.

Fuente: Autores.

La programación de la producción consiste en la secuenciación de órdenes o trabajos los cuales requieren ser procesados en máquinas en un piso de planta, siguiendo la secuencia de operaciones dada para la orden o

trabajo. Los Sistemas de Manufactura Celular (*CMS*, del inglés *Cellular Manufacturing Systems*) son sistemas de producción que consideran la aplicación de la tecnología de grupos (*GT*, del inglés *Group Technology*), en la cual se aprovechan las similitudes de diseño y operaciones de los productos para agruparlos en familias de productos y las máquinas en celdas de manufactura para obtener beneficios relacionados con la reducción de los tiempos de preparación de las máquinas y del inventario de trabajo en proceso, así como el aumento del *throughput* o tasa de salida del sistema (Mohtashami et al., 2020; Pimentel et al., 2019; Wemmerlöv & Hyer, 1989). Cuando las máquinas que componen las celdas de manufactura se disponen de tal manera que la secuencia de operaciones se realiza en un flujo en línea (*Flow-shop*), las celdas de manufactura son consideradas de flujo en línea. La Figura 9-2 muestra la representación de una celda de manufactura de flujo en línea conformada por cinco máquinas. En esta representación, las tareas u órdenes de la misma familia de productos son procesadas siguiendo el flujo de operaciones mostrado por la línea roja, a través de las máquinas que componen la celda de manufactura.

Cuando se desea conocer la forma más óptima de secuenciar las familias de productos y los trabajos u órdenes pertenecientes a cada familia de productos para que sean procesados en celdas de manufactura de flujo en línea, el problema se conoce como Problema de Programación de Grupos de Flujo en Línea (FSGSP, del inglés *Flow-Shop Group Scheduling Problem*), y es un problema de optimización que está adquiriendo gran interés por parte de la comunidad académica debido, especialmente, a su amplia aplicación en el sector industrial y a los beneficios de los CMS en los sistemas productivos.

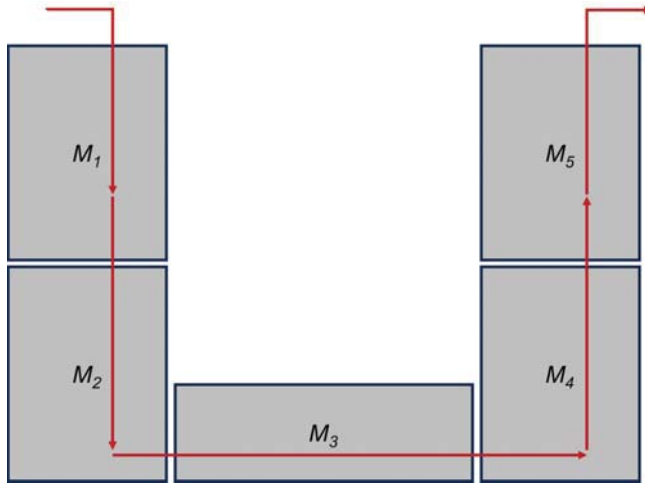


Figura 9-2. Representación de una celda de manufactura de flujo en línea.
Fuente: Autores.

El diseño de una disposición eficaz de la planta que busque reducir “*mudas*”, es decir, desperdicios relacionados por ejemplo con las distancias de manejo de materiales entre los departamentos, el resultado puede ser una reducción de los costos de manejo de materiales, que representan aproximadamente entre el 20 y el 50% de los costos operativos totales (Cuatrecasas-Arbós, 2009; Tompkins et al., 2011). Si a esta distribución eficaz se suman las ventajas de la optimización avanzada de la programación de la producción en los *CMS*, a través un modelo que integre los problemas *UAFLP* y *FSGSP*, los sistemas de producción industrial que adopten estas tecnologías pueden aumentar su productividad y responder con mayor solidez a las necesidades de los mercados actuales.

En este sentido, el presente capítulo define un marco para la integración de estos modelos, basada en la literatura reciente, de forma que las organizaciones puedan realizar futuras aplicaciones para aumentar la productividad y la eficiencia de sus sistemas de producción. El modelo se

propone dentro de un entorno *lean* que busca reducir *mudas*, a través de un enfoque de celdas de manufactura y una distribución en planta eficaz. Las decisiones integradas en el modelo buscan minimizar los costos de manejo de materiales y los costos de penalización por tardanza de los trabajos, objetivos relacionados con la satisfacción de los clientes, así como con la reducción de los desperdicios.

9.1 Descripción del modelo conceptual integrador

El modelo conceptual para la integración de las decisiones de programación de la producción en CMS y de distribución de instalaciones se presenta en la Figura 9-3. El modelo se divide en un total de cuatro fases, que incluyen desde la recolección de la información de entrada necesaria hasta la selección de la alternativa con el costo total mínimo. Cada fase está compuesta de un conjunto de bloques que indican los elementos del modelo.

9.1.1 Fase 1: Recolección de datos.

La fase 1 del modelo consiste en recopilar la información de entrada necesaria para la definición de las decisiones de programación de grupos de flujo en línea y de distribución de instalaciones de áreas desiguales, de acuerdo con lo recogido en la revisión bibliográfica. En esta fase, se define el contexto de aplicación del modelo, por ejemplo, el caso de estudio de una empresa con problemas de productividad que sufre altos costes de manipulación de materiales, inventario de trabajo en proceso, entre otras *mudas*.

A continuación, para el contexto definido, se recopila y prepara la información de entrada para el modelo de distribución de instalaciones con áreas desiguales, considerando las formulaciones matemáticas de Anjos & Vieira (2016) y Kang & Chae (2017):

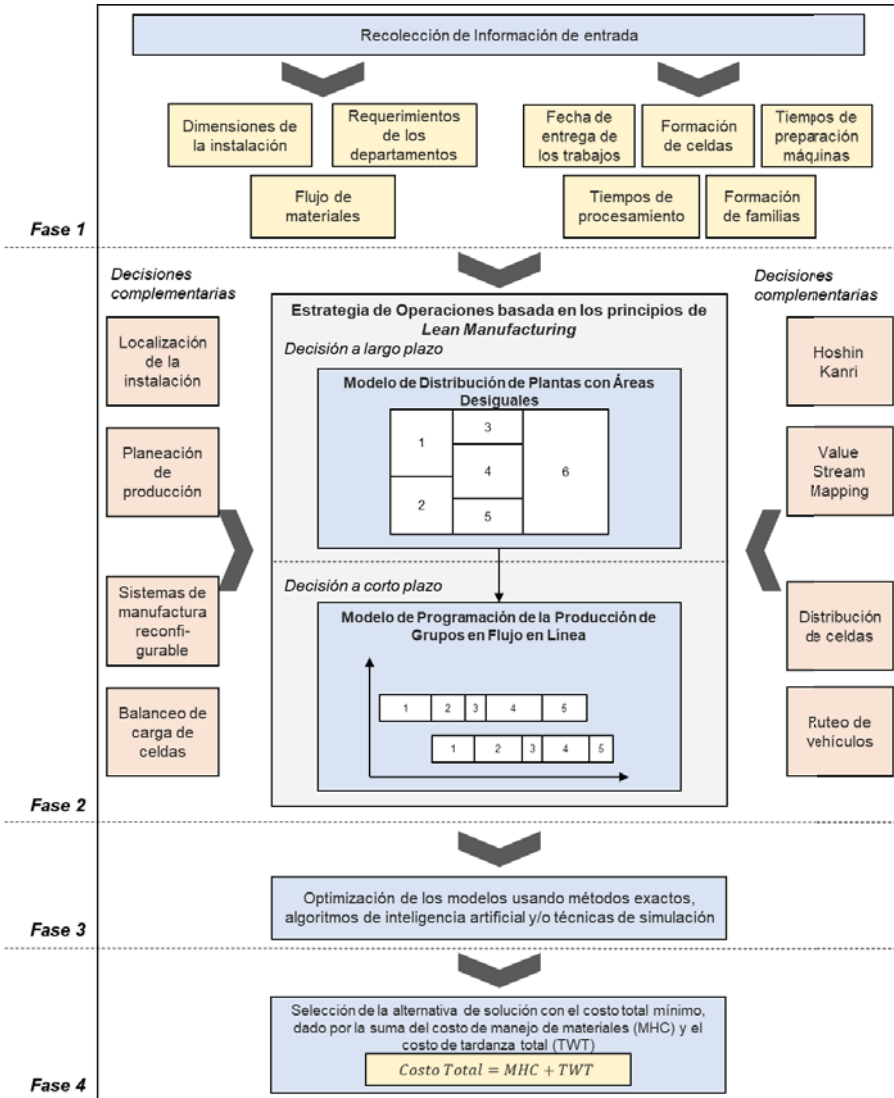


Figura 9-3. Modelo conceptual para la integración de los problemas FSGSP y UAFLP.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2022)

- **Dimensiones de la instalación:** Hace referencia a las dimensiones de ancho y largo de la instalación, en donde los procesos de producción

se planean ubicar. El área total de la instalación debería ser mayor a los requerimientos de área de los departamentos a ubicar.

- **Requerimientos de los departamentos:** Estos requerimientos incluyen las necesidades de maquinaria, equipos, manejo de materiales y de transporte, actividades auxiliares, servicios de personal y equipos, entre otros. Estos requerimientos pueden determinarse con base en los factores definidos por Muther (1973), o usando otra metodología preferida. Al final, estas necesidades son traducidas a requerimientos de área por cada departamento, el cual puede determinarse usando el método de Guerchet (Stephens & Meyers, 2013). El método considera la definición de una superficie total, que está dada por la suma de la superficie estática, gravitacional y de evolución. La superficie estática es la necesaria para ubicar la huella de máquinas y estaciones de trabajo. La superficie gravitacional hace referencia a las necesarias para el movimiento de materiales y personal. La superficie de evolución busca identificar expansiones futuras. Otro de los requerimientos de los departamentos es la definición de una tasa de aspecto mínima preferida para cada departamento, usualmente dada por el valor de 1 (es decir, la dimensión del lado mayor igual a la dimensión del lado menor).
- **Flujo de materiales:** Esta información se relaciona con la definición de los flujos de materiales y personal entre departamentos. La construcción de una matriz desde-hacia es de utilidad para aclarar estos requerimientos de flujo de materiales.

Las siguientes piezas de información son requeridas para el modelo de programación de la producción de grupos de flujo en línea, basado en las

formulaciones matemáticas propuestas por Salmasi et al. (2010) y Naderi & Salmasi (2012):

- **Fechas de entrega de los trabajos:** Se refiere a las fechas de entrega acordadas con los clientes para los conjuntos de trabajos (órdenes) en estudio. Estas fechas se debería definir usando la misma unidad de tiempo utilizada para los tiempos de procesamiento de los trabajos.

- **Formación de celdas y familias de productos:** Para implementar sistemas de celdas de manufactura, se lleva a cabo el proceso de agrupamiento de máquinas en celdas de manufactura y de productos en familias de productos con el objetivo de alcanzar beneficios de la tecnología de grupos. El problema de formación de celdas, como se conoce a esta decisión, ha sido ampliamente abordado en la literatura (ver por ejemplo a Selim et al. (1998), Yin & Yasuda (2006) y Papaioannou & Wilson (2010)).

- **Tiempos de preparación de las máquinas:** Hace referencia a la información sobre los tiempos de preparación requeridos por cada máquina cuando requieren procesar cada una de las familias de productos. Estos tiempos de preparación pueden ser dependientes de la secuencia de familias de productos, para lo cual una matriz de intercambio se requiere entonces para identificar esta dependencia. Los tiempos de preparación se deberían dar en la misma unidad de tiempo usada para los tiempos de procesamiento de los trabajos.

- **Tiempo de procesamiento de los trabajos:** Se refiere a los tiempos de corrida de cada uno de los trabajos en cada máquina, de acuerdo con las operaciones requeridas para el ensamble o terminación del producto final.

9.1.2 Fase 2: Definición de las decisiones

La fase 2 del modelo conceptual considera la definición de los modelos de distribución de instalaciones y programación de la producción en celdas de manufactura, de acuerdo con el horizonte de planeación en el cual se definen. Los bloques que comprenden esta fase se describen a continuación:

■ **Estrategia de operaciones basada en los principios de Lean Manufacturing:**

Debido a que el objetivo principal del modelo conceptual es incrementar la productividad y eficiencia de los sistemas de producción al reducir los desperdicios o actividades que no añaden valor, el enfoque integrador debe estar enmarcado dentro de una estrategia de operaciones basada en la filosofía Lean Manufacturing. En este sentido, el contexto de la aplicación del modelo conceptual debe considerar la eliminación de mudas, el enfoque en la satisfacción del cliente y una cultura de mejoramiento continuo como parte de su estrategia (Cuatrecasas-Arbós, 2009; Dennis, 2015).

- **Modelo de distribución de plantas con áreas desiguales:** Dentro de la estrategia de operaciones Lean, la primera decisión que se define es el modelo de distribución de instalaciones con áreas desiguales, el cual es una decisión estratégica a largo plazo. La ubicación de los departamentos de una instalación responde a una necesidad a largo plazo, es decir, de 1 a 3 años, con el fin de suministrar una demanda definida para ciertos productos (Nahmias & Olsen, 2015). En esta subetapa, la información de entrada se usa para definir el modelo matemático de optimización o simulación a aplicarse para la minimización de los costos de manejos de materiales (MHC). Las formulaciones exactas para el UAFLP (Anjos & Vieira, 2016; Kang & Chae, 2017), así como la aplicación de

algoritmos metaheurísticos o matheurísticos (García-Hernández et al., 2020; Kulturel-Konak & Konak, 2013; Xiao et al., 2019) se sugieren en este paso. El resultado es una distribución de bloques que define la ubicación de los departamentos de la instalación planeada para unos costos de manejo de materiales óptimos o subóptimos. El diseño de planta final puede mejorarse utilizando software de diseño 3D como AutoCAD®, SketchUp® y Lumion®.

- **Modelo de programación de la producción de grupos en flujo en línea:** Con la formación de familias de productos y celdas de manufactura, y el uso de otra información de entrada recolectada, el modelo de programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea se puede definir en este paso. A diferencia de la distribución de instalaciones, las decisiones de programación de la producción se consideran decisiones operacionales de corto plazo, en donde la secuencia de trabajos a ser procesados y su asignación a recursos disponibles debe realizarse de manera continua en el piso de planta para responder a los requerimientos de los clientes (Nahmias & Olsen, 2015; Pinedo, 2022).

Cuando existen problemas en la determinación de una secuencia óptima y, adicionalmente, los desperdicios inherentes a la producción en masa no se han eliminado, la entrega de órdenes puede presentar demoras por encima de las fechas pactadas—tardanzas—, que afectan la satisfacción de los clientes y la imagen de la compañía en el mercado. Por este motivo, se propone en el modelo conceptual el uso de enfoques matemáticos o de simulación que se enfoquen en la minimización de las entregas tardías de los trabajos, especialmente si estas generan un costo de penalización que puede darse por cláusulas contractuales

o un costo por mala reputación. Este objetivo puede representarse mediante la función de la tardanza ponderada total (TWT, del inglés Total Weighted Tardiness), en donde la ponderación dada representa el costo de penalización por unidad de tiempo de entrega tardía. Sin embargo, los modelos enfocados en la minimización de la tardanza no son tan estudiados en la literatura relacionada con el FSGSP. Solo algunas de las formulaciones matemáticas, como las presentadas en Keshavarz et al. (2019), Yazdani Sabouni & Logendran (2018) y en Lu & Logendran (2013), así como enfoques metaheurísticos (Lin et al., 2009; Ying et al., 2010) han abordado este objetivo. Otra alternativa es adoptar un modelo matemático eficiente, como el modelo 1 propuesto por Naderi & Salmasi (2012, p. 180) al TWT.

- **Decisiones complementarias:** La inclusión de modelos complementarios a los problemas principales del marco conceptual buscan incrementar la robustez de las decisiones en los niveles estratégico, táctico y operacional para el contexto en estudio. Decisiones estratégicas complementarias incluyen por ejemplo la definición de estrategias basadas en Lean, a través de la metodología Hoshin-Kanri (Hutchins, 2008; Tennant & Roberts, 2001), así como la identificación de actividades de generación de valor en la cadena de suministro, a través de la metodología del value stream mapping (VSM) (Rother & Shook, 2009). Otras decisiones estratégicas incluyen por ejemplo la localización o reubicación de las instalaciones, usando métodos cualitativos y/o numéricos (Puerto et al., 2018). Algunas decisiones tácticas complementarias consideradas son las decisiones de planeación de producción en CMS, así como la integración de otras actividades de planeación clave en estos sistemas, como son la distribución y balanceo de celdas de manufactura o la

consideración de sistemas de manufactura reconfigurable (Arkat et al., 2012; Bortolini et al., 2018). Finalmente, la integración de decisiones operacionales como el ruteo de vehículos y el control de la producción impactan en el incremento de la capacidad del sistema para cumplir con los requerimientos de los clientes (Braekers et al., 2016).

9.1.3 Fases 3 y 4: Optimización y selección de la mejor alternativa.

Las fases finales del marco conceptual comprenden la optimización de los modelos (fase 3) y la selección de la alternativa que minimiza los costos totales (fase 4). En la fase 3, la técnica preferida para la solución de los modelos se selecciona e implementa, considerando la complejidad y alcance de las decisiones integradas. En este sentido, las técnicas como los algoritmos exactos, por ejemplo, los métodos de optimización lineal y no lineal; las técnicas aproximadas, como los algoritmos heurísticos y metaheurísticos; y la simulación se recomiendan para la solución de los modelos principales y complementarios (Kundu & Dan, 2012; Neufeld et al., 2016).

Finalmente, la fase 4 compila los resultados de las fases previas y selecciona la alternativa con el costo total de manejo de materiales y de penalización por tardanzas más bajo. Por lo tanto, el contexto de aplicación del modelo conceptual resultará en la obtención de una alternativa de solución basada en los principios de Lean Manufacturing, enfocado en la integración de los modelos de distribución de instalaciones con áreas desiguales y de programación de la producción en celdas de manufactura, el cual impactará positivamente a la productividad y eficiencia del sistema de producción.

En este capítulo se presentó un modelo conceptual para integrar las decisiones de distribución de instalaciones con áreas desiguales y programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea, enmarcado en los principios de la filosofía Lean Manufacturing. El modelo propuesto busca reducir las “mudas” en los sistemas de producción, como el manejo de materiales, el inventario de trabajo en proceso, el movimiento innecesario de piezas y personal y los altos tiempos de preparación de las máquinas. En este sentido, la decisión integrada estará enfocada en minimizar los costos totales de manejo de materiales y de penalización por entregas tardías de los trabajos, lo cual se espera genere un impacto positivo en la productividad y eficiencia de los sistemas producción del contexto en donde se aplique.

10 APLICACIÓN DEL MODELO EN CASO DE ESTUDIO

A pesar de las ventajas de aplicar efectivamente las decisiones de distribución en plantas y programación de la producción en enfoques de celdas de manufactura, muchas empresas manufactureras que ofrecen una amplia variedad de productos cuentan con ambientes de producción en donde los tiempos de preparación no están optimizados y la distribución de las estaciones de trabajo o departamentos es ineficiente. Por lo tanto, los sistemas de producción de estas empresas están siendo consumidas por actividades que no añaden valor o que generan desperdicios, también conocidos como *mudas* en la filosofía *Lean Manufacturing*. Adicionalmente, los gerentes de operaciones, principalmente de ciertas industrias tradicionales y en países en vías de desarrollo, son reacios a realizar cambios importantes en sus operaciones ya que no tienen conocimiento del impacto real de las alternativas disponibles para incrementar su productividad y eficiencia.

El presente capítulo muestra una aplicación del modelo conceptual para la integración de los modelos de distribución de instalaciones con áreas desiguales y programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea. El caso de estudio es una empresa del sector de la confección de prendas de vestir de la ciudad de Cúcuta en Colombia. Este sector es uno de los más representativos de la industria manufacturera de la ciudad, sin embargo, las compañías en este sector se caracterizan por ser empresas tradicionales, que han sido afectadas por la situación económica local y reacias a la adopción de técnicas de ingeniería y de optimización que les permita realizar los cambios necesarios en sus sistemas de producción para ganar competitividad en los

contextos nacionales y mundiales. Una de las situaciones que se presenta frecuentemente en las empresas de este sector en la región, especialmente en pequeñas empresas, es la ubicación de sus procesos productivos en casas o residencias, lo cual no es apropiado para la ejecución correcta de las operaciones y el flujo de materiales entre departamentos.

De acuerdo con la teoría de la complejidad computacional, los problemas incluidos en el modelo conceptual, es decir el UAFLP y el FSGSP, son problemas combinatorios categorizados en la clase NP-hard, lo que indica que no es posible obtener soluciones óptimas utilizando un algoritmo en tiempo polinomial (Garey et al., 1976; Meller & Gau, 1996). Por esta razón, la aplicación de algoritmos heurísticos y metaheurísticos, que resuelva al menos sub-óptimamente estos problemas complejos en tiempos computacionales más cortos, ha sido uno de los tópicos más recientemente abordados en la literatura. En este capítulo, dos algoritmos genéticos (*GA*, del inglés *genetic algorithms*) se definen y validan para resolver los problemas del modelo implantado. El *GA* es una metaheurística reconocida por ser robusta para la optimización de problemas combinatorios complejos (Sivanandam & Deepa, 2007; Talbi, 2009).

10.1 Aplicación de las fases del modelo conceptual.

La aplicación del modelo que se presenta en la Figura 9.3, incluyó la realización de las cuatro fases que lo componen, identificando los diferentes bloques y adaptándolos a las necesidades de la empresa durante cada fase.

Fase 1. Recolección de la información de entrada

Durante la fase de recolección de la información de entrada, se contactó a una empresa de confección de ropa deportiva, se definió el alcance del

estudio y se obtuvo aprobación para desarrollar la aplicación del modelo como una propuesta de solución a la problemática presentada en el área de producción. La descripción del contexto y la problemática del caso de estudio se detalla en la sección 10.2 del presente capítulo. Posteriormente, se llevó a cabo la recolección de los datos requeridos en el modelo:

- Para el UAFLP, se recolectaron las dimensiones de la planta de producción actual, las dimensiones de máquinas y equipos y demás requerimientos, la demanda anual de la empresa y la relación entre los departamentos.
- Para el FSGSP, se obtuvieron los datos de una orden con 516 trabajos que debía completarse en un día laboral. La orden incluía 15 referencias de diferentes tipos de productos, entre ellas camisetas, shorts y sudaderas para dama y caballero, y leggings y franelillas para dama. Adicionalmente, se recopiló información de la secuencia de operaciones de estas referencias y se determinaron tiempos de procesamiento y preparación de las máquinas.

Fase 2. Definición de las decisiones

Durante la fase de definición de las decisiones, se obtuvo inicialmente un compromiso por parte de la gerencia del caso de estudio para implantar un ambiente basado en la filosofía *Lean Manufacturing* que enmarque las decisiones del modelo:

- Dentro de las decisiones estratégicas de largo plazo, se adopta entonces la distribución de instalaciones con áreas desiguales con el objetivo de minimizar los costos totales de manejo de materiales (*MHC*), el cual se adopta debido a su impacto en los costos operacionales y a que es un indicativo del nivel de movimiento que requiere una distribución en planta dada. El *MHC* está definido en la ecuación (10.1).

$$MHC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n f_{ij} d_{ij} \quad 10.1$$

- En esta ecuación, n representa el número de departamentos en la instalación, f_{ij} representa el flujo de materiales entre los departamentos i y j y d_{ij} la distancia rectilínea entre los departamentos i y j . La norma de la distancia rectilínea se utiliza frecuentemente para determinar distancias en el problema de *layout* debido a que se ajusta más fácilmente a los pasillos en las distribuciones reales (Gonçalves & Resende, 2015).
- El modelo de distribución de instalaciones con áreas desiguales propuesto requiere la evaluación de una tasa o relación de aspecto de cada departamento i (α_i), con el fin de obtener instalaciones con dimensiones de ancho y largo realistas. La relación o tasa de aspecto se calcula utilizando la expresión presentada en la ecuación (10.2), en donde l_i^x, l_i^y representan las dimensiones de ancho y largo del departamento, respectivamente.

$$\frac{\max \{l_i^x, l_i^y\}}{\min \{l_i^x, l_i^y\}} \quad 10.2$$

- Como parte de las decisiones operativas de corto plazo, se define el modelo de programación de la producción en enfoques de celdas de manufactura de flujo en línea con el objetivo de minimizar la tardanza ponderada total de los trabajos (TWT). La función objetivo seleccionada en este caso es la de tardanza ponderada total, como se expresa en la ecuación (10.3).

$$TWT = \sum_{j \in G_k} w_j T_j$$

En donde,

10.3

$$T_j \geq C_{jm} - e_j, \quad \forall j \in G_k$$

En la definición del TWT, T_j representa la tardanza del trabajo j , la cual está dada en función del tiempo de terminación de ese trabajo en la última máquina m (C_{jm}) y de la fecha de entrega pactada para el trabajo (e_j); esto para todos los trabajos en la familia de trabajos G_k . La ponderación del trabajo j , w_j , representa una penalización realizada por tardanza en la terminación del trabajo.

Fase 3 y 4. Optimización y selección de la mejor alternativa

Las últimas fases del modelo consideran la selección de una técnica apropiada para la optimización de las decisiones en el modelo y la posterior identificación de la mejor alternativa con el costo total más bajo. La técnica de solución seleccionada para el caso en estudio es la aplicación de la metaheurística GA , como se describe en la siguiente subsección.

10.1.1 Definición y validación de algoritmos genéticos.

Dos GA se desarrollaron y validaron para la solución de los modelos presentados al caso de estudio. A continuación, se mencionan las características de los operadores usados en el desarrollo de los GA , los cuales están basados en la literatura disponible.

Codificación y representación de las soluciones

La solución de las decisiones para la distribución de instalaciones y la programación de la producción en celdas de manufactura requieren ser codificadas en una estructura que permita su evaluación y modificación

dentro de los algoritmos metaheurísticos, y que posteriormente puedan representar una solución factible.

Para la distribución de instalaciones con áreas desiguales se usa un cromosoma de dos partes como se muestra en la Figura 10.1. La primera parte del cromosoma es una permutación de los departamentos que representa la ubicación de estos en el plano de planta de izquierda a derecha y de arriba abajo. La segunda parte del cromosoma es un vector binario que determina las posiciones en las cuales se generan las bahías, en donde b_i representa la generación de una nueva bahía siguiendo la Estructura de Bahías Flexibles (FBS, del inglés *Flexible Bay Structure*), mientras que c_i indica que los departamentos son ubicados en la bahía actual. La codificación de la solución en la Figura 10.1a se representa utilizando la distribución de bloques como se muestra en la Figura 10.1b. Las bahías se generan después de ubicar los departamentos 2 y 5, de acuerdo con el cromosoma de partición de bahías, y los departamentos se ubican en la secuencia de la permutación.

La decisión de programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea se codifica y representa utilizando un cromosoma de longitud $g + 1$, en donde g es el número de familias o grupos de trabajos. La representación de la solución puede realizarse utilizando el diagrama de Gantt, el cual es ampliamente utilizado para los problemas de programación de la producción. La Figura 10.1 muestra la codificación y representación de la solución para esta decisión, respectivamente. La codificación consiste entonces en una primera parte que contiene la secuencia de producción de los grupos o familias de trabajos, mientras que las partes subsiguientes del cromosoma indican la secuencia de los trabajos que pertenecen a cada familia de productos. El diagrama en la Figura 10.2 representa la solución mostrada en el cromosoma presentado en la misma figura.

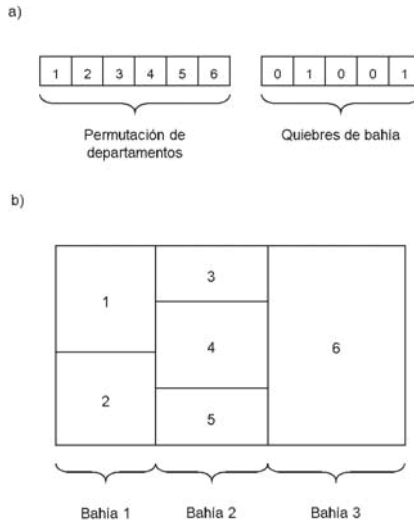
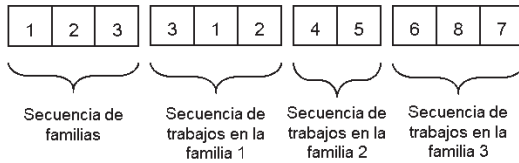


Figura 10.1 Estructura de codificación (a) y representación de la solución (b) para la distribución de plantas con áreas desiguales.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

a)



b)

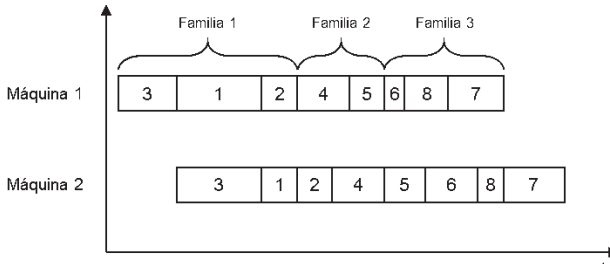


Figura 10.2 Estructura de codificación (a) y representación de la solución (b) para la programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

Función fitness, y operadores de selección, cruce y mutación

Para la aplicación de los GAs, las soluciones se evalúan a través de funciones fitness, que permiten determinar si un individuo representa una solución que es la mejor dentro del conjunto de soluciones disponibles. Para el modelo de distribución de plantas con áreas desiguales se utiliza una función fitness para evaluar el costo total de manejo de materiales (*MHC*) de las soluciones considerando una penalización para las instalaciones con departamentos no factibles (D_{ind}), de acuerdo con la restricción de relación o tasa de aspecto (α_i) requerida.

Para el caso del modelo de programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea, la función fitness es la misma tardanza ponderada total (*TWT*), en donde la ponderación (w_j) representa el costo unitario por terminación tardía de cada trabajo.

Las operaciones de selección, cruce y mutación de los GAs se definen de acuerdo con los siguientes parámetros establecidos para los algoritmos: “Tamaño del Torneo”, “Probabilidad de Cruce” y “Probabilidad de Mutación”, respectivamente. La Figura 10.3 muestra el procedimiento para la aplicación de los algoritmos genéticos en la optimización de los modelos para el caso de estudio.

La figura indica que el algoritmo se inicia al generar aleatoriamente una población de tamaño dado por el parámetro “Tamaño de la Población”. Posteriormente, se seleccionan individuos de la población para realizar la operación de cruce. La selección se realiza a través de un torneo en donde el número de participantes se define por el parámetro “Tamaño del Torneo”.

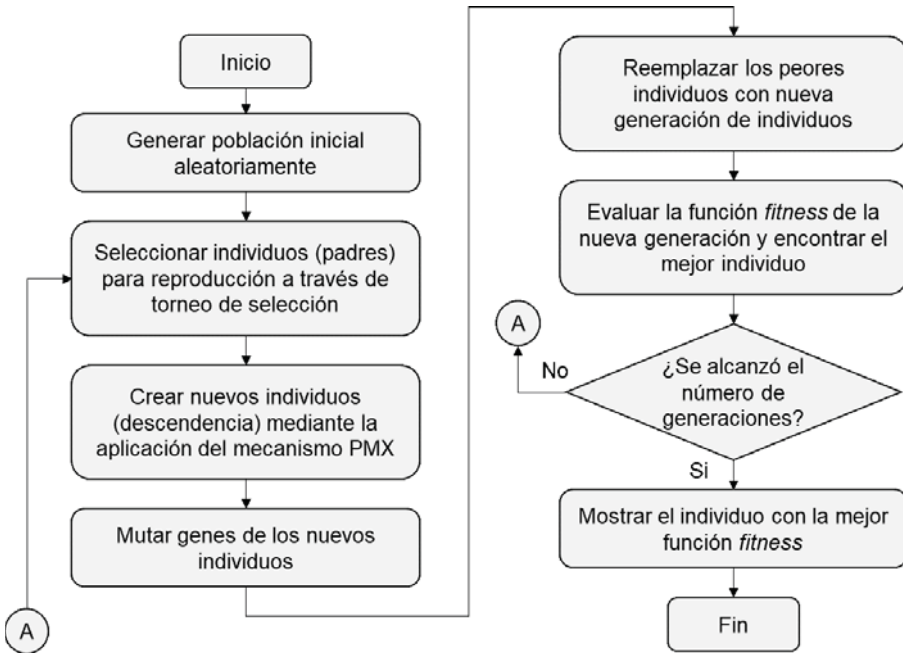


Figura 10.3 Procedimiento para la aplicación de los GAs en el caso de estudio.
Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

A los individuos seleccionados se les aplica la operación de cruce en el siguiente paso, de acuerdo con el parámetro de “Probabilidad de Cruce”. El mecanismo de cruce que se utiliza es el método de Cruce Parcialmente Emparejado, PMX (en inglés, *Partially Matched Crossover*) para las partes del cromosoma conformadas por permutaciones, mientras que para las partes del cromosoma que son binarias se aplica el método de Cruce de Dos Puntos. La Figura 10.4 explica cómo se aplican los mecanismos de cruce PMX y de dos puntos para los cromosomas de cada modelo.

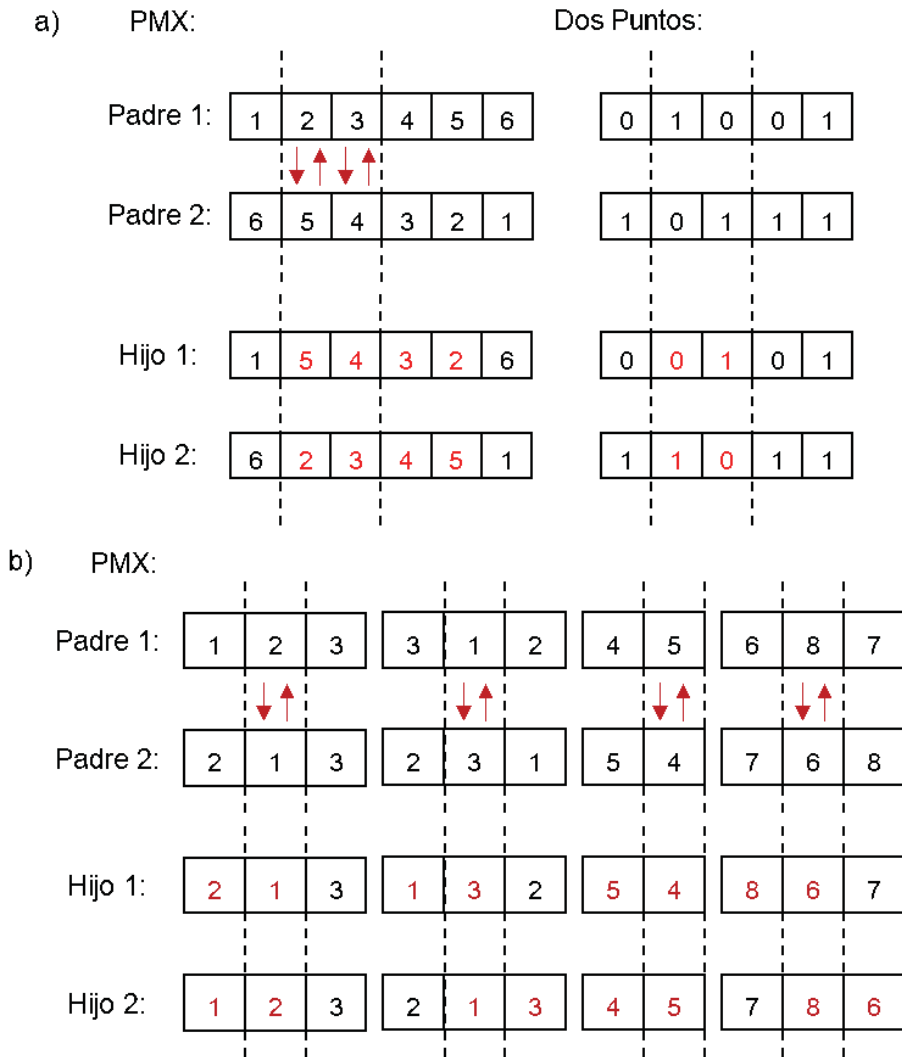


Figura 10.4 Mecanismos de cruce para los cromosomas de los modelos de a) distribución de instalaciones y b) programación de la producción en celdas de manufactura.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

La operación de mutación es el siguiente paso en el procedimiento y se aplica de acuerdo con el parámetro “Probabilidad de Mutación”. La operación consiste en intercambiar aleatoriamente dos alelos de cada parte de los cromosomas de los modelos. Las operaciones de cruce y de mutación se aplican hasta reemplazar completamente la población, lo que representaría una nueva generación de individuos. Finalmente, el algoritmo se detiene hasta que se cumpla el número de generaciones dado por el parámetro “Número de Generaciones” y se muestra el individuo con la mejor función *fitness* para cada decisión.

Validación y parametrización

Previo a su aplicación al caso de estudio, los operadores de los GAs y sus parámetros se validan utilizando instancias de datos tomadas de la literatura. Las instancias O7, O8 y O9 (Meller et al., 1998); vc 10R-a (van Camp et al., 1992) y MB12 (Bozer & Meller, 1997) fueron utilizadas para el modelo de distribución de instalaciones con áreas desiguales. Por su parte, las instancias de datos para el modelo de programación de la producción en celdas de manufactura de flujo en línea fueron generadas aleatoriamente (Keshavarz et al., 2019; Salmasi et al., 2010).

Los resultados del proceso de validación y parametrización mostraron que el GA se desempeñó de la mejor manera en la optimización de la distribución de instalaciones utilizando el siguiente conjunto de parámetros: tamaño de población: 100, número de generaciones: 200, tamaño de torneo: 2, probabilidad de cruce: 0.9 y de mutación: 0.1. El GA alcanzó un error promedio de 1,314% utilizando este conjunto de parámetros, en comparación con los mejores resultados conocidos para las instancias de datos utilizadas. En comparación con este GA, la validación del GA para la programación en celdas de manufactura arrojó como mejor conjunto de

parámetros los mismos valores, modificando el número de generaciones de 200 a 300. En total, 208 instancias del problema de programación de producción se evaluaron con un error promedio de 0,033%, utilizando el mejor conjunto de parámetros.

10.2 Aplicación a una empresa de confección de ropa deportiva

10.2.1 Descripción del caso de estudio.

El caso de estudio para la aplicación del modelo integrado es una empresa de confección de prendas de vestir ubicada en la ciudad de Cúcuta, Colombia. Cúcuta se caracteriza por ser una ciudad cuya actividad económica principal es el comercio, sin embargo, la confección de prendas de vestir es uno de los sectores con más relevancia dentro de las industrias manufactureras. El problema de este sector es la falta de aplicación de técnicas de ingeniería y optimización para la toma de decisiones, acompañado por la falta de inversión en sus procesos de manufactura. La empresa específica en estudio es una empresa de confección de ropa deportiva, cuyo sistema de producción está instalado de manera empírica en una casa residencial con dimensiones de ancho y largo de 12 y 24,17 metros, respectivamente.

Cuando se observa la disposición de los departamentos en la instalación, se identificó que solo los procesos de impresión, costura y terminación se llevan a cabo para producir referencias de camisetas, sudaderas, shorts, leggings y franelillas tanto para damas como para caballeros, careciendo de espacios para áreas de importancia en el proceso como son el corte de tela, la recepción y envío de materias primas y productos terminados, el almacenamiento, el área de diseño y el área de gestión o administración. Adicionalmente, se identificó que los espacios actuales son insuficientes para la ubicación de las máquinas y estaciones de trabajo y para el flujo de materiales y personas, ocasionando altos niveles de inventario en proceso,

altos tiempos de espera entre procesos y desorganización en los puestos de trabajo. Finalmente, se conoció que la empresa carece de una técnica o sistema para realizar la programación de las órdenes que recibe con la finalidad de entregarlas a tiempo.

Por los motivos anteriormente mencionados, se propone el diseño de una nueva planta de producción con las dimensiones apropiadas para disponer correctamente los puestos de trabajo y los flujos de materiales y de personal. En la nueva planta se incluyen además los departamentos de corte, almacenamiento, área administrativa, de calidad y de planeación y diseño, y un área para el descanso y la alimentación del personal. La Figura 10.5 muestra las etapas del proceso de producción para el caso de estudio, mientras que la Tabla 10.1 presenta la descripción y requerimientos de área de los departamentos ubicados actualmente en la empresa y los propuestos para la nueva planta de producción. Los departamentos con un valor de área igual a 0 en el estado actual indican que no se encuentran dispuestos en la planta de la empresa actualmente. Los requerimientos de área para la nueva planta se determinaron usando el Método de Guerchet. Las ampliaciones en los requerimientos de área y los nuevos departamentos fueron propuestos debido a la necesidad de mejorar las condiciones de trabajo del personal y mejorar el flujo de materiales en las áreas de terminación y costura. Adicionalmente, la nueva área de almacenamiento de producto terminado se propone para prevenir la acumulación de este al final de la línea del proceso productivo. Por lo tanto, el área total de los departamentos para la planta propuesta es de 1139,41 m². Los flujos de materiales entre departamentos se determinaron considerando la secuencia de operaciones de los productos y la demanda anual tanto para el estado actual como el propuesto, la cual es de 55.000 unidades en el año.

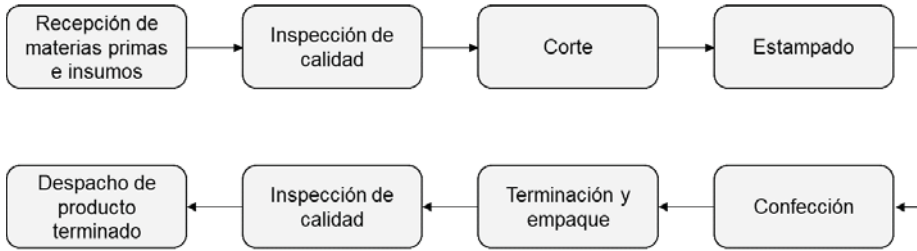


Figura 10.5 Etapas del proceso de producción propuesto para el caso de estudio.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

El enfoque de celdas de manufactura se propone para el área de corte de la planta propuesta, debido a la necesidad de esta área de mejorar su productividad y eficiencia, siendo uno de los cuellos de botella del proceso productivo. En total, se definieron tres celdas de manufactura en una disposición de flujo en línea, y se recolectó información de los tiempos de preparación de las máquinas y de procesamiento de los trabajos y familias de productos para una orden de 516 trabajos, a completarse en un día de trabajo (es decir, con una fecha de entrega de 10 horas = 36.000 segundos). La Tabla 10.2 presenta la asignación de las familias de productos a las tres celdas de manufactura para la orden en estudio. La tabla muestra los tipos de productos, las familias y el número de familias asignada a cada celda de manufactura (CM1, CM2, o CM3), así como el número de trabajos y de máquinas que conforman cada celda. La Figura 10.6 muestra la disposición de las máquinas en cada celda de manufactura, siguiendo el patrón de flujo en línea (línea roja). El costo unitario de penalización por entrega tardía se asume en COP2,5 por segundo por unidad de trabajo tardía.

El análisis de la situación actual para el caso de estudio resultó en un total de costo de manejo de materiales de COP 9.331.230, mientras que la tardanza ponderada total del programa actual para la orden en estudio fue de COP 180.100, el cual fue obtenido al calcular el programa de producción para

Tabla 10.1 Descripción y requerimientos de área de los departamentos en la planta actual y propuesta.

| N° | Departamento (propuesto) | Descripción | Área actual (m ²) | Área propuesta (m ²) |
|----|--------------------------------------|--|-------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Recepción y despacho | Espacio para la entrada, cargue/descargue y salida de vehículos. | 50,0 | 50,0 |
| 2 | Costura | Actual: Incluye máquinas plana, collarín y fileteadora en una disposición job-shop flexible. Propuesta: Incluye tres celdas de manufactura en una disposición flow-shop. | 75,6 | 195,5 |
| 3 | Estampado | Incluye 3 (4 en la propuesta) máquinas de estampado, que imprimen diseños en la tela. | 11,6 | 83,3 |
| 4 | Terminación | Incluye los procesos de ojales, limpieza y etiquetado y embalado. | 31,7 | 100,4 |
| 5 | Oficina (área administrativa) | Actual: Una oficina con baño para el gerente. Propuesto: Se incluyen puestos de trabajo administrativos, para ventas y marketing y para contabilidad y finanzas, con baños y sala de reuniones. | 11,4 | 67,2 |
| 6 | Almacenamiento (de materia prima) | Actual: Área para el almacenamiento de trabajo en proceso e inventario de productos terminados. Propuesto: Área para el almacenamiento de materias primas: tela e insumos. | 108,0 | 153,0 |
| 7 | Almacenamiento de producto terminado | Área para el almacenamiento de los productos terminados, etiquetados y empacados a la espera de ser despachados. | 0,0 | 153,0 |
| 8 | Corte | Nueva área para la ubicación de una máquina de corte automático | 0,0 | 131,3 |
| 9 | Inspección de calidad | Área nueva para la inspección de materias primas, producto en proceso y producto terminado. Incluye cuatro estaciones de trabajo. | 0,0 | 52,9 |
| 10 | Planeación y diseño | Área nueva para la planeación de procesos y diseño y planeación de productos. Incluye cuatro estaciones de trabajo. | 0,0 | 52,9 |
| 11 | Área de descanso y comedor | Nueva área con 4-6 comedores y una pequeña área de descanso. | 0,0 | 100,0 |
| | | Área Total: | 288,21 | 1139,41 |

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

las mismas órdenes para la disposición actual de las máquinas, las cuales están agrupadas por funciones o tipos de máquina (Job-shop). Por lo tanto, la suma total de los costos de manejo de materiales y de penalización por tardanzas fue de COP 9.511.330 para el estado actual.

10.2.2 Aplicación y optimización de las decisiones del modelo

Tabla 102. Asignación de familias de productos y máquinas a las celdas de manufactura propuestas.

| | Celda de manufactura 1 (CM1) | Celda de manufactura 2 (CM2) | Celda de manufactura 3 (CM3) |
|---|---|--|---|
| Tipo de producto | Camisetas | Shorts | Sudaderas, leggins, franelillas |
| Número de familias de productos | 4 | 3 | 8 |
| Familias de productos | Camisetas: W057-C01, W057-C02, W057-C03, W057-C04 | Shorts: A034-P01, A034-P02, A034-P03 | Sudaderas: S082-S01, S082-S02, S082-S03, S082-S04; Leggins: P021-L01, P021-L02; Franelillas: P021-F01, P021-F02 |
| Número de trabajos | 156 | 108 | 252 |
| Número de máquinas | 4 | 9 | 4 |
| Máquinas (en secuencia de flujo en línea) | 1. Collarín 2. Fileteadora 3. Collarín 4. Collarín | 1. Plana 2. Fileteadora 3. Plana 4. Fileteadora 5. Plana 6. Collarín 7. Plana 8. Collarín 9. Plana | 1. Collarín 2. Collarín 3. Collarín 4. Collarín |

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

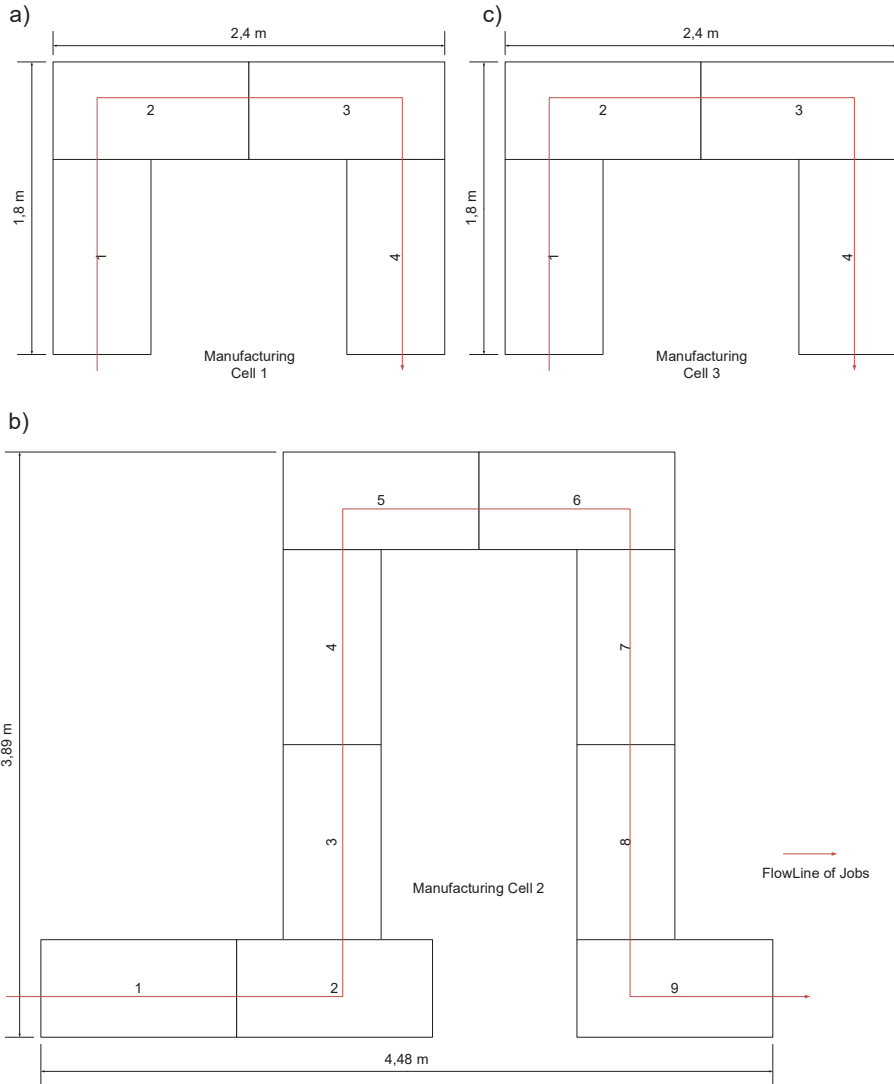


Figura 10.6 Disposición de las máquinas en el sistema de celdas de manufactura propuesto: a) CM1, b) CM2 y c) CM3.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

10.2.2 Aplicación y optimización de las decisiones del modelo

La aplicación del modelo integrado de optimización utilizando los modelos para la distribución de plantas con áreas desiguales y programación de productos en celdas de manufactura de flujo en línea se realizó siguiendo los pasos mostrados en la Figura 10.7.

En total, se ejecutaron 10 iteraciones del procedimiento mostrado en la figura, en donde los GAs buscaron la mejor alternativa de planta con un *MHC* mínimo y la mejor secuencia de trabajos y familias de trabajos con una suma total de *TWT* mínimo para las tres celdas de manufactura en el área de costura. El procedimiento se llevó a cabo usando Python 3.8 en un computador de escritorio con un procesador Intel Core i5 de 2,2 GHz y 6 Gb de RAM.

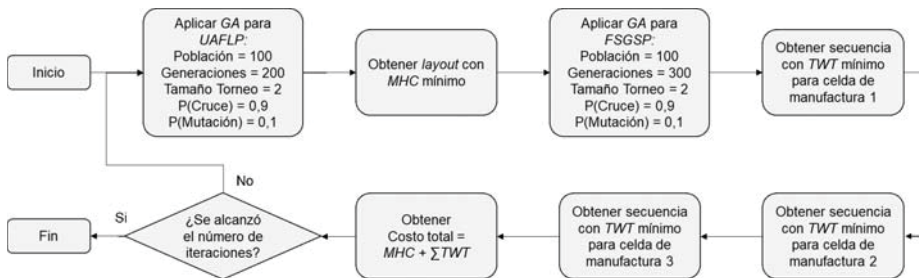


Figura 10.7 Procedimiento de aplicación de los GAs para la optimización integrada de los modelos UAFLP y FSGSP.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

Los resultados del procedimiento indican que la mejor alternativa de solución para el estado propuesto se alcanzó en la iteración 0, en donde el costo total (es decir, $MHC + \sum TWT$) se reduce en un 6,69% en comparación con el costo total actual. Los resultados también indican que la suma de los costos de penalización por entregas tardías ($\sum TWT$) fue totalmente nulo para la orden de 516 trabajos en estudio utilizando el sistema de celdas de

manufactura, mientras que los costos de manejo de materiales (*MHC*) se redujeron un 4,89% a pesar de que la planta es casi un 300% más grande.

Los resultados obtenidos indican que el modelo integrado propuesto utilizando celdas de manufactura de flujo en línea permite la reducción de un 100% de los trabajos con entregas tardías lo que impacta positivamente la eficiencia del sistema productivo y la satisfacción del cliente. Adicionalmente, la disposición de los procesos en una planta más grande permite el fácil flujo de materiales entre departamentos y la reducción de los costos de manejo de materiales, lo que significa un aumento en la productividad de la empresa. La Figura 10.8 y 10.9 muestran el desempeño de los GAs aplicados a los modelos UAFLP y FSGSP, respectivamente, mientras que la Figura 10.10 muestra la mejor distribución en planta para la nueva instalación propuesta, en donde los números representan el número del departamento como se describieron en la Tabla 10.1.

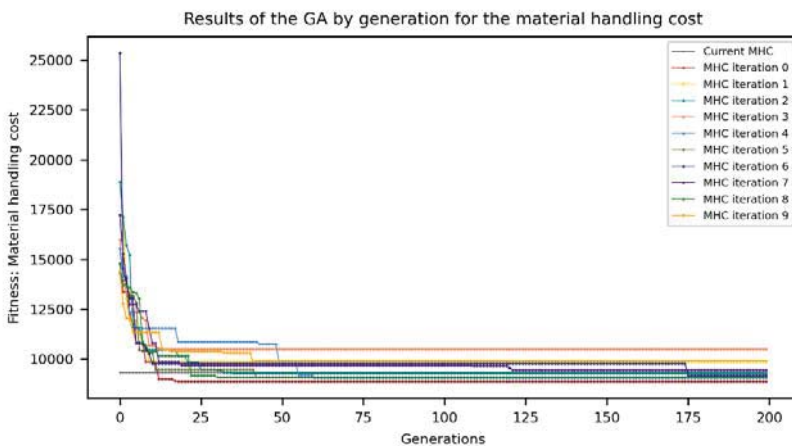


Figura 10.8 Desempeño del GA por generación para la optimización del costo de manejo de materiales.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (in press)

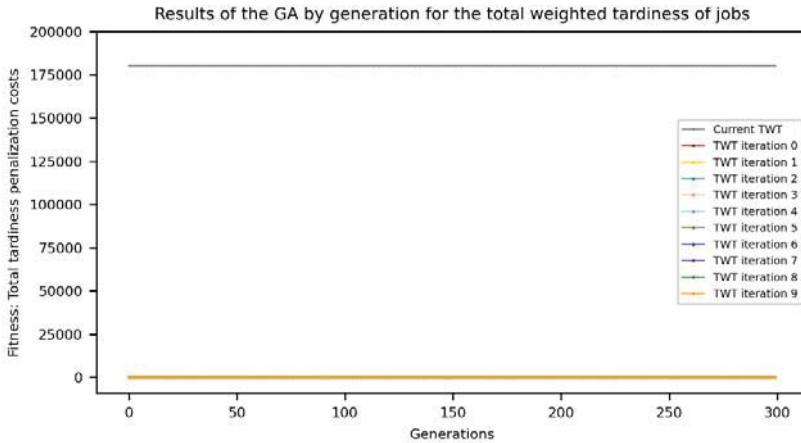


Figura 10.9. Desempeño del GA por generación para la optimización de la suma de las tardanzas ponderadas totales.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

En la Figura 10.8, se observa que el algoritmo genético utilizado para solucionar el modelo UAFLP para el caso de estudio logran converger a una solución mínima después de las 100 a 125 generaciones de soluciones, después de encontrar una solución mejor que la inicial muy rápidamente en las primeras generaciones. Por su parte, la Figura 10.9 demuestra el impacto del sistema CMS en la eficiencia y productividad del sistema productivo en el área de costura, ya que la tardanza ponderada total se minimiza totalmente a 0 con la aplicación del enfoque de celdas de manufactura, en comparación con el valor de la tardanza ponderada para la situación actual. El CMS permite procesar con mayor velocidad las órdenes, aprovechándose de los beneficios de la tecnología de grupos, al reducir tiempos de preparación de las máquinas y ajustar la disposición de las mismas en un flujo en línea.

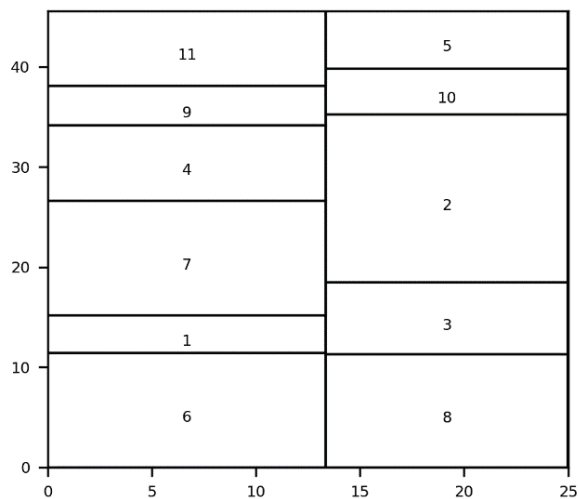


Figura 10.10. Mejor alternativa de distribución en planta para la instalación propuesta para el caso de estudio.

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)”

10.2.3 Análisis de los resultados mediante simulación para el caso de estudio

Esta sección presenta una evaluación de los resultados obtenidos por el sistema de celdas de manufactura propuesto para el área de costura a través de un estudio de simulación. Utilizando como base la información de entrada para el caso de estudio, se desarrolla entonces un modelo de simulación para analizar la eficiencia y productividad de la disposición propuesta en comparación con la situación actual de la empresa. En este sentido, se define el modelo utilizando indicadores de desempeño relacionados con eficiencia y productividad, como son el tiempo de flujo promedio y el *throughput*, o tasa de salida promedio. El tiempo de flujo promedio se conoce como el tiempo promedio que un trabajo está en el sistema, desde el inicio hasta el final del proceso de producción, mientras que el *throughput* promedio es la tasa de salida promedio del sistema de producción.

El modelo de simulación fue construido utilizando la versión académica del software de simulación Simio® 10², en donde cada entidad (es decir, cada trabajo) incluye las estadísticas de los tiempos de flujo y *throughput* promedios, de acuerdo con los tiempos de corrida del modelo. De esta manera, la información tomada de las Model Entity se utiliza para calcular estos indicadores de desempeño que se usan para evaluar el modelo de celdas de manufactura propuesto, como se muestra en las ecuaciones (10.4) y (10.5). Adicional a estas métricas de desempeño, se evaluaron en el modelo otra información como son los tiempos de preparación de las máquinas y de ocio de los Server (es decir, las máquinas).

2. <https://www.simio.com/>

$$\text{Average Flow Time} = \frac{\sum \text{Average Flow Time of each entity}}{\text{Number of entities}} \quad 10.4$$

$$\text{Average Throughput} = \frac{\sum \text{Average Throughput of each entity}}{\text{Number of entities}} \quad 10.5$$

El proceso de construcción del modelo en el software Simio® consistió en primer lugar en diseñar los puestos de trabajo y máquinas para formar las celdas de manufactura dentro del departamento de costura utilizando el software SketchUp 3D³. Estos diseños fueron importados a la interfaz de Simio® con el objetivo de representar los Server de manera visual al contexto del caso de estudio. Adicionalmente, se utilizaron elementos como Path y Connector para definir las relaciones entre las máquinas, de acuerdo con la secuencia de operaciones de las familias de producto asignadas. La Tabla 10.3 muestra los elementos del software utilizados para la construcción de los modelos de simulación tanto para el estado actual como para el propuesto. La Figura 10.11 muestra los modelos de simulación en Simio® tanto para el estado actual como para el estado propuesto.

Tabla 10.3 Elementos utilizados en la construcción de los modelos de simulación

| Elemento | Representación | Cantidades utilizadas en cada modelo | |
|---------------|---|--------------------------------------|-----------|
| | | Actual | Propuesto |
| <i>Source</i> | Llegada de pedidos (trabajos) del sistema | 1 | 1 |
| <i>Sink</i> | Salida de pedidos del sistema | 1 | 1 |
| <i>Server</i> | Máquinas: collarín, fileteadora o plana. | 3 | 17 |

3. <https://www.sketchup.com/>

| Elemento | Representación | Cantidades utilizadas en cada modelo | |
|---------------------|---|--------------------------------------|-----------|
| | | Actual | Propuesto |
| <i>Model Entity</i> | Pedidos o trabajos que requieren ser procesados, divididos en las diferentes familias de producto asignadas | 10 | 10 |
| <i>Path</i> | Camino que siguen los trabajos para desplazarse físicamente por el sistema | 4 | 6 |
| <i>Connector</i> | Relación entre las máquinas para definir la secuencia de operaciones | 6 | 14 |

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2022)

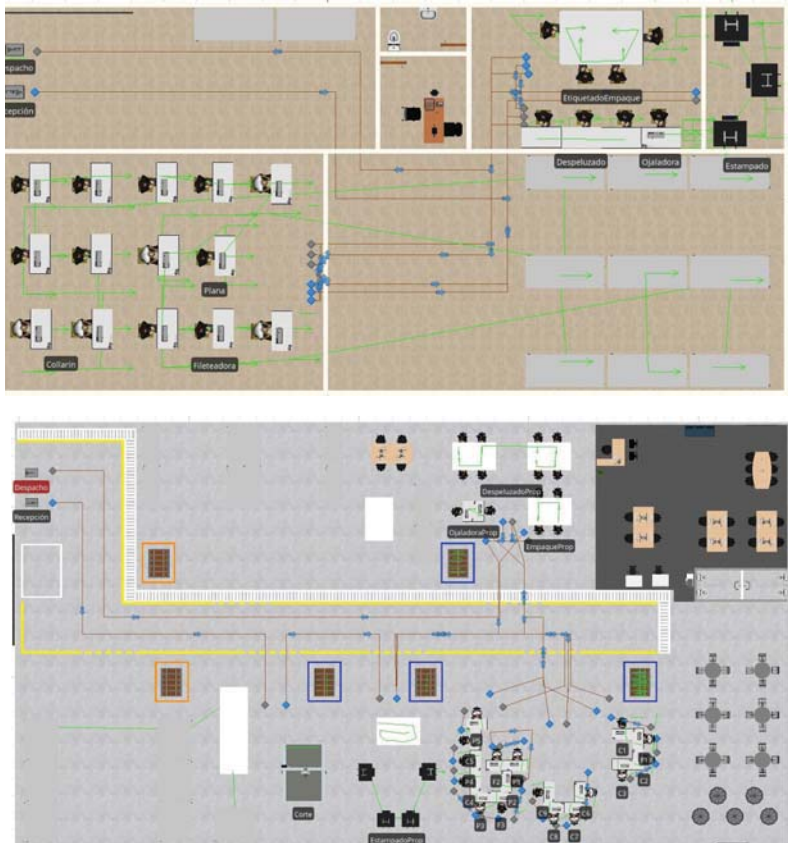


Figura 10.11. Modelos de simulación en Simio® para el estado actual (arriba) y para el estado propuesto (abajo).

Con los modelos de simulación contruidos en el software Simio®, se procedió a ingresar la información de entrada y los parámetros de funcionamiento de estos. Entre ellos, se ingresó la información de los tiempos de procesamiento de las familias de productos y del “mix” de productos al momento de la creación de entidades. Adicionalmente, se definió la secuencia de operaciones de cada familia de productos y se generó una matriz con los tiempos de procesamiento dependientes de la secuencia de las familias a ser utilizados en las máquinas. Finalmente, se verificó que el modelo corriera apropiadamente de acuerdo con los parámetros de entrada ingresados y se validó realizando corridas preliminares, las cuales se compararon con el estado actual del caso de estudio. Para los experimentos realizados con el fin de determinar el impacto del estado propuesto, se realizaron un total de 100 experimentos, en donde cada experimento tuvo 300 horas de simulación, de las cuales las primeras 10 horas fueron utilizadas para estabilizar el modelo (es decir, como período de calentamiento o “*warm-up*”).

La Tabla 10.4 muestra los resultados de los tiempos de procesamiento, de preparación y de ocio promedios por cada uno de los servidores para los modelos actual y propuesto. Los resultados indican que la implementación del sistema de celdas de manufactura redujo el tiempo de procesamiento promedio en 2,5%, el de preparación de máquinas promedio en 50,65% y el de ocio de las máquinas promedio en un 285,1%, en comparación con el estado actual. Estas mejoras indican que el sistema de celdas aumentó la tasa de flujo del departamento y transfirió el cuello de botella a otros departamentos como corte y estampado, lo cual justifica el incremento en los tiempos de ocio de las máquinas. En este sentido, las máquinas en el sistema de celdas de manufactura son tan eficientes que desarrollan el mismo trabajo en menos tiempo. Este resultado confirma el impacto positivo del sistema propuesto para el caso de estudio.

Tabla 10.4 Análisis de los tiempos de procesamiento, de preparación y de ocio promedio para las máquinas del departamento de costura.

| SERVER | Tiempos de procesamiento | | Tiempos de preparación | | Tiempos de ocio | |
|-------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| | Promedio (s) | % | Promedio (s) | % | Promedio (s) | % |
| <i>Modelo actual</i> | | | | | | |
| Estación collarín | 531,71 | 51,74 | 487,22 | 46,99 | 493,09 | 1,26 |
| Estación plana | 851,02 | 67,43 | 194,49 | 11,66 | 677,64 | 20,91 |
| Estación fileteadora | 597,95 | 34,82 | 386,23 | 23,32 | 950,24 | 41,86 |
| Promedio Actual: | 660,23 | 51,33 | 355,98 | 27,33 | 706,99 | 21,34 |
| <i>Modelo propuesto</i> | | | | | | |
| C1 | 1142,21 | 44,32 | 109,45 | 3,34 | 2186,19 | 52,34 |
| F1 | 6,50 | 3,40 | 109,46 | 3,34 | 178,59 | 93,25 |
| C2 | 609,69 | 44,38 | 109,46 | 3,34 | 791,29 | 52,27 |
| C3 | 468,98 | 44,77 | 109,46 | 3,34 | 600,82 | 51,88 |
| <i>Promedio CM1:</i> | <i>556,85</i> | <i>34,22</i> | <i>109,46</i> | <i>3,34</i> | <i>939,23</i> | <i>62,43</i> |
| P1 | 1625,22 | 37,88 | 181,99 | 2,68 | 3428,23 | 59,44 |
| F2 | 103,61 | 29,76 | 181,96 | 2,68 | 236,04 | 67,56 |
| P2 | 201,60 | 34,52 | 181,99 | 2,68 | 367,68 | 62,80 |
| F3 | 1921,87 | 43,29 | 181,99 | 2,68 | 3187,70 | 54,03 |
| P3 | 39,83 | 13,49 | 181,97 | 2,68 | 247,99 | 83,82 |
| C4 | 71,49 | 21,57 | 181,97 | 2,68 | 251,77 | 75,75 |
| P4 | 63,36 | 18,18 | 181,98 | 2,68 | 276,49 | 79,14 |
| C5 | 207,94 | 34,28 | 181,98 | 2,68 | 383,09 | 63,04 |
| P5 | 552,41 | 43,59 | 181,98 | 2,68 | 716,55 | 53,73 |
| <i>Promedio CM2:</i> | <i>531,92</i> | <i>30,73</i> | <i>181,98</i> | <i>2,68</i> | <i>1010,62</i> | <i>66,59</i> |
| C6 | 875,38 | 40,93 | 235,62 | 9,65 | 1892,38 | 49,41 |
| C7 | 878,48 | 45,93 | 235,56 | 9,65 | 1377,08 | 44,41 |
| C8 | 148,11 | 38,37 | 235,59 | 9,65 | 202,74 | 51,97 |
| C9 | 1467,58 | 63,82 | 235,59 | 9,65 | 1837,67 | 26,53 |
| <i>Promedio CM3:</i> | <i>842,39</i> | <i>47,26</i> | <i>235,59</i> | <i>9,65</i> | <i>1327,47</i> | <i>43,08</i> |
| Promedio CMS: | 643,72 | 37,40 | 175,68 | 5,23 | 1092,44 | 57,37 |
| % Cambio: | -2,5% | | -50,65% | | 54,52% | |

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2022)

La Figura 10.12 y la Figura 10.13 muestran un análisis comparativo de los resultados de los tiempos de flujo y el *throughput* promedios, respectivamente, para los modelos actual y propuesto. Los resultados indican que las 10 familias de productos analizadas se tardaron 5.575,52 segundos en promedio para salir del sistema en el estado actual, con un promedio de 133,38 unidades. Esta situación mejoró significativamente con la aplicación del sistema de celdas de manufactura y la producción unidad por unidad, ya que el flujo de tiempo promedio fue de 2.706,13 segundos y la tasa de salida de 1.603,93 unidades en promedio. Estos resultados indican que las mejoras del sistema de celdas propuesto son representativas e impactan positivamente la eficiencia del sistema producción en el área de costura.

En este capítulo se presentó la aplicación del modelo de integración de las decisiones de distribución de plantas en áreas desiguales y programación de la producción en celdas de manufactura para un caso de estudio del sector de la confección de prendas de vestir de la ciudad de Cúcuta, específicamente de producción de ropa deportiva. El modelo integrador *se propone* y aplica a este caso de estudio debido a que se encontró que la empresa mantiene procesos de producción rudimentarios basado en decisiones empíricas, lo cual ha causado problemas relacionados con el espacio limitado para la ubicación de las estaciones de trabajo y para el flujo de materiales, así mismo con la eficiencia de los procesos de producción, especialmente en el área de costura y el incumplimiento de las fechas pactadas de entrega de pedidos con los clientes.

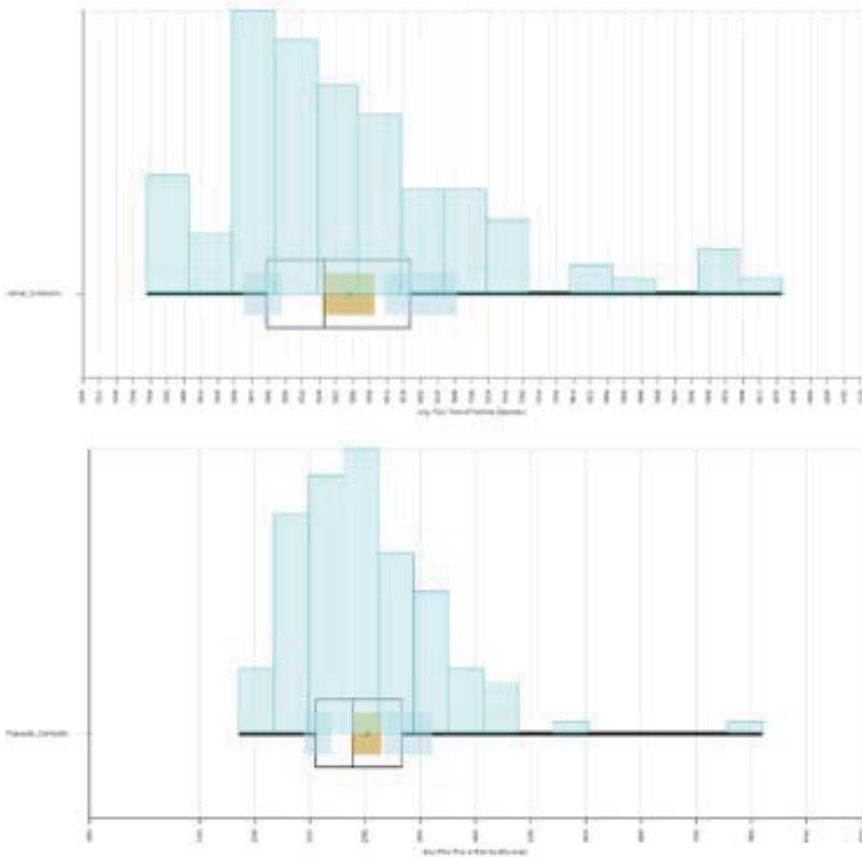


Figura 10.12. Análisis del tiempo de flujo promedio para el estado actual (arriba) y propuesto (abajo).

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

Los resultados del modelo propuesto mostraron un impacto positivo inmediato en el costo total de manejo de materiales y de penalización por tardanza. La combinación de las decisiones integradas en el modelo permitió la reducción del manejo de materiales entre departamentos utilizando una planta de producción significativamente más grande y cómoda para la ubicación de los procesos operativos y administrativos.

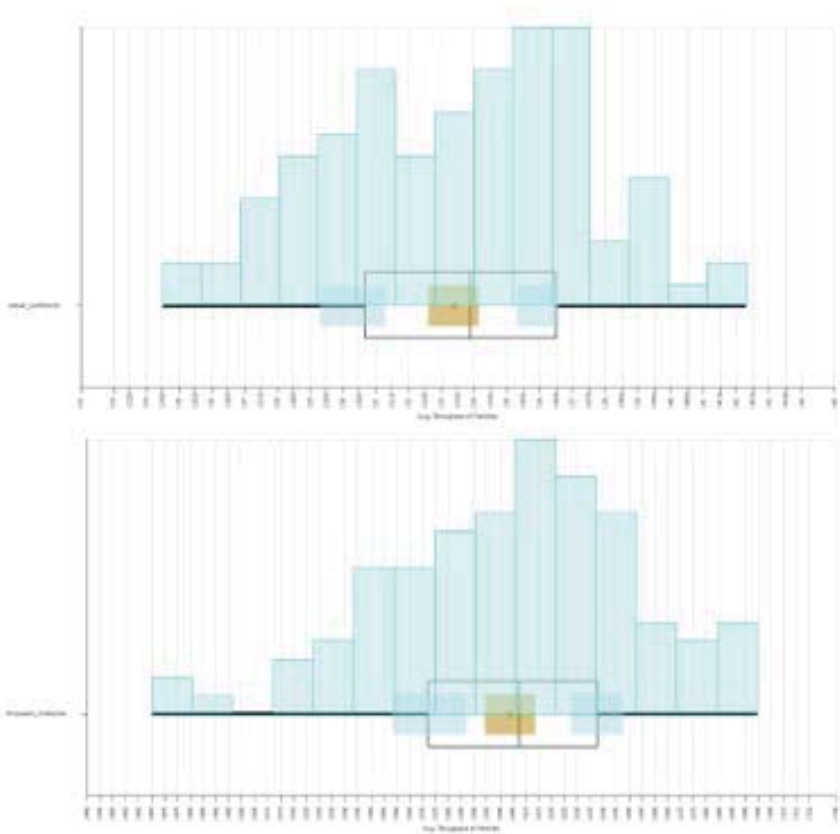


Figura 10.13. Análisis del *throughput* promedio para el estado actual (arriba) y propuesto (abajo).

Fuente: Cáceres-Gelvez et al. (2023)

Adicionalmente, el sistema de celdas de manufactura en el área de costura y la programación de la producción en grupos permitió la reducción de los costos de penalización por entregas tardías de los trabajos y, realizando un estudio más profundo, de los tiempos de preparación y espera de los trabajos en el sistema productivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Askin, R. G., & Goldberg, J. B. (2002). Design and analysis of lean production systems. Wiley.
- Baker, K.R. (1990). Scheduling groups of jobs in the two-machine flow shop. *Mathematical and Computer Modelling*, 13, 29-36. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(90\)90368-W](https://doi.org/10.1016/0895-7177(90)90368-W)
- Balamurugan, K., Selladurai, V., & Ilamathi, B. (2006). Solving unequal area facility layout problems using genetic algorithm. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 2(3), 281–301. Scopus. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2006.009777>
- Baldi, M.M. (2018). Proposta de um modelo de programação estruturado a partir das particularidades do fluxo de produção de um sistema de manufatura celular [Master's Thesis]. Universidade de São Paulo, Brazil. <https://doi.org/10.11606/D.18.2018.tde-23042018-094809>
- Banks, J. (Ed.), 2010. Discrete-event system simulation, 5th ed., International version. ed. Pearson Education, Upper Saddle River, N.J. ; London.
- Behjat & Salmasi, 2017)
- Behnamian, J., Zandieh, M., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2010). Due windows group scheduling using an effective hybrid optimization approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5–8), 721–735. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2147-z>
- Bhuiyan, T. H., Harun, S., & Azeem, A. (2021). Development of an optimisation model for unequal-area facility layout problems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 37(1), 27. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2021.112471>
- Blazewicz, J. & Kovalyov, M.Y. (2002). The complexity of two group scheduling problems. *Journal of Scheduling*, 5(6), 477-485. <https://doi.org/10.1002/jos.118>
- Blazewicz, J., Ecker, K. H., Pesch, E., Schmidt, G., Sterna, M., & Weglarz, J. (2019). *Handbook on Scheduling: From Theory to Practice*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99849-7>
- Bortolini, M., Galizia, F. G., & Mora, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>

- Boyd, S.P., Vandenberghe, L., 2004. Convex optimization. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York.
- Bozer, Y. A., & Meller, R. D. (1997). A reexamination of the distance-based facility layout problem. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 29(7), 549–560. Scopus. <https://doi.org/10.1080/07408179708966365>
- Bozorgirad, M.A. & Logendran, R. (2013). Bi-criteria group scheduling in hybrid flowshops. *International Journal of Production Economics*, 145(2), 599-612. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.015>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Burbidge, J. L. (1975). The introduction of group technology. Heinemann.
- Cáceres-Gelvez, S. (2021). Modelo para la programación de la producción en enfoques de celdas de manufactura, integrando el diseño de plantas esbeltas, para el caso del sector de la confección de prendas de vestir [Master Thesis, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79499>
- Cáceres-Gelvez, S., Arango-Serna, M. D., & Zapata-Cortés, J. A. (2022). A conceptual framework for integrating Facility Layout and Production Scheduling in Flowshop Manufacturing Cells decisions. *Revista EIA*, 19(38). <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1543>
- Cáceres-Gelvez, S., Arango-Serna, M. D., & Zapata-Cortés, J. A. (2022). Evaluating the performance of a cellular manufacturing system proposal for the sewing department of a sportswear manufacturing company: A simulation approach. *Journal of Applied Research and Technology*, 20(1), 68–83. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.1.1335>
- Cáceres-Gelvez, S., Arango-Serna, M. D., & Zapata, J. (2023). Integrated optimisation of the unequal-area facility layout and the flowshop group scheduling problems for a case of the garment industry. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 45(2), 148-172 <https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.134352>
- Campbell, H.G., Dudek, R.A. & Smith, M.L. (1970). A heuristic algorithm for the n-job, m-machine sequencing problem. *Management Science*, 16, B630-B637. <https://doi.org/10.1287/mnsc.16.10.B630>
- Castillo, I. & Westerlund, T. (2005). An ϵ -accurate model for optimal unequal-area block layout design. *Computers and Operations Research*, 32(3), 429–447. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(03\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00246-6)

- Chen, Y.-C., & Lee, C.-E. (2001). A bottleneck-based group scheduling procedure for job-shop cells. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 18(5), 1–12. Scopus. <https://doi.org/10.1080/10170660109509499>
- Chen, Q., Xi, L. & Wang, Y. (2006). The impact of release times, lot size, and scheduling policy in an A&T facility. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29, 577-583. <https://doi.org/10.1007/BF02729111>
- Chen, D.-S., Batson, R. G., & Dang, Y. (2009). *Applied Integer Programming: Modeling and Solution*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118166000>
- Cochran J.K., Horng, S.-M. & Fowler, J.W. (2003). A multi-population genetic algorithm to solve multi-objective scheduling problems for parallel machines, *Computers & Operations Research*, 30(7), 1087-1102. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00059-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00059-X)
- Costa, A., Cappadonna, F. A., & Fichera, S. (2017). A hybrid genetic algorithm for minimizing makespan in a flow-shop sequence-dependent group scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6), 1269–1283. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1049-1>
- Cuatrecasas-Arbós, L. (2009). *Diseño avanzado de procesos y plantas de producción flexible. Técnicas de diseño y herramientas gráficas con soporte informático*. Profit.
- Cuggia-Jiménez, Cynthia, Orozco-Acosta, Erick, & Mendoza-Galvis, Darwin. (2020). Manufactura esbelta: una revisión sistemática en la industria de alimentos. *Información tecnológica*, 31(5), 163-172. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000500163>
- Delgoshaei, A., Ariffin, M. K. A. M., Leman, Z., Baharudin, B. T. H. T. B., & Gomes, C. (2016). Review of evolution of cellular manufacturing system's approaches: Material transferring models. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(1), 131–149. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0017-9>
- Demartini, M., Tonelli, F., Pacella, M., & Papadia, G. (2021). A Review of Production Planning Models: Emerging features and limitations compared to practical implementation. *Procedia CIRP*, 104, 588–593. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.099>

- Dennis, P. (2015). *Lean production simplified: A plain-language guide to the world's most powerful production system* (Third edition). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Donaghey, C. E., & Pire, V. F. (1991). Solving the facility layout problem with BLOCPLAN. *Information Management: Proceedings of Limerick University Conference*, 649–658.
- Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.04.001>
- Du, J.J., Wang, G.X., Yan, Y. & Sang, Q. (2013). Tabu search-based formation of reconfigurable manufacturing cells. *Applied Mechanics and Materials*, 397-400, 34-41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.397-400.34>
- Ebrahimi, A., Kia, R., & Komijan, A. R. (2016). Solving a mathematical model integrating unequal-area facilities layout and part scheduling in a cellular manufacturing system by a genetic algorithm. *SpringerPlus*, 5(1). Scopus. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2773-5>
- Fonseca, C.M. & Fleming, P.J. (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization In: Forrest, S. (1993) *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, 416-423, Morgan Kaufmann Publishers Inc.: San Francisco, USA.
- França, P. M., Gupta, J. N. D., Mendes, A. S., Moscato, P., & Veltink, K. J. (2005). Evolutionary algorithms for scheduling a flowshop manufacturing cell with sequence dependent family setups. *Computers and Industrial Engineering*, 48(3), 491–506. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2003.11.004>
- Frazier, G.V. (1996). An evaluation of group scheduling heuristics in a flow-line manufacturing cell. *International Journal of Production Research*, 34(4), 959-976. <https://doi.org/10.1080/00207549608904945>
- Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Carmona-Muñoz, C., Garcia-Hernandez, J. A., & Salcedo-Sanz, S. (2020). A novel Island Model based on Coral Reefs Optimization algorithm for solving the unequal area facility layout problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103445>
- Garey, M. R., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117–129. JSTOR.
- Gendreau, M., Potvin, J.-Y. (Eds.), 2009. *Handbook of Metaheuristics*, International Series in Operations Research & Management Science. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5>

- Gill, P.E., Murray, W. and Saunders, M. A. (2005) SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization. *SIAM Review* 47), pp.99-131.
- Gonçalves, J. F., & Resende, M. G. C. (2015). A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 246(1), 86–107. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.029>
- González Correa, F. (2007). MANUFACTURA ESBELTA (LEAN MANUFACTURING). PRINCIPALES HERRAMIENTAS. *Revista Panorama Administrativo*, Año 1 No. 2 enero-junio.
- Gosavi, A., 2015. *Simulation-Based Optimization: Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*, Operations Research/Computer Science Interfaces Series. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7491-4>
- Gupta, J. N. D., & Darrow, W. P. (1986). The two-machine sequence dependent flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 24(3), 439–446. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90037-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90037-8)
- Gupta, J. N. D., & Schaller, J. E. (2006). Minimizing flow time in a flow-line manufacturing cell with family setup times. *Journal of the Operational Research Society*, 57(2), 163–176. Scopus. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601971>
- Gupta, J.N.D. (1986). Flowshop schedules with sequence dependent setup times. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 29(3), 206-219.
- Hajinejad, D., Salmasi, N., & Mokhtari, R. (2011). A fast hybrid particle swarm optimization algorithm for flow shop sequence dependent group scheduling problem. *Scientia Iranica*, 18(3), 759-764. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.023>
- Ham, I., Hitomi, K., & Yoshida, T. (1985). *Group Technology: Applications to Production Management*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4976-8>
- Hamed Hendizadeh, S., ElMekkawy, T. Y., & Gary Wang, G. (2007). Bi-criteria scheduling of a flowshop manufacturing cell with sequence dependent setup times. *European Journal of Industrial Engineering*, 1(4), 391–413. Scopus.
- He, S., Yang, G., & Pan, C. (2019). Scheduling of multi-variety and small-batch motor manufacturing based on simulated annealing adaptive genetic algorithms In: *Proceedings of the 5th International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2019*, 461-467. Institute of Electrical

- and Electronics Engineers Inc. Beijing, China. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2019.8813358>
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2017). *Operations management: Sustainability and supply chain management* (Twelfth edition). Pearson.
- Helsgaun, K. (2000). An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic. *European Journal of Operational Research*, 126(1), 106-130. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00284-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00284-2)
- Heragu, S. S. (2016). *Facilities design* (Fourth edition). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Heragu, S. S., & Kusiak, A. (1991). Efficient models for the facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 53(1), 1-13. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90088-D](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90088-D)
- Hernandez-Matias, J.C., Ocampo, J.R., Hidalgo, A. & Vizan, A. (2020). Lean manufacturing and operational performance: Interrelationships between human-related lean practices. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 31 No. 2, pp. 217-235. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2019-0140>
- Hitomi, K. & Ham, I. (1976). Operations scheduling for group technology applications. *CIRP Annals*, 25, 419-422.
- Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Fakhrazad, M. B. (2018). Classification of facility layout problems: A review study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1-4), 957-977. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0895-8>
- Hou, Y. Zhao, X. Li, T. Chen, J. Li, Q. Li, Y. Zheng, Z. (2024). High capacity NP-Complete problems solver based on dual-comb asynchronous optical sampling. *Optics Communications*, Vol 550, 130021. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.130021>.
- Hutchins, D. C. (2008). *Hoshin Kanri: The strategic approach to continuous improvement*. Gower.
- Ibarra-Balderas, V.M; Ballesteros-Medina, L.L. (2017) *Manufactura Esbelta. Conciencia Tecnológica*, núm. 53, 2017
- IBM, sf. IBM ILOG CPLEX Optimizer. Disponible en: <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer> Ultima visita: 22 de febrero de 2024.
- Ibrahim, A.-M., Elmekawy, T., & Peng, Q. (2014). Robust metaheuristics for scheduling cellular flowshop with family sequence-dependent setup

- times. *Procedia CIRP*, 17, 428–433. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.072>
- Ingole, S., & Singh, D. (2021). Fixed and flexible shape facility layout problems using biogeography-based optimisation algorithm. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 37(1), 84. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2021.112469>
- Irani, S. A. (Ed.). (1999). *Handbook of cellular manufacturing systems*. Wiley.
- Jacobs, F. R., & Chase, R. B. (2018). *Operations and supply chain management (Fifteenth edition)*. McGraw-Hill Education.
- Jabbarizadeh, F., Zandieh, M. & Talebi, D. (2009). Hybrid flexible flowshops with sequence-dependent setup times and machine availability constraints. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 57, Issue 3. P.P. 949-957. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.03.012>.
- Jankovits, I., Luo, C., Anjos, M.F., Vannelli, A., 2011. A convex optimisation framework for the unequal-areas facility layout problem. *Eur J Oper Res* 214, 199–215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.04.013>
- Johnson, S. M. (1954). Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1(1), 61–68. <https://doi.org/10.1002/nav.3800010110>
- Juan, A.A., Faulin, J., Grasman, S.E., Rabe, M., Figueira, G., 2015. A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems. *Operations Research Perspectives* 2, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.03.001>
- Kang, S., & Chae, J. (2017). Harmony search for the layout design of an unequal area facility. *Expert Systems with Applications*, 79, 269–281. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.047>
- Karimi, N., Zandieh, M. & Najafi, A.A. (2011). Group scheduling in flexible flow shops: a hybridised approach of imperialist competitive algorithm and electromagnetic-like mechanism. *International Journal of Production Research*, 49(16), 4965-4977. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.481644>
- Kazemi, M., Poormoaid, S., & Eslami, G. (2012). Optimizing combination of job shop scheduling and quadratic assignment problem through multi-objective decision making approach. *Management Science Letters*, 2(6), 2011–2018. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2012.06.020>
- Keshavarz, T & Salmasi, N (2013) Makespan minimisation in flexible flowshop sequence-dependent group scheduling problem,

- International Journal of Production Research, 51:20, 6182-6193, DOI: 10.1080/00207543.2013.825055
- Keshavarz, T & Salmasi, N (2014) Efficient upper and lower bounding methods for flowshop sequence-dependent group scheduling problems. *European Journal of Industrial Engineering*, 2014 Vol.8 No.3, pp.366 – 387. DOI: 10.1504/EJIE.2014.060997
- Keshavarz, T., Salmasi, N., & Varmazyar, M. (2014). Minimizing total completion time in the flexible flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 226(1), 351–377. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1667-6>
- Keshavarz, T., Salmasi, N., & Varmazyar, M. (2019). Flowshop sequence-dependent group scheduling with minimisation of weighted earliness and tardiness. *European Journal of Industrial Engineering*, 13(1), 54–80. Scopus. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2019.097920>
- Khalfallah, M. & Lakhal, L. (2021). The impact of lean manufacturing practices on operational and financial performance: the mediating role of agile manufacturing. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 38 No. 1, pp. 147-168. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2019-0244>
- Khalid, Q. S., Arshad, M., Maqsood, S., Jahanzaib, M., Babar, A. R., Khan, I., Mumtaz, J., & Kim, S. (2019). Hybrid particle swarm algorithm for products' scheduling problem in cellular manufacturing system. *Symmetry*, 11(6). Scopus. <https://doi.org/10.3390/sym11060729>
- Kikolski, M., & Ko, C.-H. (2018). Facility layout design—Review of current research directions. *Engineering Management in Production and Services*, 10(3), 70–79. Scopus. <https://doi.org/10.2478/emj-2018-0018>
- Konak, A., Kulturel-Konak, S., Norman, B.A., Smith, A.E., 2006. A new mixed integer programming formulation for facility layout design using flexible bays. *Oper Res Lett* 34, 660–672. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2005.09.009>
- Koopmans, T. C., & Beckmann, M. (1957). Assignment Problems and the Location of Economic Activities. *Econometrica*, 25(1), 53. <https://doi.org/10.2307/1907742>
- Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2013). Linear programming based genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 51(14), 4302–4324. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.774481>

- Kundu, A., & Dan, P. K. (2012). Metaheuristic in facility layout problems: Current trend and future direction. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(2), 238. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2012.045182>
- Kuşakci, A. O., & Cesur, E. K. (2020). Retailer layout design: A novel hybrid approach with association rules mining and MCRAFT. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 35(4), 389. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2020.108545>
- Kusiak, A., & Heragu, S. S. (1987). The facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 29(3), 229–251. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(87\)90238-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(87)90238-4)
- Lin, S.-W., & Ying, K.-C. (2012). Scheduling a bi-criteria flowshop manufacturing cell with sequence-dependent family setup times. *European Journal of Industrial Engineering*, 6(4), 474–496. Scopus. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2012.047666>
- Lin, S.-W., & Ying, K.-C. (2019). Makespan optimization in a no-wait flowline manufacturing cell with sequence-dependent family setup times. *Computers and Industrial Engineering*, 128, 1–7. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.025>
- Lin, S.-W., Ying, K.-C., & Lee, Z.-J. (2009). Metaheuristics for scheduling a non-permutation flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *Computers and Operations Research*, 36(4), 1110–1121. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.010>
- Liou, C.-D., & Hsieh, Y.-C. (2015). A hybrid algorithm for the multi-stage flow shop group scheduling with sequence-dependent setup and transportation times. *International Journal of Production Economics*, 170, 258–267. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.10.002>
- Liou, C.-D., & Liu, C.-H. (2010). A novel encoding scheme of PSO for two-machine group scheduling: Vol. 6145 LNCS (Peking University; Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Trad.; Número PART 1). Scopus. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77954654783&doi=10.1007%2f978-3-642-13495-1_16&partnerID=40&md5=0e674d343a46e28493891c85f274d416
- Liou, C.-D., Hsieh, Y.-C., & Chen, Y.-Y. (2013). A new encoding scheme-based hybrid algorithm for minimising two-machine flow-shop group scheduling problem. *International Journal of Systems Science*, 44(1), 77–93. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00207721.2011.581396>
- Logendran, R. & Nudtasomboon, N. (1991). Minimizing the makespan of a group scheduling problem: a new heuristic. *International Journal of Production*

- Economics, Volume 22, Issue 3, P.p. 217-230, [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(91\)90098-E](https://doi.org/10.1016/0925-5273(91)90098-E).
- Logendran, R., Carson, S., & Hanson, E. (2005). Group scheduling in flexible flow shops. *International Journal of Production Economics*, 96(2), 143–155. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.03.011>
- Logendran, R., Deszoeke, P. & Barnard, F. (2006). Sequence-dependent group scheduling problems in flexible flow shops. *International Journal of Production Economics*, Volume 102, Issue 1.P.P. 66-86. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.02.006>.
- Logendran, R., Salmasi, N., & Sriskandarajah, C. (2006). Two-machine group scheduling problems in discrete parts manufacturing with sequence-dependent setups. *Computers and Operations Research*, 33(1), 158–180. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.004>
- Lu, D., & Logendran, R. (2013). Bi-criteria group scheduling with sequence-dependent setup time in a flow shop. *Journal of the Operational Research Society*, 64(4), 530–546. Scopus. <https://doi.org/10.1057/jors.2012.61>
- Madariaga Neto, F. (2013). *Lean manufacturing: Exposición adaptada a la fabricación repetitiva de familias de productos mediante procesos discretos* (Primera edición). Bubok Publishing S.L.
- Maggu, P. L., & Das, G. (1980). On $2 \times n$ sequencing problem with transportation times of jobs. *Pure & Applied Matematika Sciences*, 12.
- Mahmoodi & Martin, 1997), Mahmoodi, F. & Martin, G.E. (1997) A newshop-based and predictive scheduling heuristic for cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 35:2. P.p. 313-326. DOI: 10.1080/002075497195777
- Maniezzo, V., Stützle, T., Voß, S. (Eds.), 2010. *Matheuristics: Hybridizing Metaheuristics and Mathematical Programming*, *Annals of Information Systems*. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1306-7>
- Martínez-Costa, C., Mas-Machuca, M., Benedito, E., & Corominas, A. (2014). A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 153, 66–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.03.011>
- Meller, R. D., & Gau, K.-Y. (1996). The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), 351–366. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(96\)84198-7](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)84198-7)

- Meller, R. D., Narayanan, V., & Vance, P. H. (1998). Optimal facility layout design. *Operations Research Letters*, 23(3-5), 117-127. [https://doi.org/10.1016/S0167-6377\(98\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6377(98)00024-8)
- Mohtashami, A., Alinezhad, A., & Niknamfar, A. H. (2020). A fuzzy multi-objective model for a cellular manufacturing system with layout designing in a dynamic condition. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 34(4), 514-543. Scopus. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2020.106086>
- Moslemipour, G., Lee, T. S., & Loong, Y. T. (2018). Solving stochastic dynamic facility layout problems using proposed hybrid AC-CS-SA meta-heuristic algorithm. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 28(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2018.088561>
- Muther, R., & Hales, L. (2015). *Systematic Layout Planning. A total system of layout planning (fourth edition)*. Management & Industrial Research Publications.
- Muther, R. (1973). *Systematic layout planning (2d ed. [rev. and enl.]*). Cahners Books.
- Naderi, B. & Azab, A. (2015). Modeling and scheduling a flexible manufacturing cell with parallel processing capability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 11. P.P 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.05.006>.
- Naderi, B., & Salmasi, N. (2012). Permutation flowshops in group scheduling with sequence-dependent setup times. *European Journal of Industrial Engineering*, 6(2), 177-198. Scopus. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2012.045604>
- Nagarajan, L., Mahalingam, S. K., Kandasamy, J., & Gurusamy, S. (2020). Application of artificial immune system algorithm for simultaneous minimisation of multiple objectives in single row facility layout problems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 36(1), 49. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2020.109119>
- Nahmias, S., & Olsen, T. L. (2015). *Production and operations analysis: Strategy, quality, analytics, application (Seventh edition)*. Waveland Press, Inc.
- Nawaz, M. & Emory Ensore, E. & Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega*, Volume 11, Issue 1. P.P. 91-95. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(83\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90088-9).
- Neufeld, J. S., Gupta, J. N. D., & Buscher, U. (2016). A comprehensive review of flowshop group scheduling literature. *Computers & Operations Research*, 70, 56-74. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.12.006>
- Nomden, G., Slomp, J. & Suresh, N.C. Virtual manufacturing cells: A taxonomy of past research and identification of future research issues. *Int J Flex Manuf Syst* 17, 71-92 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10696-006-8122-1>

- Paes, F. G., Pessoa, A. A., & Vidal, T. (2017). A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the Unequal Area Facility Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 742–756. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.022>
- Palominos, P., Pertuzé, D., Quezada, L., & Sanchez, L. (2019). An Extension of the Systematic Layout Planning System Using QFD: Its Application to Service Oriented Physical Distribution. *Engineering Management Journal*, 31(4), 284–302. <https://doi.org/10.1080/10429247.2019.1651444>
- Papaioannou, G., & Wilson, J. M. (2010). The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European Journal of Operational Research*, 206(3), 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.020>
- Park, K. S., & Han, S. W. (2002). Performance obstacles in cellular manufacturing implementation-empirical investigation. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 12(1), 17–29. Scopus. <https://doi.org/10.1002/hfm.10000>
- Petrov, V.A. (1968). *Flowline group production planning*. Light production engineering books. Business Publications: London.
- Pimentel, C., Martins, S., & Matias, J. (2019). Job shop production system to a manufacturing cellular system: An action research study. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 32(3), 267. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2019.101114>
- Pinedo, M. L. (2022). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05921-6>
- Puerto, J., Ricca, F., & Scozzari, A. (2018). Extensive facility location problems on networks: An updated review. *TOP*, 26(2), 187–226. <https://doi.org/10.1007/s11750-018-0476-5>
- Qin, H., Zhang, Z.-H., & Bai, D. (2016). Permutation flowshop group scheduling with position-based learning effect. *Computers and Industrial Engineering*, 92, 1–15. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.001>
- Rajendran, C. & Chaudhuri, D. (1992) An efficient heuristic approach to the scheduling of jobs in a flowshop. *European Journal of Operational Research*, Volume 61, Issue 3. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90361-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90361-C).
- Rajendran, C. (1993) Heuristic algorithm for scheduling in a flowshop to minimize total flowtime. *International Journal of Production Economics*, Volume 29, Issue 1. P.P. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(93\)90024-F](https://doi.org/10.1016/0925-5273(93)90024-F).

- Reddy, V. & Narendran, T. T. (2003) Heuristics and sequence-dependent set-up jobs in flow line cells. *International Journal of Production Research*, 41:1. Pp. 193-206. DOI: 10.1080/00207540210163973
- Reed, R. (1961). *Plant Layout: Factors, Principles, and Techniques*. R.D. Irwin. <https://books.google.com.co/books?id=POdTAAAMAAJ>
- Renna, P. (2011) Multi-agent based scheduling in manufacturing cells in a dynamic environment. *International Journal of Production Research*, 49:5, 1285-1301. DOI: 10.1080/00207543.2010.518736
- Ripon, K. S. N., & Torresen, J. (2014). Integrated job shop scheduling and layout planning: A hybrid evolutionary method for optimizing multiple objectives. *Evolving Systems*, 5(2), 121–132. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12530-013-9092-7>
- Ripon, K. S. N., Glette, K., Hovin, M., & Torresen, J. (2012). Job shop scheduling with transportation delays and layout planning in manufacturing systems: A multi-objective evolutionary approach. En *Cent. P. Anal. Mach. Intell. (CPAMI)*; Univ. W. Association for Image and Machine Intelligence (AIMI); Fac. Eng. Univ. Porto (FEUP) Dep. Electr. Comput. Eng.; Instituto de Engenharia Biomedica (INEB); Univ. Waterloo Dep. Electr. Comput. Eng. (Trad.), *Lect. Notes Comput. Sci.: Vol. 7326 LNAI* (p. 219). Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31368-4_25
- Romero-Duque, G.A; Mejía-Moncayo, C.; Torres Martínez, J.A. (2015) Modelos matemáticos para la definición del layout de las celdas de manufactura. *Revisión de literature. Tecnura*, Vol. 19 No. 46. pp. 135-147. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a03>
- Rother, M., & Shook, J. (2009). *Learning to see: Value-stream mapping to create value and eliminate muda* (Version 1.4). Lean Enterprise Inst.
- Salmasi, N., Logendran, R., & Skandari, M. R. (2011). Makespan minimization of a flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(5–8), 699–710. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3206-9>
- Salmasi, N., Logendran, R., & Skandari, M. R. (2010). Total flow time minimization in a flowshop sequence-dependent group scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 37(1), 199–212. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.04.013>
- Saravanan, M., & Noorul Haq, A. (2008). A scatter search method to minimise makespan of cell scheduling problem. *International Journal of Agile*

- Systems and Management, 3(1-2), 18-36. Scopus. <https://doi.org/10.1504/IJASM.2008.019597>
- Schaller, J. E. (2001). A new lower bound for the flow shop group scheduling problem. *Computers and Industrial Engineering*, 41(2), 151-161. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(01\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00049-3)
- Schaller, J. E., Gupta, J. N. D., & Vakharia, A. J. (2000). Scheduling a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *European Journal of Operational Research*, 125(2), 324-339. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00387-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00387-2)
- Selim, H. M., Askin, R. G., & Vakharia, A. J. (1998). Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, 34(1), 3-20. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00147-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00147-2)
- Shahvari, O., Salmasi, N., Logendran, R. & Abbasi, B. (2012) An efficient tabu search algorithm for flexible flow shop sequence-dependent group scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 50:15. P.P. 4237-4254, DOI: 10.1080/00207543.2011.604051
- Singh N. (1996). *Systems approach to computer-integrated design and*. New York, John Wiley, 643.
- Singh, S. P., & Sharma, R. R. K. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5-6), 425-433. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0087-9>
- Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2007). *Introduction to genetic algorithms*. Springer.
- Socconini, L. (2009). "Lean manufacturing" paso a paso. Grupo Editorial Norma.
- Stephens, M. P., & Meyers, F. E. (2013). *Manufacturing facilities design and material handling* (Fifth edition). Purdue University Press.
- Egilmez, G. Erenay, B. & Süer, G.A. (2014). Stochastic skill-based manpower allocation in a cellular manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 33, Issue 4. P.P. 578-588. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.05.005>.
- Sule, D. R. (2008). *Manufacturing facilities: Location, planning, and design* (Third edition). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781420044232>

- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: From design to implementation*. John Wiley & Sons.
- Tam, K. Y. (1992). A simulated annealing algorithm for allocating space to manufacturing cells. *International Journal of Production Research*, 30(1), 63–87. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00207549208942878>
- Tang, J., Wang, X., Kaku, I., & Yung, K.-L. (2010). Optimization of parts scheduling in multiple cells considering intercell move using scatter search approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(4), 525–537. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0236-8>
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Khorrami, A., & Gholipour-Kanani, Y. (2010). Design of a scatter search method for a novel multi-criteria group scheduling problem in a cellular manufacturing system. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2661–2669. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.08.012>
- Tennant, C., & Roberts, P. (2001). Hoshin Kanri: Implementing the Catchball Process. *Long Range Planning*, 34(3), 287–308. [https://doi.org/10.1016/S0024-6301\(01\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0024-6301(01)00039-5)
- The Optimization Firm, sf. BARON Solver. Disponible en: <https://www.minlp.com/baron-solver> Ultima visita: 22 de febrero de 2024.
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., Solorio Gómez, P., Haaz Díaz, G., & Servantes González, S. R. (2011). *Planeación de instalaciones*. Cengage Learning.
- Ulutas, B. H., & Kulturel-Konak, S. (2012). An artificial immune system based algorithm to solve unequal area facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 39(5), 5384–5395. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.046>
- Wemmerlöv, U., & Hyer, N. L. (1989). Cellular manufacturing in the U.S. industry: A survey of users. *International Journal of Production Research*, 27(9), 1511–1530. <https://doi.org/10.1080/00207548908942637>
- van Camp, D. J., Carter, M. W., & Vannelli, A. (1992). A nonlinear optimization approach for solving facility layout problems. *European Journal of Operational Research*, 57(2), 174–189. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90041-7](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90041-7)
- Venkataramanaiah, S. (2008). Scheduling in cellular manufacturing systems: An heuristic approach. *International Journal of Production Research*, 46(2), 429–449. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00207540601138577>

- Wang, K.-J., & Chen, K.-H. (2008). An integrated facility-design model for the generator-manufacturing industry. *Production Planning and Control*, 19(5), 475–485. Scopus. <https://doi.org/10.1080/09537280802088659>
- Wemmerlöv, U., & Hyer, N. L. (1989). Cellular manufacturing in the U.S. industry: A survey of users. *International Journal of Production Research*, 27(9), 1511–1530. <https://doi.org/10.1080/00207548908942637>
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The machine that changed the world: The story of lean production ; Toyota's secret weapon in the global car wars that is revolutionizing world industry* (1. pb. ed). Free Press.
- Wu, X., Chu, C.-H., Wang, Y., & Yan, W. (2007). A genetic algorithm for cellular manufacturing design and layout. *European Journal of Operational Research*, 181(1), 156–167. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.05.035>
- Xiao, X., Hu, Y., Wang, W., & Ren, W. (2019). A robust optimization approach for unequal-area dynamic facility layout with demand uncertainty. En Butala P., Govekar E., & Vrabic R. (Eds.), *Procedia CIRP* (Vol. 81, pp. 594–599). Elsevier B.V.; Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.161>
- He, X., Pan, Q.-P. Gao, L. & Neufeld, J.-S. (2023) An asymmetric traveling salesman problem based matheuristic algorithm for flowshop group scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 310, Issue 2. P.P. 597-610. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.038>.
- He, X., Liu, Y.-F., Pan, Q.-K., Yu, Y., & Li, Y.-Z. (2021). A Novel Constructive Heuristic for Flowshop Group Scheduling Problems to Minimize Total Flow Time In: *Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE: Shanghai, China. <https://doi.org/10.23919/CCC52363.2021.9549650>
- Yan, H.-S. & Li, W.-C. (2017). A multi-objective scheduling algorithm with self-evolutionary feature for job-shop-like knowledgeable manufacturing cell. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 337-351. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0981-9>
- Yang, D.-L., & Chern, M.-S. (2000). Two-machine flowshop group scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 27(10), 975–985. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(99\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(99)00070-2)
- Yang, T., Su, C., & Hsu, Y. (2000). Systematic layout planning: A study on semiconductor wafer fabrication facilities. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(11), 1359–1371. <https://doi.org/10.1108/01443570010348299>

- Yazdani Sabouni, M. T., & Logendran, R. (2013). Carryover sequence-dependent group scheduling with the integration of internal and external setup times. *European Journal of Operational Research*, 224(1), 8–22. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.013>
- Yazdani Sabouni, M. T., & Logendran, R. (2018). Lower bound development in a flow shop electronic assembly problem with carryover sequence-dependent setup time. *Computers and Industrial Engineering*, 122, 149–160. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.033>
- Yin, Y., & Yasuda, K. (2006). Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A taxonomy and review. *International Journal of Production Economics*, 101(2), 329–352. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.01.014>
- Ying, K.-C., Lee, Z.-J., Lu, C.-C., & Lin, S.-W. (2012). Metaheuristics for scheduling a no-wait flowshop manufacturing cell with sequence-dependent family setups. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5–8), 671–682. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3419-y>
- Ying, K.-C., Gupta, J. N. D., Lin, S.-W., & Lee, Z.-J. (2010). Permutation and non-permutation schedules for the flowline manufacturing cell with sequence dependent family setups. *International Journal of Production Research*, 48(8), 2169–2184. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00207540802534707>
- Yoshida, T., Nakamura, N., & Hitomi, K. (1973). A study of production scheduling: optimization of group scheduling on a single production stage. *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers*, 39 (322), 1993–2003
- Zandieh, M. & Hashemi, A.R. (2015). Group scheduling in hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times and random breakdowns via integrating genetic algorithm and simulation. *International Journal of Industrial and Systems Engineering (IJISE)*, Vol. 21, No. 3. pp.377 – 394. DOI: 10.1504/IJISE.2015.072273
- Zandieh, M. & Karimi, N. (2011) An adaptive multi-population genetic algorithm to solve the multi-objective group scheduling problem in hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times. *J Intell Manuf* 22, 979–989. <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0374-7>

A NEXO A

LISTADO DE SOFTWARE RELACIONADO CON LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTAS

■ Arena®

Software de simulación de eventos discretos y de automatización de propiedad de Rockwell Automation que permite la definición de modelos a través de representación de procesos y lógica.

Página web: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>

■ AutoCAD®

Software de diseño asistido por computador (Computer-aided design, CAD) de propiedad de Autodesk, que permite la definición de un plano de planta al detalle, que permite la incorporación de otros elementos de la instalación, como los diseños arquitectónicos, estructurales, eléctricos, entre otros. Adicionalmente, el diseño en planta de AutoCAD puede integrarse a software de simulación que incorporen elementos de visualización 3D.

Página web: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>

■ BARON

Software de optimización matemática que utiliza el algoritmo branch-and-reduce para solucionar problemas de programación matemática lineal y no lineal.

Página web: <https://www.minlp.com/baron-solver>

■ IBM ILOG CPLEX

Software utilizado para el modelamiento y optimización de modelos de programación matemática desarrollado y adquirido por la empresa de tecnología IBM. CPLEX permite solucionar problemas de programación entera, grandes problemas de programación lineal y problemas de programación convexa y no convexa.

Página web: <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>

■ KNITRO (Nonlinear Interior Point Trust Region Optimization)

Software de optimización de problemas de programación matemática no lineal de gran escala.

Página web: <https://www.artelys.com/solvers/knitro/>

■ Lumion®

Software de renderizado 3D que permite visualizar los elementos arquitectónicos de una instalación a partir de la renderización de un diseño CAD previamente desarrollado.

Página web: <https://lumion.com/>

■ Simio®

Software de simulación 3D que permite el modelamiento de sistemas complejos a través de una interfaz visual y el uso de objetos inteligentes. Simio® soporta tanto sistemas discretos como continuos, así como aplicaciones de modelamiento basado en agentes.

Página web: <https://www.simio.com/>

■ SketchUp®

Software de diseño asistido por computador, CAD, de propiedad de Trimble Inc., utilizado para la definición de un plano de planta al detalle y otros elementos de visualización 3D de la instalación.

Página web: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>

■ SNOPT (Sparse Nonlinear OPTimizer)

Software de optimización utilizado para la solución de problemas no-lineales de gran escala. El software emplea un algoritmo de programación cuadrática secuencial que es especialmente efectivo para problemas no lineales con funciones y gradientes costosos de evaluar.

Página web: <https://ccom.ucsd.edu/~optimizers/solvers/snopt/>

Coautores

Martín Darío Arango-Serna

Ingeniero Industrial, Especialista en Finanzas, Formulación y Evaluación de Proyectos por la Universidad de Antioquia, Especialista en Docencia Universitaria por la Universidad Politécnica de Valencia (España), Magister en Ingeniería de Sistemas por la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín), Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Valencia (España). Profesor Titular en Dedicación Exclusiva adscrito al Departamento de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Investigador Senior según clasificación Colciencias. Director del Grupo de I+D+i Logística Industrial- Organizacional “GICO”. Email : mdarango@unal.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8448-8231>.

Julián Andrés Zapata Cortes

Ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Magíster en Ingeniería administrativa de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Doctor en ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín y especialista en Educación Superior de la Universidad Pinar del Rio - Cuba. Actualmente es Profesor de tiempo completo de la fundación Universitaria CEIPA y coordinador de los programas de especialización en Gerencia Logística y Especialización en Gestión de Servicios. Líneas de investigación son: logística, administración de cadena de suministros, optimización, investigación de operaciones y gestión de procesos y operaciones. Correo electrónico: julian.zapata@ceipa.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1270-3577>

Sebastián Eduardo Cáceres-Gelvez

Ingeniero Industrial de la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), Especialista en Gerencia de Sistemas Integrados de Gestión de la Universidad de Santander (UDES), Magister en Ingeniería Industrial en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Actualmente, candidato al título de PhD en Management Science de Lancaster University en el Reino Unido. Investigador vinculado al Grupo de Investigación EUREKA de Ingeniería Industrial UDES. Líneas de investigación son: administración de producción y operaciones, la optimización, simulación industrial y las aplicaciones de inteligencia artificial. email: s.caceresgelvez@lancaster.ac.uk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9131-2135>

***Sistemas prácticos para el diseño del layout de plantas industriales
con celdas de manufactura***

es una publicación creada por el Grupo de I+D+i Logística Industrial-Organizacional "GICO", del Departamento de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

Editado por el Centro Editorial de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

El texto está compuesto de caracteres Ancizar Sans Ligth 12 puntos, se utilizó para su edición y diagramación Adobe In Desing y Acrobat DC, su tamaño digital es de 5 Mb.

La versión digital está en formato PDF, publicada en acceso abierto en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia

<https://repositorio.unal.edu.co/>

y en la página Web de la Facultad de Minas

<https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial>

El libro se terminó de editar en Todográficas Ltda.
Medellín, octubre de 2024.

