

Tabla de contenido

Resumen	3
Introducción	4
Objetivos	5
General.....	5
Especificos	5
Metodología	6
1. Marco teórico para las decisiones de <i>Scheduling</i>	7
1.1 Terminología y generalidades de los talleres de Trabajo con <i>Scheduling</i>	7
1.2 Enfoque jerárquico de la gestión de operaciones.....	10
1.2.1 Nivel estratégico.....	11
1.2.2 Nivel táctico.....	12
1.2.3 Nivel Operativo.....	13
1.3 Decisiones de <i>Scheduling</i>	15
1.3.1 Secuenciación y asignación	16
1.3.2 Clasificación de los problemas de <i>Scheduling</i>	17
1.3.3 Clasificación de configuraciones productivas.....	19
1.3.4 Solución de problemas de <i>Scheduling</i> y algoritmos.....	20
1.4 Representación de configuraciones con decisiones de <i>Scheduling</i>	22
1.4.1 Configuración Flow Shop.....	23
1.4.2 Configuración Job-shop.....	25
1.5 Consideraciones adicionales en problemas de <i>Scheduling</i>	27
1.5.1 Flexibilidad del problema de <i>Scheduling</i>	28
1.5.2 Tiempos de alistamientos	30
1.5.3 Rutas lineales y no lineales.....	33
1.5.4 Otras consideraciones	35
1.6 Complejidad en la optimización de criterios.....	36
2. Casos empíricos basados en las decisiones de <i>Scheduling</i>	38
2.1 Criterios de optimización con referentes.....	38
2.2 Casos de empresas manufactureras	41
2.3 Consideraciones de éxito para las decisiones de <i>Scheduling</i>	43
3. Modelo de gestión de la producción en el sub-sector metalmeccánico	46

3.1 Generalidades del Sub-sector metalmecánico en Colombia.	46
3.2 Sub-sector metalmecánico en el Tolima	50
3.3 Descripción del nivel tecnológico.....	52
3.4 Problemas de las empresas para la gestión de la producción	55
3.5 Consideraciones para la formulación de políticas	58
3.6 Metalmecánica SOTO un caso de referencia	58
Conclusiones	60
Referencias Bibliográficas	61

Resumen

La presente investigación responde al interés en conocer las decisiones de la programación de la producción (*Scheduling*) en los talleres de metalmecánica. El *Scheduling* es una de las principales funciones dentro de una organización, la cual se ocupa de forma íntegra, en optimizar el proceso productivo. Como es de suponerse, estas decisiones son tomadas siguiendo varios criterios relevantes del taller como el tipo de sistema productivo y el diseño del mismo. Estas decisiones son tomadas en los distintos niveles jerárquicos de las organizaciones, respondiendo a las necesidades de su gestión y orientados a los objetivos de la organización.

El primer capítulo constituye el marco teórico de la investigación, terminología, configuraciones productivas, los problemas de *Scheduling* más comunes y las técnicas regulares de solución encontradas en la literatura. En adición a esto, se presentan consideraciones relevantes al momento de la toma de decisiones. En el segundo capítulo, se logra ejemplarizar casos referentes de *Scheduling* en empresas manufactureras junto a las actividades desarrolladas por estas organizaciones para lograr tal éxito en sus procesos. En el último capítulo de la asistencia, se hace referencia al modelo de gestión de la producción en el sector metalmecánico, haciendo énfasis en el departamento del Tolima. En este apartado, se describe el nivel tecnológico de las empresas del sector, los problemas más comunes en la implementación de *Scheduling* a sus procesos y la construcción de políticas de producción. Adicionalmente, se referencia una empresa metalmecánica de Ibagué la cual proporciona información de interés a la investigación.

Introducción

La producción como pilar competitivo es de suma importancia en las organizaciones de manufactura, debido a su propósito en la optimización de variables de interés como la reducción de costos y la eficiencia de recursos, los cuales son dependientes de la programación de la producción o *scheduling*. La toma de decisiones asociadas a este concepto por parte de los distintos niveles jerárquicos de una empresa, constituye una gran responsabilidad para el alcance de los objetivos propuestos por la dirección.

El objetivo de la asistencia de investigación es contribuir a un marco teórico para las decisiones de *scheduling* en empresas manufactureras, específicamente del sector metalmeccánico. Durante décadas, numerosas investigaciones se han publicado en la literatura de la programación de operaciones realizando interesantes aportes a los estudiosos del tema. Sin embargo, su complejidad y la falta de personal capacitado en este campo es una restricción que obstaculiza su ejecución en las organizaciones.

Abordar de manera completa temas que están bajo constante investigación es un gran reto, este es el caso de las decisiones de *scheduling*. En consecuencia, el desarrollo de este estado del arte está segmentado en tres capítulos, los cuales constituyen gran información de relevancia y de interés a la programación de la producción y las posibles decisiones que se deben tomar en cada uno de los niveles jerárquicos. El primer capítulo recopila todo el marco conceptual de las decisiones de *scheduling*. Es decir, la terminología usada en los talleres de trabajo, los sistemas de información de apoyo para la toma de decisiones, los tipos de configuraciones productivas y otras variables relevantes en el campo del procesamiento de pedidos. En el segundo capítulo, se caracterizan casos de empresas manufactureras, las cuales implementaron con éxito las decisiones de *scheduling* en sus procesos. En este espacio, se mencionan referentes como la optimización paretiana, el tiempo de alistamiento y cargue de las máquinas. Luego, se habla sobre el sector metalmeccánico y su posicionamiento a nivel país y en el departamento del Tolima, la cual es información brindada por la cámara de comercio y empresarios de sectores metalmeccánicos y afines. También, se referencian los principales inconvenientes registrados en las empresas para la implementación de la gestión de la producción. Por último, se expone un caso de referencia de una empresa del sector metalmeccánico ubicada en la ciudad de Ibagué, con sistemas automatizados y procesos marcados, cuyo objeto social es el desarrollo, producción y distribución de maquinaria agrícola a base de productos de metal y hierro.

Objetivos

General

- ❖ Construir un estado del arte sobre las decisiones de *Scheduling* que contribuyan al desarrollo de la planeación, programación y control de la producción en el sector metalmecánico.

Específicos

- ❖ Construir un marco teórico sobre las decisiones de *Scheduling* que inciden en la planeación, programación y control de la producción en el sector metalmecánico.
- ❖ Caracterizar casos empíricos referenciados en la literatura científica relacionados con las decisiones de *Scheduling* para la planeación, programación y control de la producción.
- ❖ Identificar los aspectos relevantes de las decisiones de *Scheduling* que contribuyen a la planeación, programación y control de la producción en el sub-sector metalmecánico.

Metodología

Para la búsqueda y consolidación de los artículos para la construcción de la investigación, se optó por realizar un recorrido teórico y epistemológico por diferentes bases de datos en busca de artículos científicos e investigativos relacionados a las decisiones de *Scheduling*. Esto permitió seleccionar los artículos más relevantes para su posterior lectura tomando así, información precisa para la construcción de la investigación. Como resultado, más de 40 artículos y trabajos investigativos relacionados con el tema fueron analizados y citados en el documento, junto a casos aplicados en la industria manufacturera en países de latinoamérica.

1. Marco teórico para las decisiones de *Scheduling*

La complejidad de encontrar definiciones claras de los conceptos relacionados a las variables, unidades de medición y a las máquinas, se hace presente al estudiar la programación de tareas en la administración de operaciones. No obstante, durante décadas el *Scheduling* ha sido objeto de estudio por numerosos investigadores, los cuales han logrado suministrar a las nuevas generaciones información precisa e importante.

Este primer capítulo, el cual comprende gran parte de la información del documento, sintetiza el marco conceptual de los ambientes de *Scheduling* en los talleres de trabajo. En este sentido, esta sección describe la terminología vinculada al problema de *Scheduling* como: Los ambientes presentes en un taller de trabajo y la nomenclatura asociada, el nivel jerárquico de decisión para la administración de operaciones, definición y complejidad del problema, las configuraciones productivas más comunes en los talleres de metalmecánica, variables de análisis y medición, los criterios más comunes a optimizar por un *Scheduler*, los tiempos alistamiento de los productos para su procesamiento en el taller y algunos criterios de flexibilidad para el problema de *Scheduling*.

1.1 Terminología y generalidades de los talleres de Trabajo con *Scheduling*

Al comenzar el análisis de un problema de *Scheduling*, Salto (2000) indica que lo principal es saber que el número de máquinas es finito. Algunos autores denotan el número de tareas o actividades a realizar por la letra n , el número de máquinas con m . A su vez, el subíndice j hace denotar a un trabajo mientras que el subíndice i a una máquina. De esta forma, si una tarea necesita ser realizada mediante varios pasos u operaciones entonces (i,j) indica el procesamiento del trabajo j sobre la máquina i . Así mismo, Salto (2000) referencia los criterios más utilizados en un taller de trabajo, el cual son señalados a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Notaciones de una tarea a procesar en un taller de trabajo *Scheduling*

DATOS	DEFINICIÓN
Tiempo de Procesamiento (P_{ij})	Tiempo de procesamiento del trabajo que se está realizando en una determinada máquina del taller. La i en el subíndice se puede omitir si el trabajo que se va a desarrollar solo depende de una máquina en específico.
Fecha de release (R_j)	Denominado como el tiempo más pronto en que un trabajo es arribado al sistema. Es decir, es el tiempo más pronto para el inicio de un trabajo.
Fecha de finalización (d_j)	Fecha de terminación, de embarque o carga. Es la fecha en la cual se propone al cliente tener su producto terminado para entregarle.

Peso (W_j)

Es un factor de prioridad, indicando la importancia relativa del trabajo frente a los demás que se estén procesando en el taller de trabajo.

Makespan (C_{max}):

Tiempo de finalización máximo de los trabajos procesados en el sistema. Este tiempo finaliza cuando el trabajo sale del sistema. (Bürgey & Bülbül, 2018).

Fuente: Tomado y adaptado de Salto (2000)

Las decisiones de *scheduling* en la escala operativa de una organización, atiende tres campos de problemas definidos. El campo α , β y γ . Salto (2000) Explica el *campo α* como el ambiente de máquina y contiene una única entrada. *El campo β* provee los detalles relevantes de las actividades de procesamiento y restricciones. En este campo es posible tener una o múltiples entradas o no tener ninguna entrada. Por último, *el campo γ* identifica el objeto que se quiere ser minimizado.

La Tabla 2 detalla las características del **campo α** de los problemas de *scheduling* presentados en un taller de trabajo.

Tabla 2 características de un campo α de un problema de Scheduling

Características	Definición
Maquina única (1)	Es el caso más simple y es el caso especial de todos los demás ambientes de las maquinas.
Maquinas idénticas en paralelo (Pm)	Existe cierta cantidad de máquinas en paralelo. En particular, una determinada actividad necesita una única operación y se puede procesar en cualquier maquina o sobre alguna de un conjunto ya dado.
Maquinas en paralelo con diferentes velocidades	Hay cierta cantidad de máquinas con distintas velocidades. V_i indica la velocidad de la maquina i . Se tienen diferentes variables en esta característica; Tiempo de permanencia de una tarea en cierta máquina, cuya simbología es p_j/v_i . Este ambiente se conoce como maquinas uniformes.
Máquinas no relacionadas en paralelo	Existen m maquinas diferentes en paralelo. La máquina i puede procesar la tarea a determinada velocidad. El tiempo de permanencia p_{ij} de la tarea j sobre la maquina i es p_j/v_{ij} , asumiendo que solo se procesa sobre la maquina i .
Flow Shop	Hay m número de máquinas en el taller de trabajo. Cada trabajo se procesa en cada una de estas máquinas. Todos los trabajos se tienen la misma trayectoria, es decir, deben seguir la misma secuencia. “ <i>primero en entrar primero en salir</i> ”
Flexible Flow Shop	Es una generalidad del Flow Shop y del ambiente de máquinas paralelas. En lugar de m maquinas en serie, existe s etapas con una determinada cantidad de máquinas paralelas. Cada trabajo j requiere solo una máquina y cada máquina puede procesar cualquier trabajo.

Open Shop

Se cuenta con m máquinas y n trabajos o Jobs. Cada trabajo se debe procesar en cada una de las m máquinas. Algunos de los tiempos de procesamiento pueden ser $=0$. De esta forma, el *Scheduler* puede decidir la ruta de trabajo para cada tarea a realizar. Diferentes tareas pueden tener diferentes rutas.

Job Shop

Hay m máquinas y n trabajos. Cada trabajo ya tiene predeterminada su ruta.

Fuente: Tomado y adaptado de Salto (2000)

Así mismo, el **campo β** cuenta con diferentes características en los problemas de *Scheduling* en un taller de trabajo o de programación. Para este ambiente, las restricciones de procesamiento pueden incluir múltiples entradas u órdenes de trabajo. Las entradas en el proceso son representadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Restricciones de procesamiento en β

Entradas	Definición
Release time (Rj)	En esta entrada y en el campo β , si ese símbolo está presente, significa la restricción de no comenzar sin su release date r_j . De lo contrario, si no se encuentra este símbolo en β , sugiere que puede comenzar en cualquier momento.
Tiempos de setup dependientes de la secuencia (Sjk)	Representa el tiempo de setup dependiente de alguna secuencia de trabajos que se esté presentando en el taller. $S0k$ indica el tiempo de setup para el primer trabajo de la secuencia y $sj0$ hace referencia al clean-up luego del trabajo si éste es el último de la secuencia hablada.
Restricciones de precedencia (Prec)	Las restricciones de procedencia pueden aparecer en cualquier ambiente de máquinas (paralelas o únicas), restringiendo el paso de algún trabajo sin que se haya cumplido uno anterior.
Permutaciones (Prmu)	Una restricción que puede aparecer en el ambiente Flow shop es que la cola de cada máquina trabaje respetando la disciplina FIFO. Esto implica que el orden (o permutación) en la cual se asignan los trabajos a la primer máquina se debe respetar en todas las demás.
Recirculación (Recrc)	Puede presentarse en patrones de flujo Job shop, donde un trabajo puede visitar más de una vez la misma máquina.

Fuente: Tomado y adaptado de Salto (2000)

Por último, el **campo γ** se ocupa de minimizar una función de tiempos de finalización de los trabajos. El tiempo de finalización de una tarea que se esté procesando en una maquina i se denota como C_{ij} . El tiempo en el que un trabajo sale del sistema o del proceso se ve como C_j y d_j es definido como el tiempo pactado con el cliente para la entrega del pedido. Existen distintas variables que pueden ser funciones objetivo según el criterio y necesidad de la organización. La función objetivo puede ser una función de tiempos de entrega (minimizar) y se define así:

$$L_j = C_j - d_j$$

Ecuación 1 Retraso de un trabajo j

El resultado esta ecuación es positiva cuando el trabajo procesado finaliza tarde y negativa cuando lo hace de forma temprana. La tardanza de un trabajo procesado se estructura:

$$T_j = \max(C_j - d_j, 0) = \max(L_j, 0)$$

Ecuación 2 Tardanza de un trabajo j

Al igual que la unidad de penalidad, el retraso y la tardanza son las tres funciones de penalidad básicas relacionadas con los tiempos de entrega.

1.2 Enfoque jerárquico de la gestión de operaciones

La planificación de la producción se define como el volumen y el momento de fabricación de los productos. Además abarca 4 definiciones: la planificación estratégica, la cual es elaborada por los niveles ejecutivos de la empresa, la planificación agregada, donde se expresa la fijación de la porción de producción de la empresa, sistema maestro de producción (MSP), el cual busca satisfacer las demandas de cada uno de los productos dentro de las líneas de familias y la planeación de requerimientos de materiales (MRP), el cual se define como un plan que mueve el sistema de planeación de materiales e inventarios. Sin embargo y de manera preocupante, la literatura afirma que en la actualidad la insuficiente integración de la planeación estratégica, con los procesos para su implantación y control, limita a la organización en el logro de los objetivos estratégicos (Albert Díaz & Hernández Torres, 2010).

El modelo jerárquico de las organizaciones en la mayoría de sectores económicos está dividido en los niveles Estratégico, Administrativo, Del conocimiento y operativo. En definición de las actividades a cargo por cada nivel, se señala que el nivel operativo, se ocupa de las transacciones elementales de la organización, tales como control de flujo de materiales, producción, sección de ventas, etc. (Salto, 2000); el nivel de conocimiento proporciona apoyo al control de flujo de trabajo. Por su parte, el sistema del nivel administrativo o gerentes intermedios, reportan información proveniente de sus verificaciones y controles en la toma de decisiones y otras funciones propias de su cargo. Por último, el nivel estratégico

proporcionan a las altas directivas el soporte al ambiente externo en las pymes, y planificación a largo plazo (Salto, 2000).

1.2.1 Nivel estratégico

Todas las áreas funcionales de una empresa deben laborar de acuerdo a unas directrices y condiciones marcadas por los altos mandos de la organización, o nivel estratégico, pues es allí donde se brinda al funcionario las garantías de seguridad, remuneración y otras obligaciones para el funcionamiento de la organización. Sumado a esto, las directrices y orientaciones otorgadas al personal por parte del nivel estratégico son inspiradas en el cumplimiento de objetivos propuestos por la organización en un determinado periodo de tiempo (corto, mediano y largo).

Así mismo, las decisiones de este nivel jerárquico han sido estudiadas por diferentes autores; plazo mínimo de ejecución, aprovechamiento de materiales y sostenimiento de proyectos a través del tiempo son algunos ejemplos. Además, la nivelación de recursos es fundamental para lograr el objetivo económico de toda la organización y es importante en la gestión de proyectos puesto que la variabilidad de los recursos es costoso y no deseada por este nivel jerárquico de la organización (Atan & Eren, 2018). Para lograr esto, la construcción de cronogramas de trabajo basados en los recursos se obtienen de manera más eficiente si estos se crean cambiando las actividades de acuerdo a su *float time* utilizando el cronograma principal resultado bajo el método de la ruta crítica (Atan & Eren, 2018). Sin embargo, si la duración del proyecto es una variable de decisión para el nivel estratégico de la organización, es meritorio y óptimo encontrar un nuevo cronograma con nivelación de recursos ya que, al permitirse un tiempo de finalización más largo, permite más tiempos de retraso sin afectar las demás tareas (*float time*) (Atan & Eren, 2018).

La nivelación de recursos (RLP) constituye una de las decisiones fundamentales para el este nivel. Esta consiste en ajustar los tiempos de inicio de actividad en un cronograma de proyecto de modo que la variación de la utilización de recursos a lo largo del tiempo sea mínima al tiempo que se satisfacen las restricciones de precedencia entre las actividades. El RLP es importante ya que el uso diario de los recursos a partir del momento de las actividades tiene un impacto significativo en el costo de un proyecto debido a factores como tiempos de recursos inactivos y recontractación de personal. (Atan & Eren, 2018).

En adición, otras decisiones claves que los directivos o gerentes generales de las organizaciones deben adoptar las cuales Salto (2000) denota así:

1. *Estrategia del negocio*: Con el conocimiento y experiencia adquiridos a través del tiempo, ¿Cómo se puede diseñar la organización para que sea competitiva y eficiente?

2. *Globalización*: En esta parte de decisión estratégica, se pretende entender los requerimientos de la economía global y adaptarse tanto a la producción como a la venta de productos en diferentes países.
3. *Arquitectura de la información*: Este ítem se ocupa en soportar a través del tiempo los objetivos inicialmente propuestos por la dirección.
Es común que estos sistemas propongan rediseñar la organización, de esta forma, la tecnología entra a la organización en pro del cumplimiento de los objetivos. En este campo, el nivel estratégico debe decidir sobre la asignación de los recursos de hardware, software y telecomunicaciones.
4. *Inversión en los sistemas de información*: La importancia y valor monetario de la organización de acuerdo a su sistema de información robusto.
5. *Responsabilidad y control*: En este campo de decisión para el nivel estratégico de la organización, las directivas se ocupan en un diseño entendible y fácilmente controlable por sus funcionarios. En este campo, se tiene especial atención en asegurar exactitud, confiabilidad y seguridad ya que para los grupos de interés que componen las pequeñas y medianas empresas es de vital importancia la claridad y confiabilidad, seguridad y confiabilidad.

Adicional a esto, hay otras decisiones que se deben tomar en este nivel jerárquico; la localización de la planta es una de ellas. Esta decisión es fundamental puesto que la localización de los factores de interés a la organización como proveedores, rutas de acceso, ubicación de los mercados, ubicación de mano de obra, fuente de energía, impuestos y costos de terrenos, hacen parte de la estrategia comercial de la compañía (Higuera, 2009).

1.2.2 Nivel táctico

Lograr el engranaje dentro de los diferentes niveles es fundamental. Mientras que la empresa a través de su nivel estratégico se orienta hacia lo que la misma debe hacer para conseguir los objetivos, su planeación se ocupa en la especificación de cómo lograrlos. Dado que esta planeación es compleja y amplia, requiere subdividirse en planes tácticos propios de este nivel desarrollados en el eslabón intermedio de la organización, los cuales están orientados a cada departamento o área. Seguido a esto, cada plan del nivel intermedio deberá subdividirse en planes operacionales, para detallar con mejor atención cada tarea o actividad que deba ejecutarse (Winckfll et al., 2009).

En adición, el nivel táctico referenciado es la línea media de la estructura organizacional de una empresa. En este espacio se produce la especialización y la responsabilidad de cada individuo y se encuentra conformado por un gerente intermedio y capacitado para alguna tarea en particular. En este nivel, es posible encontrarse desde gerentes hasta supervisores de taller, dependiendo del tamaño de la empresa. Por consiguiente, los sistemas elaborados para el nivel del conocimiento se enfocan en integrar nuevos conocimientos y estrategias a la organización y lograr controlar el flujo de trabajo. Los sistemas del nivel administrativo o medio son diseñados para servir el monitoreo, control y a la toma de decisiones de los

gerentes intermedios. En este nivel jerárquico, las decisiones relacionadas con *Scheduling* se llevan a cabo en pymes mediante la gestión de la producción, cuyas principales etapas son la planeación estratégica, planeación agregada y *Scheduling*. Las dos primeras se focalizan en encontrar estrategias que permitan la disponibilidad de los recursos, mientras que en el *Scheduling* se toman decisiones sobre la asignación de estos recursos en el proceso, función perteneciente al nivel operativo de la organización (Álvarez, Caicedo, Malaver, & Méndez, 2011).

Una decisión característica de este nivel jerárquico es la distribución interna de la planta para lograr una ubicación acertada de todas las áreas del taller. Rutas, almacenamiento, sitios de interés para los operarios y otras características importantes que se deben tomar en este nivel táctico. Esta decisión del nivel táctico de la organización quizá es de los puntos más importantes dentro del proceso de planificación de la producción, ya que es claro que una planta automatizada debe contar con una buena distribución de sus equipos de producción, si se espera que esas reducciones y utilidades que se esperan de una automatización sean alcanzadas. En la actualidad, se utilizan diferentes dispositivos de ayuda para una decisión más acertada a las necesidades de la organización; flujos de proceso, diagrama de operaciones y las plantillas y modelos a escala (Higuita, 2009).

1.2.3 Nivel Operativo

El nivel operativo de una organización decide y/o programa las ordenes de los clientes. Esto se logra, siguiendo patrones de prioridad o preferencia, tiempos de procesamiento, complejidad de la tarea a desarrollar, etc. A pesar de la relevancia práctica y teórica de este problema, la literatura sobre la programación de pedidos no es muy abundante en comparación con la programación de trabajos. Sin embargo, hay varias contribuciones buscando minimizar la suma ponderada de los tiempos de finalización, el número de pedidos atrasados o la tardanza total de los pedidos (Framinan & Perez-Gonzalez, 2018). Este nivel cuenta con sistemas los cuales monitorean las actividades y transacciones de la organización (ventas, ingresos, depósitos y el flujo de materiales en el taller de trabajo). (Salto, 2000). De tal forma que, en este nivel jerárquico es donde se lleva a cabo gran parte de las actividades y tareas de *Scheduling* en una organización.

Los administradores o programadores de taller suelen crear rutas o cronogramas de programación de órdenes de acuerdo a reglas de prioridad dependiendo del cliente. Como es de suponerse, una regla de prioridad para una orden se puede establecer de acuerdo a ciertos parámetros que la orden cumpla para su procesamiento (Koulamas & Panwalkar, 2018). Con esto, lo que todo administrador de taller de trabajo o programador desea, es alcanzar y poder determinar una secuencia óptima en el tiempo, clasificando los trabajos según sus índices de prioridad, para que, de esta forma, la adición o eliminación de un trabajo no cambie las posiciones relativas de los trabajos que sigan en la secuenciación dada inicialmente. Estos comportamientos deseados por el programador o administrador de la tienda, han llevado a

un análisis teórico del índice reglas de prioridad para problemas de programación de una sola máquina (Koulamas & Panwalkar, 2018).

Se han desarrollado herramientas de apoyo para la toma de decisiones en los niveles jerárquicos. Los *ESS* para el nivel estratégico, *MIS* y *KWS* para los soportes de toma de decisión en el nivel administrativo, *OAS* para el nivel de conocimiento como sistemas de automatización para oficinas y *TPS* para el nivel operativo en el procesamiento de transacciones (Salto, 2000). La Figura 1 muestra que el *Scheduling* es implementado en el nivel operativo de la empresa. Es allí, donde las categorías funcionales Marketing, Manufactura y producción, contabilidad y recursos humanos están prestas a la adaptación entorno a las decisiones de *Scheduling* que sean tomadas por el programador de la producción para lograr la competitividad buscada por las directivas en el mercado global (Salto, 2000).

SISTEMAS DE INFORMACIÓN EN LA ORGANIZACIÓN					
ESS	MIS	DS	MIS	KWS	TPS
Plan de operaciones a largo plazo.	Control de inventarios.	Planificación de la producción.	Producción de imágenes y de palabras.	Ingenio en puestos de trabajo	Control y programación de máquinas del taller
Planificación de ganancias y mano de obra.	Análisis de inversión de capital.	Análisis de costos, precio y rentabilidad.	Calendarios electrónicos.	Puestos de trabajo gráficos	Seguimiento de órdenes de trabajo
Pronóstico de tendencias de ventas a largo plazo.	Análisis de reubicación.	Análisis de las regiones de ventas.	Procesamiento de palabras	Puestos de trabajo gerenciales	SCHEDULING
Sistemas a Nivel Estratégico	Sistemas a Nivel Gerencial		Sistemas a Nivel de Conocimiento		Sistemas a Nivel Operativo

Figura 1 Sistemas de información en la organización
Fuente: Imagen tomada y modificada de Salto (2000).

Así mismo, se es posible adaptar medidas de decisión para la planificación de recursos, de operaciones, controles a las órdenes de compra y controles a la calidad del producto, con base en el patrón de flujo adoptado por la organización. En ese sentido, se muestra la gran responsabilidad estratégica y de decisión que tiene el nivel operativo de una organización para la toma de decisiones de *Scheduling*, pues es allí donde la programación de la producción en un taller de trabajo es desarrollada, siguiendo un patrón de flujo determinado, bajo el cumplimiento de unos objetivos y políticas establecidas basadas en el cliente y generando mayores ingresos a la organización.

1.3 Decisiones de *Scheduling*

Álvarez (2011) sugiere el *Scheduling* como un proceso crítico de toma de decisiones en el quehacer de una organización, la cual desea optimizar recursos en cumplimiento de objetivos marcados y enfocados a los clientes y con la misma organización. Dentro de las decisiones de *Scheduling* tomadas desde el nivel operativo de una organización, las tareas deben ser enrutadas mediante centros de trabajo. Durante este proceso, cuando una tarea llega al centro de labores (proceso), ingresa en una fila y espera ser procesada por una máquina que se encuentre disponible. En este momento, la decisión que debe ser tomada por el encargado de producción o supervisor de taller será el determinar el orden para la ejecución de estas tareas y la asignación de la máquina para efectuar este procesamiento. Cabe notar que, al organizar y decidir esta secuencia, el tomador de decisiones debió tener en cuenta diferentes restricciones y prioridades. Además, es preciso resaltar que el personal especializado para la labor en los talleres de trabajo y en los sistemas de *Scheduling*, pueden ser administradores, programadores de producción, supervisores, operadores, ingenieros y personal de venta (Herrmann, 2004). Usualmente, se apoyarán en sistemas de información del nivel operativo.

En el sector manufacturero, las organizaciones deciden sobre la generación y actualización de los programas de producción (cronogramas), los cuales establecen cuando y donde deben tener lugar ciertas actividades. Así mismo, un sistema de *Scheduling* en producción es una dinámica red de personas que intercambian información de interés para la acertada toma de decisiones. Dentro de esta información se destacan el estado de las tareas a procesar (órdenes de trabajo), recursos de fabricación (recurso humano, maquinaria y líneas de producción), inventario (materias primas y trabajos en procesos), herramientas y muchos otros datos informáticos de gran importancia (Herrmann, 2004). En ambientes dinámicos y estocásticos, el personal encargado de estas actividades como lo son supervisores, gerentes de planificación, programadores e ingenieros de proceso, no solo deben velar por productos de alta calidad, si no también, tener la capacidad de reacción rápida frente a diferentes eventos inesperados. Estos eventos que conciernen a la parte operativa de la organización (problemas de *Scheduling*) difícilmente son tenidos en cuenta a la hora de programar un cronograma de trabajo. Por esto mismo, cuando se presentan dentro del sistema, genera perturbaciones, pérdidas de tiempo y de material, generando notables diferencias entre lo programado en el *Schedule* (cronograma) y lo que realmente se está desarrollando en el taller de trabajo. (Herrmann, 2004).

En ese sentido, en un sistema de *Scheduling*, ya es sabido que la acertada toma de decisiones es un reto y una gran responsabilidad para el encargado del proceso. Jeffrey W. Herrmann en su publicación de la universidad de Maryland en 2004, sugiere que hay decisiones claves que se deben tomar en un sistema de producción con *Scheduling*, de los cuales sobresalen; liberación de trabajos para la producción, priorización de trabajos o tareas, asignación de recursos (Puede ser de personal, de equipos, líneas de producción) a las tareas de trabajos que serán procesadas, reasignación de recursos de un trabajo a otro, determinar cuándo un

trabajo debe comenzar a procesarse y la interrupción de trabajos que deben ser retirados del proceso.

1.3.1 Secuenciación y asignación

En un sentido amplio, la programación de operaciones puede pensarse como una asignación de recursos (máquinas) en un lapso de tiempo para realizar un conjunto de trabajos, o bien cómo resolver el problema de encontrar la asignación óptima de ciertos recursos a determinados tareas (Correa Espinal, Rodríguez Velásquez, & Londoño Restrepo, 2008). Por lo que, en un problema de planificación siempre existirá tres componentes diferenciadas: operaciones a desarrollar (trabajos) que se tienen que realizar, los recursos disponibles para su realización (máquinas), y las finalidades u objetivos (función objetivo) que se desean lograr y que nos permite identificar.

Correa Espinal et al., (2008) señala un importante acercamiento mediante algoritmos genéticos que dio Bean en los años 90's, donde propuso sistemas aleatorios para la codificación de estas metaheurísticas. Del mismo modo y en colaboración de otros autores desarrollaron y mejoraron el desarrollo surgido, donde establecieron cada gen, mediante una generación aleatoria de caracteres, que se componía de dos partes: una parte entera $\{1, 2, \dots, m\}$ y una segunda fracción generada de un aleatorio $(0,1)$. La parte entera del gen es la asignación de la máquina mientras que la parte binaria, determina la secuencia de operación en cada máquina (Correa Espinal et al., 2008).

Por otro lado, la secuenciación de operaciones hace parte del nivel de planificación a corto plazo y principalmente, es un área de investigación desde hace más de cinco décadas. También, se define como una rama de la optimización combinatoria que ha desarrollado su propia metodología utilizando herramientas matemáticas y computacionales variadas (Correa Espinal et al., 2008). Lo que se busca o la meta a alcanzar es encontrar una secuencia óptima para la ejecución de unos trabajos y sus respectivas operaciones en las máquinas o recursos disponibles limitados. También es definida en la literatura como un proceso de toma de decisiones que constituye uno de los problemas más importantes en gestión de la producción, tanto desde el punto de vista teórico como práctico (Correa Espinal et al., 2008). Como se ha venido presentando, diferentes generalizaciones están presentes en las configuraciones de los tipos de talleres. Según Correa Espinal et al. (2008), el problema de secuenciación de flexible Job shop *Scheduling* problem *FJSSP*, (generalización del Job Shop), presenta una serie de variantes dependiendo de la naturaleza y el comportamiento; tanto de las operaciones como de las máquinas. Una de las variantes más difíciles de plantear, debido a su alta complejidad computacional e informática, es aquella en donde las tareas son dependientes y las máquinas son diferentes. En esta variante cada trabajo presenta una lista de operaciones que la preceden y para ser ejecutada deben esperar el procesamiento de dicha lista en su totalidad. Cada tarea demora tiempos distintos de procesamiento en cada máquina. El objetivo consta de minimizar

el tiempo acumulado de ejecución de las máquinas, mejor nombrado en los talleres de flujo como makespan.

1.3.2 Clasificación de los problemas de *Scheduling*

Para empezar a abordar un problema de programación es necesario tener en cuenta por lo menos tres importantes aspectos, como lo son: el modelo que en la realidad se tiene y que se desea reflejar, el momento en que se toman las decisiones y el entorno sobre el cual se va actuar (Higuita, 2009). Cuando nos referimos al modelo que se desea reflejar, los problemas a que nos enfrentamos se dividen en dos, los cuales son para modelos estáticos y modelos dinámicos. Al mencionar el momento en que se toman decisiones, el problema que se corre es que los programas pueden estar en línea o fuera de línea, por último se menciona el entorno el que se entiende que la programación de la producción se gestiona en tiempo real o no (Higuita, 2009)

Algunos autores señalan que existen dos grupos de problemas de *Scheduling*: *Los puros* y de *asignación de recursos*. El primero, cubre la demanda de máquinas necesarias para realizar la operación dentro del tiempo, sin exceder la capacidad disponible del recurso. A su vez y para este mismo tipo de problema, se caracterizan diferentes patrones de flujo; Flujo aleatorio (*Open Shop*), Flujo general (*Job shop*), Flujo regular (*Flow Shop*) y el flujo permutacional (*Permutational Flow Shop*). Es importante resaltar que, en el campo de la administración e investigación, estos patrones de flujo son conocidos por su abreviatura, OSS, JSS, FSS, PFSS, respectivamente (Marquez, 2012). Además, se focaliza en cubrir las operaciones dentro del tiempo asignado, usando la demanda total de las maquinas sin excederlas en su capacidad. Segundo, como problemas de “Asignación de recursos” donde se dispone de un conjunto de tareas por realizar; para llevarlas a cabo, se cuenta con conjuntos de máquinas que realizan la misma operación. Sin embargo, estas pueden diferir en su costo o tiempo de operación. Se centra en asignar la máquina correcta para llevar a cabo estas actividades al menor costo. En este tipo, el objetivo es poder especificar en qué cantidad, en que tiempo y de qué forma las tareas y los insumos se van a utilizar durante el proceso (Marquez, 2012).

No obstante, diferentes tipologías de los problemas de *Scheduling* existen en la literatura. Vincent T'kindt (2001) señala que el objetivo de los problemas de *Scheduling* es determinar una secuencia en cada máquina y un tiempo de inicio para cada operación. En *Scheduling* y los diferentes problemas de asignación con etapas de la literatura, es posible definir, sin importar cada operación, las etapas de las máquinas. Sin embargo, una máquina pertenece a solo una etapa, después, se combina cada operación con una etapa y cada operación puede ser procesada por cualquier maquina en esa etapa. Como se mencionó, la Figura 2 muestra de manera generalizada una tipología de problemas de *Scheduling* propuesta por Vincent T'kindt (2001):



Figura 2 Tipología de problemas de *Scheduling*
Fuente: Tomado de Vincent T'kindt (2001)

Los problemas de planificación se dividen en dos, determinísticos y estocásticos. Se denomina determinístico, (*Deterministic machine scheduling*) cuando todos los datos del problema de planificación son conocidos a priori. Estos modelos son estudiados por la optimización combinatoria; una característica común a la mayoría de los problemas estudiados por la optimización combinatoria es que son relativamente sencillos de plantear, pero difíciles de modelizar y, consecuentemente, mucho más difíciles en su solución (Correa Espinal et al., 2008). De igual forma, otros autores definen la programación de Scheduling en dos tipos; estáticos, donde los trabajos a procesar llegan a una máquina disponible en un tiempo ya estipulado y dinámicos donde los trabajos arriban a las máquinas de manera aleatoria. Amjad et al., (2018) presenta la Figura 3 para ejemplarizarlo.

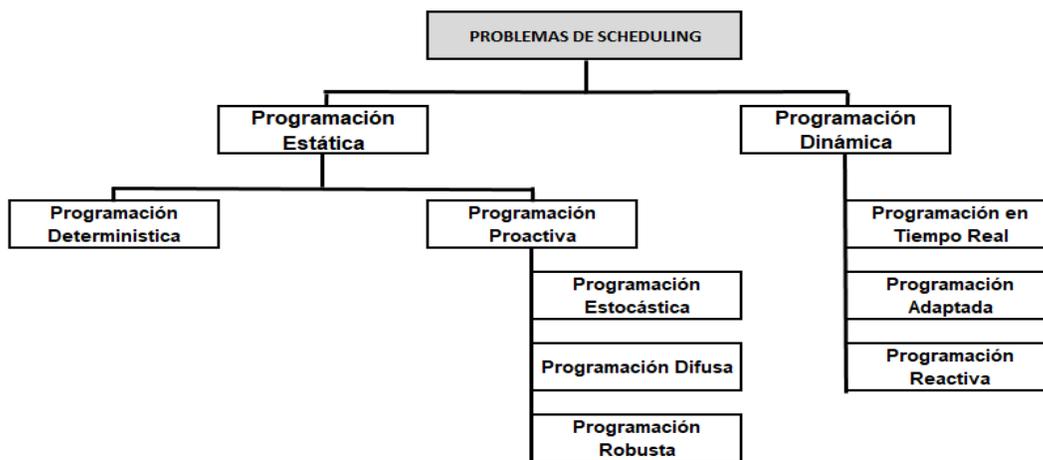


Figura 3 Clasificación de los problemas de *Scheduling*.
Fuente: Tomado y modificado de Amjad et al., (2018).

La programación dinámica es una situación que se presenta cuando cualquier interrupción ocurre en el entorno de fabricación en contraste a la programación estática donde esto no se presenta. Esto puede requerir cambios necesarios en el cronograma para que pueda seguir siendo óptimo. Tales problemas se clasifican como trabajos y/o recursos relacionados. Debido a la importancia de la programación en entornos de fabricación, numerosos autores publican su literatura para ofrecer mayor información (Amjad et al., 2018).

Por otro lado, una extensión natural de los modelos de planificación determinístico, consiste en asumir que ciertos datos del problema varían aleatoriamente y, de esa forma, aparecen los problemas de Planificación Estocástica. El estado de planificación determinística, es especialmente frecuente en los problemas de planificación y secuenciación de tareas, por tanto, su solvencia exige el uso de medios computacionales (Correa Espinal et al., 2008).

1.3.3 Clasificación de configuraciones productivas

De acuerdo al requerimiento del producto y los requisitos en el proceso de fabricación, los talleres de trabajo se han clasificado según los diseños que adoptan. La Figura 4 representa estas configuraciones a los sistemas productivos o talleres de trabajo de acuerdo al patrón de flujo (Amjad et al., 2018).

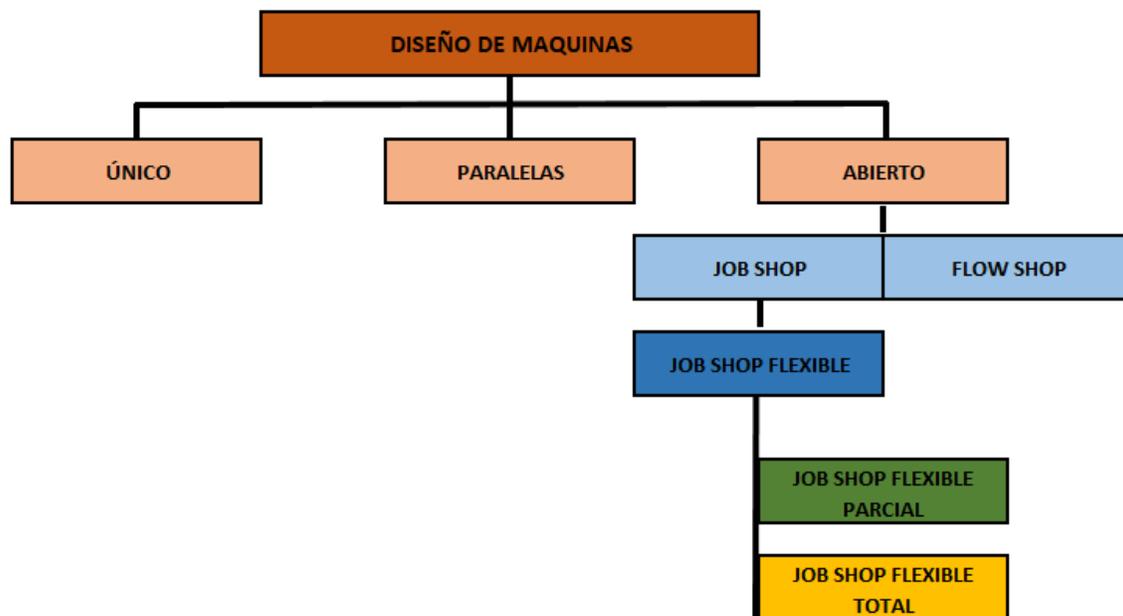


Figura 4 Clasificación del diseño de talleres de trabajo

Fuente: Tomado y adaptado de Amjad et al. (2018)

Uno de los modelos más populares en la teoría de la secuenciación es el problema del *Job Shop* (JSSP), que es considerado una buena representación de las configuraciones de planta

industriales reales modernas (Correa Espinal et al., 2008). Además, tiene características como la secuencia de una serie de operaciones en máquinas fijas, la no dependencia en los tiempos de procesamientos de cada trabajo y un requisito el cual cada trabajo debe ser procesado por un conjunto de tareas en diferentes máquinas.

1.3.4 Solución de problemas de *Scheduling* y algoritmos

Numerosos métodos y técnicas de solución han sido desarrollados por investigadores. Entre estos métodos, la literatura refiere heurísticas y algoritmos de programación capaces de encontrar soluciones óptimas a los problemas que se presentan en los talleres de procesamiento de trabajos. Amjad et al. (2018) refiere los algoritmos como una secuencia de actividades y etapas que pueden transformar un valor de entrada para un resultado deseado, por lo tanto, sirve como una herramienta para resolver un problema computacional específico. Entre estos, encontramos a los algoritmos genéticos, los cuales ha atraído a grandes estudiosos sobre industrias y métodos de solución de problemas de *Scheduling*. Estos algoritmos vienen creciendo en empresas financieras, en fábricas (con métodos de *Scheduling*) debido a su robusto poder de búsqueda, optimización, adaptación y aprendizaje. Además, ha demostrado ser uno de los más efectivos en técnicas evolutivas para resolver la programación de *Job shop Scheduling problem* (JSSP) y consecuentemente programación *Flow Shop Scheduling Problem* (FJSSP). También, ha entregado buenas soluciones durante el proceso de investigación, y usualmente mejoran al acercamiento de la solución óptima.

En este sentido, una de las subclases de algoritmos para la solución de problemas de *Scheduling* son los algoritmos genéticos (GA). Estos pertenecen a la clase de algoritmos evolutivos y su desarrollo fue inspirado a través del proceso de natural evolución genética de Darwin. La importancia de los algoritmos genéticos se encuentra en su naturaleza flexible; es decir, puede cambiar o ajustar en sí de acuerdo con el entorno cambiante. Es importante destacar que los Algoritmos Genéticos se aplican a campos como la planificación de operaciones en planta, problemas de corte de materiales y de componentes irregulares, el entrenamiento de redes neuronales y muchos otros problemas de optimización en la investigación de operaciones. Algunos autores señalaron que el 26,4% de los estudios de investigación para la solución de JSSP han sido conducido usando GA (algoritmos evolutivos) (Amjad et al., 2018).

En cuanto a la estructura del algoritmo genético, se encuentra un elemento básico de trabajo que es un gen, un grupo del cual constituye un cromosoma. Los cromosomas contienen los datos de estado actuales codificados en la forma de dígitos binarios 0 o 1 que se almacena distintivamente en un gen. Esta estructura representa una posible solución para el problema en consideración (Amjad et al., 2018). Los cromosomas se combinan para formar una población que a su vez formula una generación. Cada generación está sujeta a los operadores genéticos para obtener una nueva y mejorada generación. La nueva generación es

teóricamente mejor que la generación anterior, debido a que la nueva generación se nace después de implementar el principio de "supervivencia del más apto" y así reemplaza la generación más que termina (Amjad et al., 2018). A continuación, la Figura 5 muestra la representación esquemática de relación de estos elementos que componen un algoritmo genético.

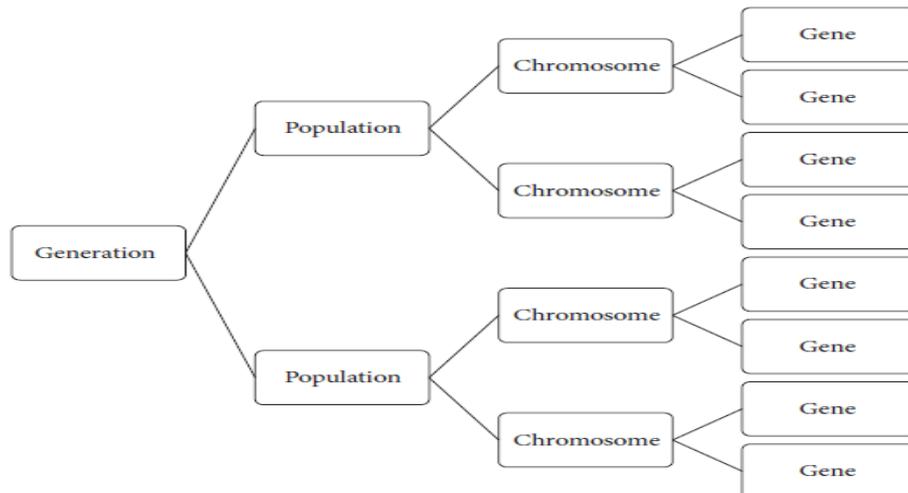


Figura 5 Estructura básica de los elementos de un algoritmo genético

Fuente: Tomado de Amjad et al., (2018).

En adición a lo anterior, el uso de algoritmos y/o ecuaciones matemáticas para la solución de problemas de programación ha dado numerosos resultados a diferentes organizaciones de varios sectores de la industria; rutas críticas, rutas más cortas, entre otras variables de decisión optimizadas son muestra de ello. La Figura 6 muestra el diagrama de optimización regular o genérico después de conocer a detalle el proceso y todas sus etapas.

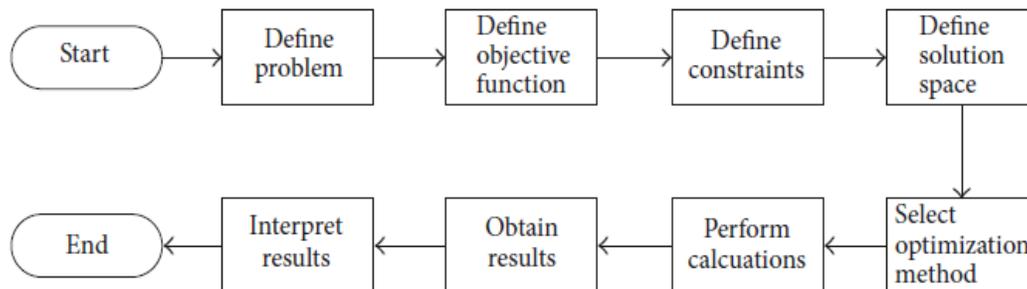


Figura 6. Proceso Genérico de optimización

Fuente: Tomado de Amjad et al., (2018)

Como se señaló en este estado, numerosos algoritmos y diferentes clases de éstos para la solución de problemas de *Scheduling* han evolucionado de acuerdo a la complejidad y

necesidad que se requiera. Sin embargo, estos algoritmos se han logrado clasificar en dos grandes clases o grupos (*algoritmos exactos* y *los aproximados*), en donde se encuentran el *constructivo* y *genético* respectivamente ya mencionados. Amjad et al., (2018) clasifica los algoritmos de Scheduling según la figura 7.

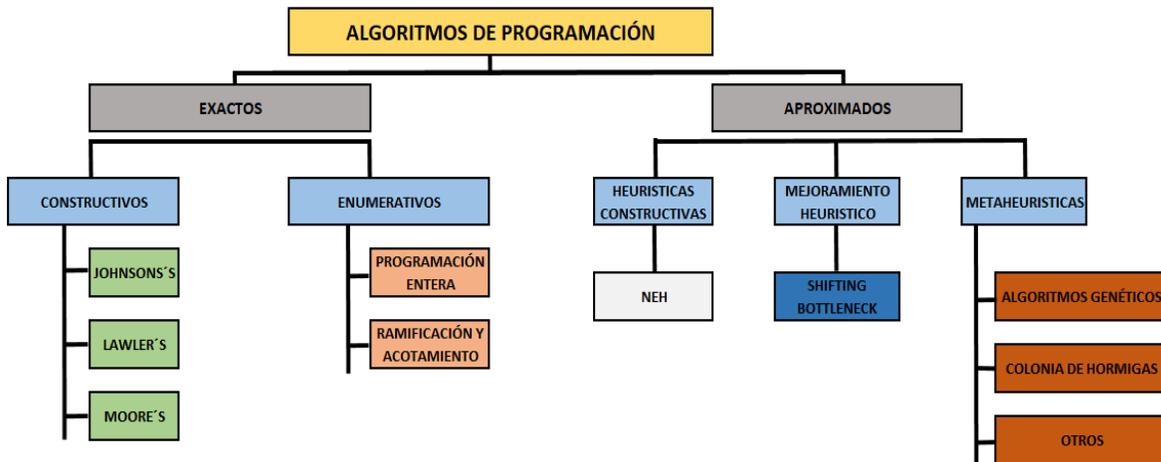


Figura 7 Algoritmos del *Scheduling*
Fuente: Tomado y adaptado de Amjad et al., (2018)

Los algoritmos exactos garantizan que no habrá una mejor solución o no habrá solución más óptima después de que se haya resuelto un problema. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la complejidad del *Flexible Job Shop Scheduling Problem*, es de naturaleza extrema y hay un alcance muy limitado para el uso de algoritmos exactos (Amjad et al., 2018).

1.4 Representación de configuraciones con decisiones de *Scheduling*

Diferentes ambientes en los talleres de trabajo bajo configuraciones con problemas de *Scheduling* son expuestos por Vincent T'kindt (2001), los cuales se resaltan; Máquina única, *Flow Shop*, *Job Shop*, *Open Shop* y *Mixed Shop*.

Otros ambientes que se encuentran en la literatura con configuraciones de Scheduling son los problemas de programación y asignación con etapas. En esta configuración, las máquinas se agrupan en etapas bien definidas y una máquina pertenece a una sola etapa. En todos los casos, las máquinas de un escenario son capaces de realizar las mismas operaciones. Para llevar a cabo una operación, es necesario elegir una de las máquinas disponibles y, por lo tanto, el problema se extiende en asignar una máquina para cada operación y la secuencia de las operaciones en las máquinas. En cada etapa Vincent T'kindt (2001) diferencia configuraciones como; máquinas idénticas (P), cuando las maquinas son uniformes (Q) y cuando las máquinas no están relacionadas o incluso son independientes (R). En otras palabras y para efectos de generalización, los problemas tradicionales de *Scheduling* de asignación corresponden a las configuraciones definidas por el mismo autor; Maquinas

paralelas (P, Q, R), donde hay solo una estación y los trabajos solo tienen una operación, *Flow Shop Híbrido* (HF), donde todos los trabajos tienen la misma ruta de producción y por ende las estaciones se usan en el mismo orden, *Job Shop general* (GJ), donde cada trabajo tiene su propia ruta y *Open Shop general* (GO), donde los trabajos no tienen una ruta fija.

Otra configuración general que el autor define, se presenta donde suponemos que cada operación tiene su propio conjunto de máquinas en las que puede ser procesado. En este grupo es válido clasificar los siguientes casos; los trabajos con una sola operación los cuales Vincent T'kindt (2001) define como un problema de máquinas paralelas con asignación general, los trabajos que siguen una orden de procesamiento, en este caso es difícil distinguir entre una configuración *Flow Shop* o *Job Shop* desde los grupos de máquinas usados por esos trabajos que no son comparables y los trabajos que no siguen una ruta anteriormente fijada.

Existen también diferentes sistemas de producción o configuraciones de acuerdo con el flujo de los productos o los procesos. Entre ellos se pueden mencionar: *sistemas continuos* y *sistemas intermitentes* de fabricación, entre los últimos podemos encontrar los sistemas *Flow Shop* o fabricación en línea y los *Job Shop*, o taller de tareas. Dichos sistemas son considerados altamente complejos para la programación de las operaciones que se llevan a cabo en ellos. Esta complejidad es objeto de permanente estudio por parte de expertos tanto desde el punto de vista académico como práctico (C. J. Osorio, Castrillon, Toro, & Orejuela, 2008).

1.4.1 Configuración *Flow Shop*

Algunos investigadores definen el *Flow Shop* como un problema de secuenciación de tareas en sistemas de producción lineal que consiste en programar la secuencia de procesamiento de n tareas en m máquinas de tal forma que se optimice alguna medida de efectividad, como por ejemplo minimizar el tiempo total requerido para terminar todas las tareas (*makespan*). El caso más general de este problema considera que todas las tareas deben ser procesadas en el mismo orden en cada máquina (Jimenez, 2012). La línea produce varios tipos de productos que son diferentes y cada producto debe ser procesado en una máquina en cada etapa, la secuencia de los trabajos debe ser la misma para todo el proceso, en una misma etapa se pueden procesar varias tareas simultáneamente, pero se debe tener en cuenta la secuencia, el tiempo de procesamiento de cada tarea depende de la etapa, no se considera espera pero se debe respetar la secuencia, el procesamiento de un trabajo en una máquina no puede ser interrumpido (Jimenez, 2012).

En esta configuración, el problema de secuenciación de tareas ha sido un tema de gran importancia en la investigación de operaciones donde se busca establecer la programación óptima de trabajos en máquinas dentro de un proceso de producción en una industria (Jimenez, 2012). Así mismo, el problema clásico del *Flow-Shop* de una máquina por etapa tiene varias generalizaciones, *Flow-Shop Híbrido*, *Flow Shop permutacional*, *Flow-Shop con*

Múltiples Procesadores, *Flow-Shop Flexible*, entre otros. Es importante resaltar que en estos dos últimos problemas se dispone de máquinas idénticas en paralelo por cada etapa. De acuerdo al ambiente de las máquinas se puede dar que el problema tenga una sola máquina, máquinas en paralelo, talleres de producción continua, producción intermitente y talleres abiertos. En consecuencia, el *Flexible Flow Shop* está presente en algunos talleres de trabajo y traen consigo algunas características relevantes, de las cuales se denotan que varias máquinas están disponibles en la tienda o taller de flujo. La característica de este tipo de talleres es que los trabajos procesados en ella usan máquinas en el mismo orden; todos tienen el mismo enrutamiento de procesamiento.

En cuanto al *Flow Shop Permutacional*, algunos investigadores como Colin R. Reeves lo definen como un problema para la secuenciación de trabajos que tienen que ser procesados en máquinas en un mismo orden. Encontramos además que cada máquina tiene la misma secuencia de trabajos y no se pueden adelantar entre sí pues siguen un orden ya establecido (Vincent T'kindt, 2001). El objetivo es encontrar la permutación de los trabajos que minimice el *Makespan*. Dentro de varias alternativas de solución, autores sugieren un algoritmo genético, el cual está basado en el Algoritmo Genético Clásico.

Otra generalidad mencionada es el *Flow Shop Híbrido*, el cual es definido como un problema de secuenciación de tareas en líneas de flujo con máquinas ubicadas en paralelo. La programación de estos trabajos es en líneas de flujo de varias etapas en serie, con múltiples máquinas en paralelo que no son idénticas, la cual los trabajos pueden saltar etapas, pero sin devolverse a una ya visitada y los tiempos de preparación son dependientes de la secuencia (Jimenez, 2012). Esta programación es un problema combinatorio complejo que se encuentra en muchas aplicaciones del mundo real (Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010). El flujo híbrido (HFS) son entornos de fabricación comunes en el cual un conjunto de n trabajos se procesarán en una serie de m etapas que optimizan una función objetivo dada. (Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010) afirma que hay un número de variantes, las cuales la mayoría comparten las siguientes características y las enumera así; Primero, el número de etapas de procesamiento m es al menos 2. Segundo, Cada etapa k tiene > 1 máquinas en paralelo y, al menos, una de las etapas > 1 . Tercero, todos los trabajos se procesan siguiendo el mismo flujo de producción; etapa 1, etapa 2 y así sucesivamente. Un trabajo puede omitir cualquier cantidad de etapas siempre que se procese en al menos una de ellas y por último, Cada trabajo j requiere un tiempo de procesamiento P_{jk} en la etapa k . Adicional a esto, todos los trabajos y máquinas están disponibles en el tiempo cero, las máquinas en una etapa determinada son idénticas, cualquier máquina que se encuentre en el taller puede procesar solo una operación a la vez y cualquier trabajo puede ser procesado por una sola máquina a la vez; no existen reglas de prioridad para el procesamiento de las tareas y los datos del problema son deterministas y conocidos (Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010).

El problema de Flow Shop es catalogado como de difícil solución o NP-HARD, ya que no se cuenta con algoritmos de orden polinomial a partir de los cuales se pueda resolver el

problema de forma óptima y en el menor tiempo posible (Jimenez, 2012). Una solución de un problema de programación siempre debe satisfacer una cierta cantidad de restricciones, ya sean explícitas o implícitas. Por ejemplo, un problema de esta configuración está implícito que los trabajos se procesan de acuerdo con el enrutamiento y, por lo tanto, una operación no puede comenzar mientras su precedente permanece incompleto (Vincent T'kindt, 2001). En conclusión, son numerosos los artículos que se encuentran en la literatura sobre esta configuración, la cual hace evidente el interés por los autores. Muchos de estos se basan en métodos heurísticos que han sido postulados desde el año 1995 al 2009, buscando proporcionar avances al problema del *Flow shop*.

1.4.2 Configuración *Job-shop*

El patrón de flujo más común en talleres de metalmecánica es el *Job-Shop*. Según Amjad et al. (2018), la principal característica de este patrón es que es una secuencia de operaciones o tareas que se van a realizar en un número de máquinas fijo. Segundo, cada trabajo procesado puede tener diferente tiempo de procesamiento y por último, cada trabajo debe someterse a cambios o modificaciones en diferentes máquinas para ser terminado.

El *Job Shop* consiste en un conjunto de n trabajos en m máquinas, cada trabajo es procesado en una máquina de acuerdo a la secuencia de operaciones, además la secuencia final de las operaciones es independiente de los tiempos de procesamiento de cada una de las tareas. Generalmente, se ha encontrado que las investigaciones determinan como criterio de optimización para este problema la minimización de la función regular de optimización, *makespan* (Correa Espinal et al., 2008).

Un número considerable de investigaciones durante varias décadas han sido enfocadas en solucionar el problema de las configuraciones de planta tipo Flexible Job Shop (FJS), el cual es un problema genérico correspondiente al problema Job Shop; por años, numerosos métodos han sido propuestos para resolver diferentes instancias del problema. Recientemente muchos de esos acercamientos se han concentrado en técnicas ya existentes como algoritmos interactivos de búsqueda local o meta heurísticas (Correa Espinal et al., 2008). Sin embargo se ha establecido un problema más genérico para el *Job Shop Scheduling Problem*, llamado *Flexible Job Shop Scheduling* (FJSSP) por lo que es una representación realmente aproximada a los sistemas de manufactura actuales, dado la posibilidad de la configuración de centros de trabajo en la planta, que constituye un conjunto de máquinas que pueden ejecutar una de las operaciones específicas de los trabajos, por lo que el FJSSP es más complejo que el JSSP, por que la meta de la secuenciación es escoger una asignación para cada una de las operaciones de los trabajos a alguna máquina del conjunto (Correa Espinal et al., 2008)

Las decisiones de *Scheduling* en talleres de trabajo suelen ser un proceso complejo y de vasta experiencia. Es por esto que procedimientos de la simulación, soportan los análisis y dan la información necesaria al tomador de decisiones para lograr enrutamientos, asignación de

recursos o máquinas para el procesamiento de tareas en el taller. La Figura 4 expone las técnicas de solución usadas en el Job Shop expuestas por Álvarez et al. (2011).

Tabla 4. Técnicas de Solución para *Job Shop Scheduling*

TÉCNICA		VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Formulación Matemática	Los problemas pueden ser resueltos óptimamente.	Solo son capaces de resolver instancias altamente simplificadas en un lapso de tiempo razonable. El número de variables enteras crece exponencialmente. Una formulación de programación entera para problemas de Scheduling computacionalmente infactible
Técnica de Aproximación	Reglas de prioridad	La facilidad de su implementación y su requerimiento computacional. Las reglas de prioridad son más convenientes como una técnica para solución inicial que para ser considerada; como alternativas de solución del JSP.	Los resultados se logran muy rápido, pero se pueden desviar hasta un 74% del Optimo y en general la calidad de la solución se degrada en la medida en que la dimensionalidad del problema se incrementará. Las reglas individuales se desempeñan pobremente y no proveen ninguna solución respecto al makespan.
Técnicas de Búsqueda Local	Búsqueda Tabú Recocido simulado Algoritmos genéticos	Proveen buenas soluciones y ofrecen posibilidades de ser potenciados cuando se combinan con otras heurísticas.	Requiere que muchos parámetros sean cuidadosamente refinados y apropiadamente ajustados por cada problema. El excesivo tiempo computacional necesario para alcanzar buenas soluciones.
	Simulación	Es una herramienta flexible y poderosa bajo condiciones reales. Permite reducir la dimensión de los problemas de Scheduling al contemplar principalmente los recursos que restringen el flujo.	Dan pobres resultados debido a las dificultades que tienen con los operadores de cruce y la codificación de cronogramas Requiere una gran cantidad de conocimiento. Como es una filosofía, su implementación requiere de cambios importantes en la organización.
	Teoría de restricciones		

Fuente: Tomado y modificado de Álvarez et al. (2011)

Es evidente que existe una flexibilidad marcada entre la configuración FJSSP comparada con la *Job Shop* (Amjad et al., 2018). Esta ventaja se puede ver en la diferencia de los procesamientos de varios tipos de partes, ya sea en el enrutamiento o secuenciación, las cuales ya fueron nombradas. La flexibilidad ha sido introducida en la configuración JSSP de diferentes formas. Inicialmente, algunos autores definían FJSSP como maquinas con varios propósitos equipadas con herramientas que permitan desarrollo. También, otros autores argumentaron que un JSSP puede ser convertido en FJSSP mediante la incorporación de múltiples instancias de una sola máquina donde un cuello de botella se encuentra durante el proceso de programación y procesamiento (Amjad et al., 2018). Por último, otros autores argumentaron que la flexibilidad en este patrón de flujo se presenta cuando una maquina está disponible para realizar más de una operación.

La literatura a través de distintos autores como (Amjad et al., 2018) clasifican el *Flexible Job Shop Scheduling Problem* (FJSSP) en diferentes tipos; total FJSSP, donde en este tipo, una operación puede ser procesada en cualquier máquina que se encuentre disponible, por lo tanto la flexibilidad se ha aplicado para este patrón de flujo y partial FJSSP, donde algunas tareas pueden ser procesadas en algunas máquinas especificadas y las restantes deben procesarse en las maquinas las cuales fueron asignadas. Otros autores señalan que FJSSP sigue dos tipos; tipo I en el cual los trabajos que van hacer procesados tienen diferente secuencia de operación e incertidumbre si son idénticas o no las máquinas para cada operación. En este tipo, el reto es encontrar la secuencia de operaciones y el orden de procesamiento de los trabajos, y el tipo II, donde los trabajos bajo consideración tienen una secuencia de operación fija (Amjad et al., 2018).

1.5 Consideraciones adicionales en problemas de *Scheduling*

Después de generar un *Schedule* o cronograma empiezan las operaciones de manufactura y como es esperado por los supervisores e ingenieros, el proceso debe funcionar de acuerdo a lo programado. No obstante, y aunque el proceso debería seguirse en línea con el *Schedule*, el personal experto siempre espera algunas desviaciones en las horas de inicio de los programas y los tiempos de finalización, pero, usualmente se ignora. Es allí de acuerdo a la necesidad y a las reglas de prioridad establecidas desde el inicio, donde se deben tomar decisiones en este nivel operativo; adelantar otras tareas de tiempo de procesamiento más corto, programación de la maquinas por más Horas/Día o alguna otra modificación que se considere pertinente. Sin embargo, las grandes desviaciones pueden causar perturbaciones mayores y se dan desde el cronograma inicial (Herrmann, 2004). Es por esto que la reprogramación es un recurso clave para entender los sistemas de *Scheduling* de producción (Herrmann, 2004).

Hay muchos tipos de perturbaciones o problemas que pueden alterar un cronograma de producción, incluidas las fallas de la máquina, los retrasos en el procesamiento, las órdenes

urgentes, los problemas de calidad y el material no disponible para procesar. En este campo, una decisión de *Scheduling* se hace necesaria, la cual puede ser una reprogramación al cronograma ya existente para realizar actualizaciones a la línea de trabajo y otorgar nuevos tiempos de procesamiento a las tareas que están en espera (Herrmann, 2004). A medida que pasa el tiempo y la aparición de eventos inesperados se hace más habitual, el seguimiento de un horario establecido se vuelve más complejo y se deberá decidir sobre la escogencia de otros métodos de medición y control en el taller de trabajo. A continuación, la Figura 8 muestra el proceso de un taller de trabajo tradicional con Scheduling aplicado desde una perspectiva de análisis y retroalimentación de un sistema de control de la producción, tomado de Herrmann (2004):

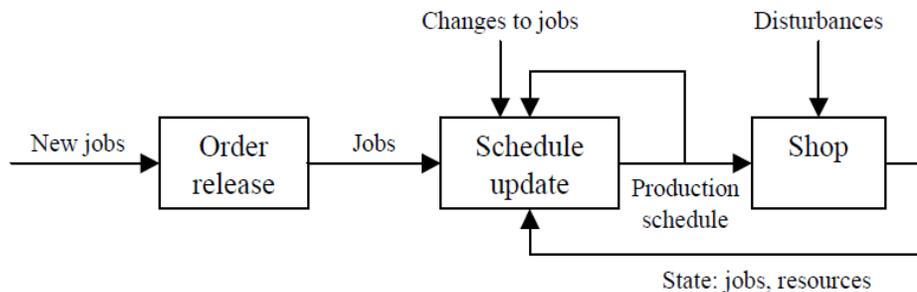


Figura 8. Programación de la producción para un sistema de control.

Fuente: Tomado de Herrmann (2004)

Aunque parece un sistema simple, los mecanismos para detectar el estado de manufactura o fabricación y generar cronogramas actualizados no pueden ser expresados como funciones matemáticas. Además, la aleatoriedad de los eventos e interrupciones que puedan presentarse durante el proceso complica una programación exacta. Por esto Herrmann (2004), sugiere ver este proceso como un tomador de decisión para la creación de un plan (programación de la producción).

1.5.1 Flexibilidad del problema de *Scheduling*

La rapidez es un nuevo pilar de competitividad en las organizaciones. La entrega de pedidos, capacidad de procesamiento y diseño e introducción de los productos es muestra de ello. Es por esto que la *flexibilidad* en este tipo de organizaciones y sistemas va transformándose en un requisito necesario y un objetivo más a alcanzar (Higueta, 2009).

Flexibilidad es la capacidad de respuesta a diferentes cambios que se puedan presentar, es por esto, que un sistema *Scheduling* debe ser diseñado con capacidad de reacción para adaptarse a nuevas modificaciones que sean necesarias para mejorar su funcionamiento. De esta forma, la inversión en tecnología y personal especializado es crucial, permitiendo variedad de productos y mejorando estándares de calidad (Higueta, 2009).

Los problemas que tienen que enfrentar los administradores del proceso son de más sencillo manejo si el sistema adoptó un pilar de flexibilidad para responder de manera óptima a las circunstancias cambiantes. Es por esto, que el diseño de los nuevos sistemas *Scheduling* y sistemas industriales modernos son caracterizados por la rapidez en el cambio de la mezcla de la producción y una cantidad creciente de los procesos automatizados. Por consiguiente, la inversión para fabricar los sistemas está subiendo y se hace necesaria para lograr competitividad a nivel mundial (Higuita, 2009). Por ejemplo, el diseño de un taller de trabajo que implementó *Scheduling* en sus líneas, se enfrenta a los tipos de problemas que son nombrados al inicio este artículo; es por esto, que la flexibilidad en uno de ellos (asignación) debe ser tenido en cuenta por el programador ya que con la flexibilidad del abastecimiento y de la maquinaria, dependerá de las estrategias que se presenten con el diseño de la planificación y control de la producción. El desarrollo de sistemas como el JIT (justo a tiempo), MRP (planificación de las necesidades de materiales u OPT (tecnologías de producción optimizada) han traído consigo una mayor flexibilidad asociada a la rapidez de la reprogramación para adaptar la planificación a los cambios que van surgiendo a lo largo del tiempo (Higuita, 2009).

Son muchas las medidas que se pueden adoptar de diferentes procesos para lograr y aumentar flexibilidad; entre esas está la automatización. La automatización ha sido usada como medio para aumentar la flexibilidad y su éxito la respalda (Higuita, 2009). Otros medios usados para alcanzar este pilar fundamental en los talleres de trabajo son la reducción de tiempos de holgura, de lanzamiento, la capacidad flexible la cual desarrolla un mecanismo de adaptabilidad de acuerdo al comportamiento del mercado, mano de obra y demanda de la empresa (Higuita, 2009).

Uno de los tipos de flexibilidad presentes en las configuraciones de flujo en los talleres de trabajo es Flexible Job Shop *Scheduling* Problem FJSSP, el cual es un tema abordado por varios autores en la literatura y que sigue siendo motivo de investigación y nuevas actualizaciones. Por ejemplo, Correa Espinal et al. (2008) señala que este tipo problema puede ser definido por diferentes condiciones las cuales las denota; hay n trabajos y estos trabajos son independientes entre ellos, cada trabajo tiene una secuencia de operación, denotada por J_i , cada trabajo consiste de una o más operaciones, cada secuencia de operación está ordenada por un juego de operaciones hay m máquinas con subíndice k (El k ésima máquina es denotado por mk), para cada operación, hay un juego de máquina s capaces de cumplir con la función objetivo y los tiempos de procesamiento de una operación en una máquina es mayor que cero. En complemento, definimos el problema del *Flexible Job Shop Scheduling Problem* (FJSSP) como una generalización del clásico problema de Job Shop, donde se determina y se optimiza de acuerdo a un criterio, las rutas de los trabajos, por lo que significa decidir, la ruta para cada operación, en que máquinas a ser procesadas y la disponibilidad de las mismas, optimizando esa secuencia. Varios procedimientos heurísticos (reglas de despacho, búsqueda local y metaheurísticos) han sido utilizado en las

investigaciones de acercamiento a la configuración de este tipo de planta como son: búsqueda tabú (*tabú search*, TS), enfriamiento simulado (*simulated annealing*, SA) y algoritmos genéticos (*genetic algorithm*, GA) han sido desarrollados en los últimos años para FJSSP. Las soluciones de este tipo de problemas pueden ser clasificadas en dos categorías; planteamientos jerárquicos y planteamientos integrados.

1.5.2 Tiempos de alistamientos

En la asignación, secuenciación y procesamiento de tareas de trabajo en diferentes máquinas o dispositivos, son analizadas diferentes variables por los programadores o administradores de proceso. Una de las variables de análisis y estudio las cuales son objeto de constante intervención para optimizarlas, son los diferentes tiempos gastados dentro del funcionamiento del taller de trabajo, puesto que estas variables de medidas sirven para estudiar la efectividad y eficacia del proceso dentro del taller de trabajo. Esto es realmente importante, puesto que estas variables de desempeño medibles pueden ser analizadas para su posterior mejoramiento (Van Goubergen y Van Landeghem 2002). En efecto, uno de los tiempos para tener en cuenta durante el procesamiento de las tareas son los tiempos de cambio o re cambio para continuar con la normalidad del proceso. Este tiempo de alistamiento o *changeover time* dentro del taller se define como el transcurrido entre el último producto ("A") que sale de la máquina hasta que sale el primer producto bueno ("B"). Otros autores como McIntosh, et al. (1996) lo definen como el proceso completo de cambio entre la fabricación de un producto a la fabricación de un producto alternativo, hasta el punto de cumplir con las tasas de producción y calidad especificadas. Lo ideal con esta variable de *Scheduling* y lo que buscan los métodos heurísticos es lograr una reducción de este tiempo para que las máquinas puedan procesar más partes (Van Goubergen y Van Landeghem 2002). Un cambio incluye el agotamiento, la configuración y el funcionamiento de la máquina. La configuración se define como el tiempo requerido para preparar la máquina para el producto "B" y se realiza cuando la máquina no está en funcionamiento (Duncan, 2011).

En síntesis, las actividades de alistamiento consisten en todas las tareas necesarias para completar un cambio. Esto incluye tareas internas y externas, las cuales son resumibles en 4 procedimientos básicos según (Duncan, 2011); Preparación, ajuste posterior al proceso, revisión de materiales y herramientas. En este proceso el autor indica que se deben ubicar todas las piezas y/o herramientas garantizando que éstas se encuentren en la posición correcta. También incluye guardar las herramientas después de que la configuración haya finalizado. Segundo, está el montaje y remoción de partes y herramientas: En este procedimiento, el autor señala que se deben remover todas aquellas partes y herramientas no necesarias para el siguiente proceso, ajustando las nuevas herramientas y/o repuestos para el proceso entrante. Tercero, las mediciones, ajustes y calibraciones: En este paso, se llevan a cabo todas las calibraciones, mediciones y configuraciones necesarias para la operación de producción que va a llevarse a cabo y por último, ejecuciones de prueba y ajuste: En este último

procedimiento definido por el autor, se llevan a cabo mediciones y calibraciones después de haberse desarrollado una prueba.

Durante años, la literatura ha reflejado el trabajo de autores que han desarrollado métodos o técnicas para minimizar los tiempos de alistamiento. Por ejemplo, trabajos de investigación como es el caso de Duncan (2011) son enfocados en buscar estrategias para minimizar estos *changeover times*. Sin embargo, es necesario comprender que, para la intervención y estudio de estas variables, es necesario entender algunos términos usualmente usados en la literatura publicada por los investigadores de este tema. En ese sentido, es necesario comprender la diferencia entre *set up reduction* o configuración de la reducción y la *changeover reduction* o reducción del tiempo de cambio. El primero hace referencia al tiempo inactivo de las maquinas en el talle mientras el segundo de forma más general, hace referencia a todo el proceso involucrado de un producto determinado a otro (Duncan, 2011).

Continuando con lo referente a los métodos usados para reducción de los tiempos de alistamiento, se han desarrollado dos enfoques principales para reducir cambios. El primero se conoce como la modificación por diseño y metodología y el segundo se conoce como el enfoque en el diseño de un nuevo sistema (Duncan, 2011). El primer enfoque nombrado, modifica el diseño del sistema de cambio y las metodologías utilizadas para lograr el cambio. Por ejemplo, mejorar la eficiencia de los métodos mediante los cuales se obtienen los accesorios y matrices para *set up*. Mientras que una mejora basada en el diseño consistiría en rediseñar los accesorios y matrices para que puedan configurarse más rápido y obtenerse esta reducción. Por otro lado, el segundo enfoque hace referencia al diseño de un nuevo sistema el cual consiste en una revisión completa del sistema existente. Se entiende que el diseño de un nuevo sistema consumiría más tiempo y sería más costoso, pero se puede lograr una reducción mucho mayor en el tiempo de alistamiento. Por el contrario, la modificación por el enfoque de diseño y metodología tendría un costo de inversión y tiempo más bajo pero la reducción general en la variable sería menor (Duncan, 2011).

El mismo autor señala que las empresas manufactureras tradicionales, lidiaban con los largos tiempos de configuración de diferentes formas. Para lidiarlo adoptaron estrategias como efectivas; la primera fue introducir elementos comunes a las configuraciones que permitieron que el proceso de configuración permaneciera algo constante de un trabajo a otro. La segunda fue aumentar el tamaño del lote, lo que disminuye la relación entre el tiempo de preparación y la cantidad de piezas producidas. Sin embargo, investigadores japonés descubrieron que el aumento en el tamaño de los lotes tenía varias desventajas y era necesario reducir el tiempo de configuración para mantener un bajo tamaño de los lotes (Duncan, 2011). Así mismo, Por más de 15 años, se desarrollaron metodologías investigativas, las cuales arrojaron observaciones importantes; Su principal conclusión fue que las operaciones de configuración debían distinguirse como operaciones internas o externas dentro del taller trabajo. Las operaciones internas se realizan mientras la máquina se está ejecutando en el procesamiento

de tareas y las externas se ejecutan mientras la máquina no se está ejecutando. Las tareas como la recolección de matrices, accesorios, plantillas y sus dispositivos de sujeción deberían hacerse mientras la máquina todavía está trabajando. Estas observaciones y análisis dieron resultado a investigadores como Shigeo Shingo, un ingeniero industrial japonés que redujo el tiempo de configuración de una prensa de 1,000 toneladas de cuatro horas a noventa minutos (Duncan, 2011).

Es preciso reconocer que la reducción de los tiempos de alistamiento de los productos está directamente relacionada con un sistema de fabricación conocido como *Lean Manufacturing* (Duncan, 2011). Además, y como es de suponerse, estas actividades de reducción caen en la categoría de actividades que no agregan valor a el producto final y, por lo tanto, se deben realizar intentos para eliminar o reducir estos tiempos de alistamiento. Esta variable del proceso tiene un vínculo directo con los resultados de un cronograma realizado efectivo; por lo tanto, será necesario considerar los dos si la decisión de reducir los cambios en busca de optimización y eficacia se quiere llevar a cabo. El mismo autor propone una explicación para entenderlo de mejor manera, sugiere considerar la cuestión de la reducción de inventarios, que tiene un efecto directo en el tiempo de entrega. En segundo lugar, dado que es deseable maximizar la utilización de los recursos, también es conveniente crear un cronograma que reduzca el número de cambios que se deben realizar a lo largo del día afectando así el tiempo de trabajo (Duncan, 2011).

Grandes son los efectos que tiene la reducción de tiempos de alistamiento en el taller de trabajo (Duncan, 2011). La literatura referencia una metodología de agrupación por pares; donde al agrupar los trabajos en pares, el tiempo total de cambio para el producto será reducido. Este método de emparejamiento permanente de trabajos tendrá un efecto directo en el tiempo de alistamiento. Al implementarse este método se espera reducir el tiempo al cual el producto final estará esperando cambios, por lo tanto, de esta forma es posible reducir el tiempo de entrega del producto al cliente. En la actualidad, los componentes de un producto se están modificando con componentes de otro producto diferente, lo que significa que ambos productos esperan cambios y suman un tiempo de espera. Si los trabajos están emparejados, los componentes del producto A se configurarán con otros componentes para el producto A. En otras palabras este método referenciado por Duncan (2011) afirma que dado los componentes o herramientas para un producto, esto se configurarán con otros componentes que pertenecen al mismo y de esta forma no estarán en espera de otros componentes pertenecientes a otros productos durante el proceso de configuración. Por lo tanto, el tiempo de alistamiento total para un producto se reducirá a la mitad. En caso que de esta forma no se logre una reducción en el tiempo de alistamiento, lo que si reduciría es el tiempo de entrega al cliente, variable de mucha importancia para el logro de objetivos propuestos en las organizaciones. La Figura 9 muestra lo que el autor refiere en su publicación.

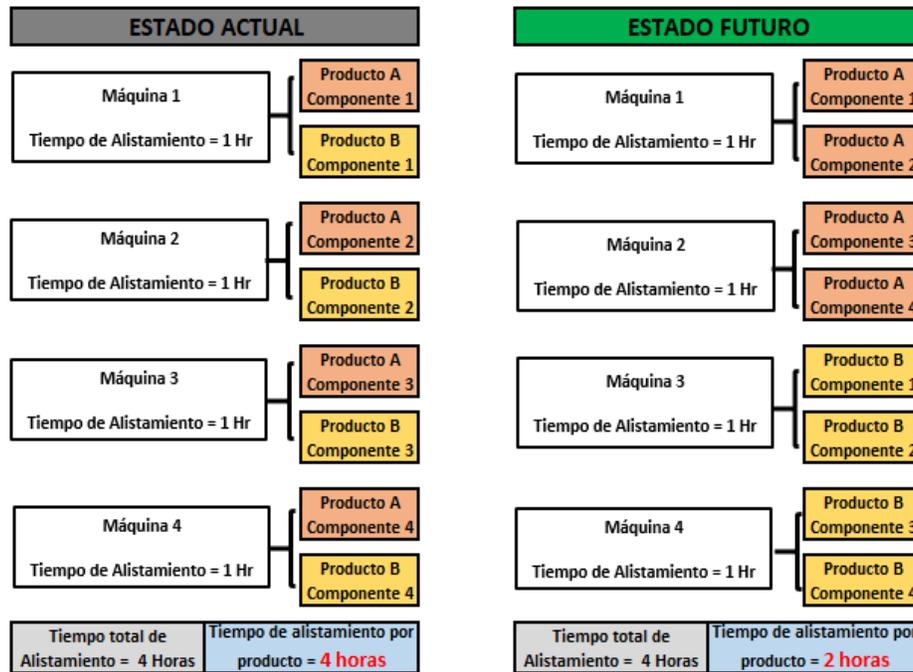


Figura 9. Emparejamiento de productos
Fuente: Tomado y adaptado de Duncan (2011)

Haciendo la comparación entre un proceso actual y un proceso deseado o futuro, se logran diferencias. Al tener las mismas cuatro máquinas en el taller de trabajo y dos productos ejecutándose, se muestra que para el proceso sin modificaciones de diseño ni metodología “*current state*” el tiempo de alistamiento general y por producto es de 4 horas. En contra parte, después de la implementación del método de emparejamiento por trabajos, se evidencia que se mantuvo el mismo tiempo de alistamiento general, pero se llegó a una reducción de 2 horas del tiempo de alistamiento por producto, es decir, se logró reducir este tiempo en un 50% respecto al proceso que se estaba desarrollando antes del cambio.

1.5.3 Rutas lineales y no lineales

El procesamiento de tareas en un taller de trabajo tiene varios componentes que le adicionan o no valor, hasta llegar como producto terminado. Los recursos (físicos, maquinaria, materia prima), cronogramas y demás elementos dentro del *Scheduling* son necesarios para llevarse a cabo la tarea. Además de esto, es claro comprender la ruta de procesamiento que la operación o tarea tiene intrínsecamente. Entiéndase una ruta como la información que describe con precisión un conjunto de operaciones necesarias para llevar a cabo un producto terminado. Es decir, elementos tales como como número de máquina, tiempo de procesamiento, herramientas, condiciones particulares, etc. Además, dentro de este documento se encuentra valiosa información como el orden de las operaciones para ser procesadas y algunas veces, en colaboración con un gráfico de procedencia (Vincent T’kindt, 2001). La relación de procedencia entre operaciones indica que el inicio de una operación puede o está condicionada por el final de su procesora (Algunas veces está condicionada por

el final de todas las operaciones precesoras) (Vincent T'kindt, 2001). Es importante entender que el enlace de dos operaciones por una relación de procedencia puede ser de dos trabajos diferentes y así mismo, dos operaciones sucesivas en una ruta indican que existe un flujo de material entre dos máquinas o entre conjuntos de las mismas (Vincent T'kindt, 2001).

Incluir operaciones a una ruta ya determinada o también llamado enrutamiento de operaciones, puede adoptar múltiples caminos para lograr su desplazamiento dentro de las líneas de trabajo del taller de flujo. Es decir, el enrutamiento de las tareas a procesar no debe ser necesariamente lineales ya que una operación puede tener más de un predecesor y más de un sucesor durante la ruta (Dauz, 1998). Por ejemplo, sistemas de ensamble y/o desarme de piezas.

Conociendo que la duración de éstas operaciones que se desarrollan en los talleres dependen de los recursos asignados y que estos recursos son dependientes de los tiempos procesamiento, algunos autores consideran 3 tipos de extensión en el problema estándar de programación o Scheduling; Los multi-recursos, la flexibilidad de los recursos y las rutas no lineales. El primero, considera que una operación puede requerir de varios recursos para ser procesada. El segundo, señala que un recurso puede ser seleccionado de un conjunto de éstos y la tercera la cual son las rutas no lineales, señala que a pesar que un Job Shop común tiende a ser lineal, en este caso el número de sucesores o predecesores puede ser mayor a uno (1) (Dauz, 1998). Dentro de la literatura ha sido complejo encontrar puntos similares entre las 3 extensiones nombradas, es por esto que publicaciones como las de Dauz (1998), arrojan conclusiones como la dificultad de evaluar la calidad de las soluciones obtenidas en un estudio de 140 operaciones donde la mitad tiene rutas lineales y la otra mitad rutas no lineales.

Las rutas lineales y no lineales llevan comportamientos relevantes para el procesamiento de las operaciones dentro del taller. El tiempo de finalización de operaciones y la dependencia entre las mismas, son algunas de las características que se pueden evidenciar en estos modelos. A continuación, las Figura 10 y la Figura 11 representan la estructura de rutas lineales y no lineales en la secuenciación de pedidos en un taller de trabajo.

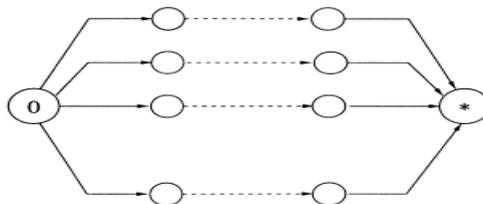


Figura 10. Estructura de una ruta lineal
Fuente: Tomado de Dauz (1998)

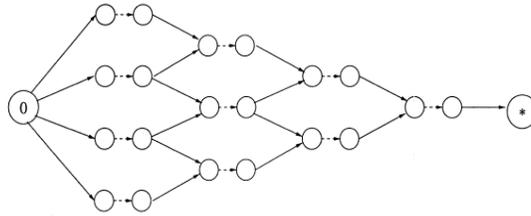


Figura 11 Estructura de una ruta no lineal
Fuente: Tomado de Dauz (1998)

En la Figura 10 se evidencia el comportamiento de una ruta lineal en un taller de trabajo. Existe un nodo el cual llamaremos inicial o de partida, desde el cual parte el procesamiento de las tareas a través de una secuencia y un cronograma ya dado. Se puede observar que, para este tipo de ruta de carácter lineal, el tiempo de inicio de una operación es dependiente del tiempo final de un solo precesor el cual esta enlazado y debe terminarse para continuar con la secuenciación de las operaciones posteriores. Por otra parte, la Figura 11 muestra la estructura de una ruta de comportamiento no lineal. Como se venía mencionando, dentro de esta estructura existe información y recursos relevantes para el procesamiento de las tareas. Entre esas, se evidencian relaciones de procedencia entre las operaciones, las cuales se hace necesario respetar para culminar con el proceso en el taller de trabajo, dando así un producto terminado denotado como el nodo (*).

1.5.4 Otras consideraciones

Además de las técnicas de solución y demás elementos nombrados a lo largo de este estado del arte que soportan las decisiones de los supervisores e ingenieros del proceso, se ha desarrollado otros métodos de solución como programas especializados para apoyar el trabajo humano, estos son Sistemas Expertos (SE). Como se referenciaba, los SE son herramientas computacionales que apoyan las decisiones de las organizaciones. También conocido como sistemas basados en conocimiento, capaz de simular procesos de memorización, razonamiento, comunicación y acción de un humano experto en un determinado campo de conocimiento (MORA, 2015). Esta herramienta computarizada es de suma importancia si se quiere solucionar problemas en determinado campo, apoyo brindando para la toma de decisiones y ejecución de trabajos de acuerdo a la información cargada en su computador.

La construcción de un SE es denominada como ingeniería del conocimiento y es el cargue de información por parte de un especialista humano y constante supervisión y control por parte de ingenieros a cargo. Posterior, se realiza la codificación que permite manipular el conocimiento almacenado para buscar soluciones. En general, un Sistema Experto está compuesto por una base de conocimiento la cual tiene la capacidad diferenciar una situación específica. Un motor de inferencia la cual contiene algoritmos que sugieren posibles soluciones, un módulo de explicación lo cual explica y justifica el razonamiento que se

desarrolló para la toma de esa decisión, una memoria de trabajo la cual guarda registros de trabajo y conclusiones del trabajo y una interfaz para el usuario por donde el usuario interactúa con esta potente herramienta. La Figura 12 presentada por Álvarez et al. (2011) muestra de manera global la composición de un Sistema Experto *SE*.

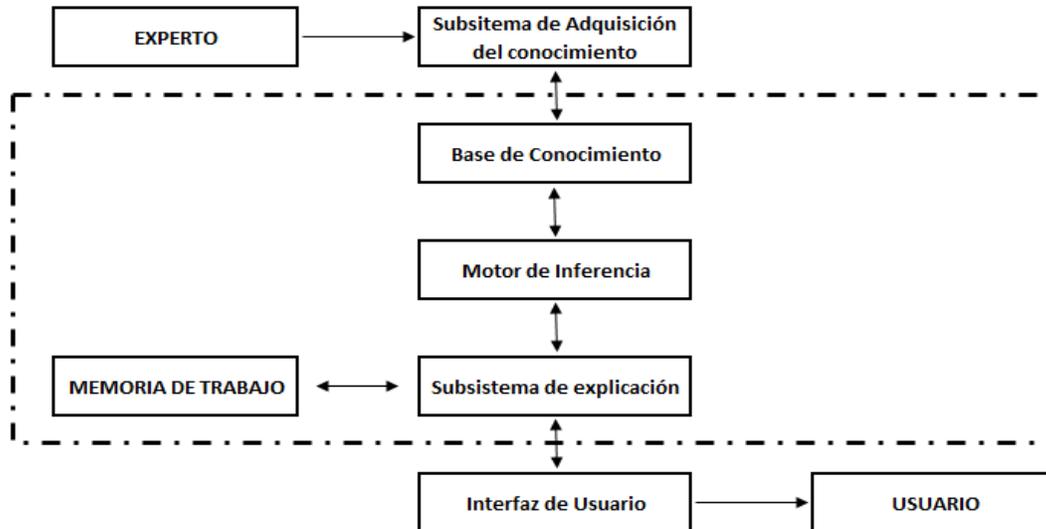


Figura 22. Sistema Experto

Fuente: Tomado de Álvarez et al. (2011)

Después de algunas pruebas de validación y cargue de información al SE el cual nos ayudara de soporte y apoyo a la toma de decisiones, es preciso concluir que, según las necesidades, características y objetivos particulares de cada empresa, esta herramienta computarizada es la mejor forma de ayuda para sugerir las mediciones y técnicas de desempeño para realizar *Scheduling*. Con esto, ayudaría a la persona “No-experta” a realizar las mediciones y técnicas que el programador experto haría (Álvarez et al., 2011).

1.6 Complejidad en la optimización de criterios

Como es bien sabido, la optimización de los procesos mediante cualquier método matemático o de ingeniería es necesario para el cumplimiento de los requerimientos del cliente y de los objetivos de la empresa. Para lograrlo, la necesidad de establecer unos criterios para su desarrollo se hace indispensable; la literatura a lo largo de los años viene arrojando diversas rutas para lograrlo. Por ejemplo, en la optimización de estos criterios, se destaca que la optimización multiobjetivo es más compleja que la optimización objetiva única, debido al hecho de que la minimización de dos o más funciones puede conducir a una situación donde la disminución de una función más puede causar que la otra función aumente (Amjad et al., 2018)

Desde un punto de vista práctico, la diferencia entre un criterio y una restricción solo es evidente para quien toma las decisiones en una organización o quien inicia un cronograma calculado por un algoritmo (Vincent T’kindt, 2001). El autor afirma que cientos de criterios

son equivalentes y es por eso que se presentan conjuntamente. Minimizar uno u otro conduce a la misma solución óptima, incluso si el valor del criterio no es el mismo en los dos casos. En algunos casos prácticos de programación, no hay ningún criterio para minimizar. En este caso, estamos desaprobando un problema de viabilidad, también llamado problema de decisión, es donde el analista debe razonar sobre si existe una solución que satisfaga las restricciones y el norte de investigación.

Es posible clasificar los criterios en la programación de producción de acuerdo a dos grandes clases; *minimax*, la cual va a representar el valor máximo de un conjunto de funciones que van a ser minimizadas y el cual es más frecuente en la literatura. En adición y dentro de esta clase de criterio, es importante mencionar el más común en la literatura de Scheduling y programación de talleres; el C_{max} o también llamado *makespan* el cual es definido como la duración total o la duración de un cronograma, es decir, es el tiempo de finalización del último trabajo programado. En ese sentido, existen otros criterios que hacen parte de esta primera clase nombrada, los cuales son muy comunes en la literatura pues son objeto de numerosas investigaciones para su optimización (Vincent T'kindt, 2001). Estos son F_{max} , el cual es definido como el tiempo máximo gastado en el taller de trabajo y el I_{max} , el cual es la sumatoria de los tiempos muertos o tiempos ociosos dentro del taller.

Por otro lado, la segunda grande clase es la *minisum*, la cual va a representar una suma de funciones para ser minimizadas (Vincent T'kindt, 2001). El autor plantea que los criterios de *minisum* generalmente son más difíciles de optimizar que los criterios pertenecientes a la familia *minimax*. Esto se confirma desde un punto de vista teórico para ciertos problemas. En este grupo, el autor en su publicación Vincent T'kindt (2001) menciona 6 notaciones; \bar{C} la cual representa el tiempo promedio de terminación o el tiempo total de finalización de los trabajos, \bar{C}_w en donde este criterio representa el tiempo promedio de finalización ponderado o el tiempo total de finalización ponderado de los trabajos, \bar{F} en la cual la optimización de este criterio es equivalente a optimizar el criterio \bar{C} , \bar{T} donde este criterio designa el promedio de la tardanza o el total de la tardanza de los trabajos, \bar{U} el cual representa el número de trabajos tardíos en el proceso y \bar{E} el cual denota el promedio de los trabajos tempranos o precocidad de los mismos.

Múltiples dificultades en la implementación de heurísticas y de criterios se han hecho presentes. Es por esto, que es fundamental considerar y adoptar una capacidad de reacción rápida para suplir y sobrepasar el inconveniente que se presente en el taller de trabajo. Supóngase en un entorno ideal que se cuenta con todas las máquinas sin averías, pedidos organizados según criterios ya determinados y personal capacitado para llevar a cabo su operación. Al enviarse el primer pedido hacia la primera máquina, se inicia el tiempo general de producción, sin embargo, si la programación de la producción no fue acertada, las materias primas e inventario pueden agotarse produciendo demoras y posibles incumplimientos al

cliente. Contar con materias primas en el curso de la planificación y programación de fabricación es inevitable para obtener planes de producción factibles (Györgyi & Kis, 2018). El autor también afirma que, dado que las piezas pueden requerir materias primas comunes para su producción, no es obvio cómo asignar los suministros a las partes para producir.

Como se ha descrito durante todo el estado del arte, por más de 20 años, múltiples y numerosos estudios e investigaciones se han publicado para optimizar los procesos industriales en los talleres de trabajo. Independientemente del patrón de flujo que se establezca por el programador o ingeniero del proceso y el tipo de problema *Scheduling* al cual se va a tratar, la complejidad en la optimización por maximizar o minimizar los criterios que fueron mencionados en este espacio estará presente. Del mismo modo, es lógico notar que las soluciones, planificaciones, construcción de cronogramas de trabajo y toma de decisiones realizadas por estos administradores están expuestas a adversidades que se pueden presentar debido a la incertidumbre clásica de los tipos de problema de *Scheduling*. Es por esto, que la planificación correcta al momento de implementar un nuevo método, puede amortiguar posibles cambios bruscos que puedan afectar los procedimientos normales en los talleres de trabajos.

2. Casos empíricos basados en las decisiones de Scheduling

Pese al grado de complejidad presente en la implementación de estrategias para evaluar criterios de interés, el *Scheduling* ha sido la respuesta para mejorar los procesos y aumentar las ganancias en organizaciones alrededor del mundo. En este espacio, se mencionan referentes de éxito en la implementación de *Scheduling* en sus líneas de trabajo, junto a las estrategias y procesos internos desarrollados para poder aplicar algoritmos cuya respuesta es clave para alcanzar los objetivos propuestos en la organización.

2.1 Criterios de optimización con referentes

La mayoría de los problemas de programación son complejos combinatorios y muy difíciles de resolver. Es por eso que muchos métodos se centran en la optimización según un único criterio (*makespan*, cargas de trabajo de máquinas, tiempos de espera, etc.). La combinación de varios criterios induce complejidad adicional y nuevos problemas (Kacem, Hammadi, & Borne, 2002). Entre otras dificultades que se pueden presentar en la aplicación de los procedimientos y métodos heurísticos para minimizar la carga de trabajo en las máquinas, autores refieren que para resolver la programación de trabajos en máquinas paralelas con una carga de trabajo total mínima se han desarrollado varios tipos de algoritmos de inserción paralela. Sin embargo, esta solución puede implicar una carga de trabajo desequilibrada en todas las máquinas y luego aumentar el *makespan*, el cual no es un criterio favorable para el proceso (Chung, Yang, & Kao, 2012). Otra gran variedad de problemas que surgen en el diseño y operación de sistemas de ingeniería requieren la optimización simultánea de más de una función objetivo. Una solución que optimiza todos los objetivos es muy probable que no exista, por lo tanto, necesitamos encontrar soluciones que contravengan los diferentes objetivos. Este tipo de problemas se conocen como problemas de optimización multiobjetivo,

multicriterio o vector, que consisten en dos o más funciones objetivas conflictivas con un conjunto de restricciones tomadas en consideración. La optimización de estos problemas es identificar el conjunto de soluciones óptimas de Pareto (J. C. Osorio, Lasso, & Ruiz, 2012).

El cumplimiento de logros propuestos en los talleres de trabajo con *Scheduling* pueden alcanzarse de diferentes formas. Una buena planeación en la formulación matemática si así se considera, trae consigo algunas particularidades, tal como se aprecia, estas variables pueden tener objetivos encontrados, y la solución óptima para una, muchas veces genera conflicto con las otras. Ello hace necesaria la búsqueda de una solución que satisfaga al sistema, y no a sus elementos de manera aislada (J. C. Osorio et al., 2012). Al encontrarse que las variables puedan tener conflicto, no hay un valor de x que minimice todos los objetivos de manera simultánea, por lo cual se requieren métodos diferentes. Se define entonces un problema multiobjetivo de *Scheduling*, al problema que consiste en calcular un programa que satisface varios objetivos en conflicto (J. C. Osorio et al., 2012). Es allí donde el mismo autor presenta enfoques para la solución de problemas multiobjetivo. Uno de ellos es el enfoque simultáneo (Pareto) cuyo propósito es generar o aproximar en caso de utilizar métodos heurísticos el conjunto completo de soluciones eficientes.

En la mayoría de los problemas de optimización combinatoria, debemos optimizar al mismo tiempo un conjunto de funciones objetivas en conflicto. La literatura presenta muchas consideraciones y técnicas posibles que pueden ser útiles para evaluar soluciones. Principalmente, podemos distinguir dos clases: los enfoques de optimización paretiana y los enfoques sin optimización paretiana (Kacem et al., 2002). El mismo autor refiere una formulación para los problemas de optimización multiobjetivo. Sin embargo, como ha sido señalado en varias ocasiones, no existe una solución exacta a tal problema. Como una de las nociones de optimización multiobjetivo más conocidas, el concepto de optimización paretiana se ha utilizado intensamente en la literatura y ha contribuido significativamente en la elaboración de un gran número de conceptos para la literatura (Kacem et al., 2002). Este concepto se espera en los problemas de optimización multiobjetivo para proporcionar flexibilidad y un amplio conjunto de opciones para el tomador de decisiones en los talleres de trabajo. Las soluciones incluidas en el conjunto óptimo de Pareto son aquellas que no se pueden mejorar en ninguna dimensión sin que se deterioren simultáneamente a lo largo de otras dimensiones. Kacem et al. (2002), señala 3 aproximaciones para la formulación de la optimización noción de Pareto. La primera, es que la optimización de Pareto está constituida por nociones no dominadas, la segunda es que una solución es no-dominada si no está dominada por ninguna otra, y la última se muestra como x domina y si $\forall 1 \leq q \leq L, f_q(x) \leq f_q(y)$ y al menos un índice r existe tal que $f_r(x) < f_r(y)$. En fin, el objetivo de la aproximación simultánea o de Pareto es generar un conjunto de soluciones eficientes de tal forma que proporcione valores para todas las funciones objetivo aceptable para la persona que decide (J. C. Osorio et al., 2012).

Como ejemplo, el autor plantea la Figura 13 donde consideramos un caso de dos funciones objetivas. Las soluciones C, D y F están dominadas y {A, B, E, G} es el conjunto de soluciones óptimo de Pareto. Se puede observar que el conjunto óptimo de Pareto (frontera de Pareto) está constituido por varias soluciones no dominadas. El objetivo principal de este enfoque es encontrar todos los elementos de este conjunto para dar más opciones al responsable de la toma de decisiones.

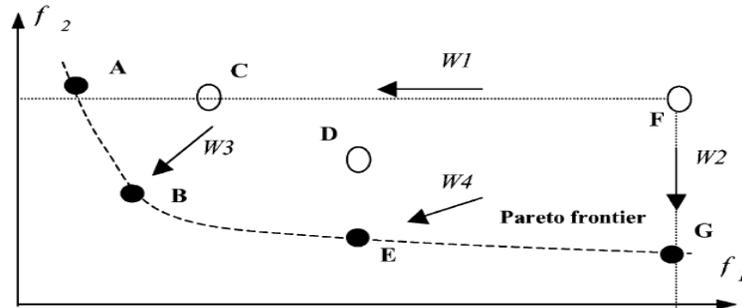


Figura 13. Frontera de Pareto
Fuente: Tomado de Kacem et al. (2002)

Como definición, es importante resaltar que criterios o medidas de desempeño como el *makespan* en los diferentes tipos de patrones de flujo están definidas en la literatura como lo correspondiente al tiempo completo del último trabajo en la última máquina de acuerdo con el orden de procesamiento de las tareas y la matriz de tiempos de procesamientos de cada tarea en cada máquina. Este valor se obtiene contabilizando el tiempo acumulado que toman en ser procesados los trabajos en todas las máquinas (Jimenez, 2012).

Teniendo en cuenta los aportes a la literatura por los investigadores y ejemplificando casos de éxitos en implementaciones, Chung et al. (2012) propone un algoritmo de inserción paralela con procedimiento de ajuste siglado como (PIAA), el cual intenta minimizar la carga de trabajo total de la máquina pero por el cual debe desarrollar un procedimiento de ajuste para ser ejecutado con PIAA para hacer que la PIAA sea aplicable también para reducir este tiempo (*makespan*). Finalmente, el autor hace una comparación para verificar la superioridad del algoritmo propuesto (PIAAP) al compararlo con la regla FIFO (primero en llegar, primero en salir) y LPT en la reducción de *makespan* y la precisión del modelo probabilístico propuesto para estimarlo. El autor realiza un diseño experimental variando cinco parámetros de control. Se construyen tres modelos de simulación, en el que el primero implementa FIFO y el segundo la regla del tiempo de procesamiento más largo (LPT) para enviar trabajos a las máquinas, y el tercero distribuye los trabajos de acuerdo con el cronograma de máquinas paralelas generado por PIAAP. Para evaluar los rendimientos finales en la minimización del *makespan* reduciendo también la carga total de las maquinas del taller en varios enfoques, comparan las marcas que se generan respectivamente en los modelos de simulación mediante el despacho de pedidos de acuerdo con FIFO, LPT o el algoritmo puesto PIAAP. Los

resultados de la simulación de los métodos para las reglas de despacho muestran que el makespan bajo el algoritmo PIAAP siempre es más pequeño que los resultados bajo FIFO y LPT. Por lo tanto, PIAAP es mejor que FIFO y LPT para disminuir el *makespan* y la carga de las maquinas del taller, especialmente con un alto nivel de utilización (Chung et al., 2012).

2.2 Casos de empresas manufactureras

Por más de 20 años, varios autores han introducido referencias sobre la planificación de la producción, donde indican que toda aquella persona que esté relacionada con la industria debe apreciar la enorme ventaja que se obtiene de un análisis de las necesidades de ésta y si es posible, para todo el año. Junto a esto, indican que cuando el administrador o encargado del proceso conoce la cantidad de producción que es demandada, por lo tanto, a procesar, es posible desarrollar programas para la manufactura, que permitan a la compañía alcanzar un pleno rendimiento; que la producción se aproveche enormemente; que no sea necesario mantener grandes stocks en tiempos excesivos; que el capital y el interés se economicen, en general que aumente la eficacia en toda la organización (Correa Espinal et al., 2008).

Una sistema de producción sin tiempos de espera es importante para muchos procesos de fabricación, tales como procesamiento de metales, laminado de acero y procesamiento de alimentos (Ye, Li, & Abedini, 2017). En ese sentido y en el caso de las empresas pertenecientes al sector manufacturero, los talleres de producción con un patrón Flow Shop y sin tiempos de espera entre pedidos permitidos, han sido ampliamente incorporados en la manufactura (Ye et al., 2017). No obstante, la minimización del *makespan* sigue siendo una tarea de mucha consideración. Un claro ejemplo es lo que ocurre con el proceso químico donde las operaciones son sensibles al tiempo mientras se está ejecutando la reacción química. En caso adverso, donde existieran tiempos de espera, el proceso químico no sería el deseado (Ye et al., 2017). Entonces, múltiples eventos adversos en la implementación de Scheduling en las organizaciones se pueden presentar. Sin embargo, numerosas empresas del sector manufacturero a nivel mundial han sabido responder a estas dificultades, sacando el mejor proyecto de la programación de *Scheduling* en sus talleres de trabajo.

Como referencia de lo dicho, Viviana Karolina Ortiz Triana y Álvaro Junior Caicedo-Rolón en el 2014, señalan el éxito de una empresa de calzado en Colombia la cual decidió hacer *Scheduling* en su planta de manufactura con el fin de optimizar su producción y nivelar de mejor manera las cargas de trabajo y obtener mayores beneficios, teniendo en cuenta distintas variables de decisión como el número de maquinaria disponible en el taller, número de empleados e inventarios. La empresa ubicada en la ciudad de Cúcuta-Colombia, cuenta con una producción anual de más de 20.000 pares de zapatos, distribuidos en los más de 70 productos diferentes que allí ofrecen. Después de varios análisis, toma de tiempos y otras medidas de mejora en su proceso, se logró la elaboración de una heurística la cual es aplicable para esta organización y cualquier otra que comparta estas características, aumentando las utilidades del propietario de la fábrica. Además, la implementación de la heurística en la

organización, permitiría realizar una mejor administración de la producción, y de esta forma contribuir al fortalecimiento del sector; facilitando el cumplimiento de los objetivos, políticas, y estrategias formuladas en el plan de negocios del Cuero, Calzado y Marroquinería.

Del mismo modo, se presenta otro caso de éxito en una industria de aserrío la cual es de gran importancia para el sector comercial y de manufactura para Chile. Múltiples productos derivados de la madera son procesados por todo el mundo en diversas industrias de diferente tamaño. Por esto mismo, la necesidad de programar la producción se hace aún más necesaria dado el uso de MP tan preciada y proveniente de recursos naturales. La acertada planeación de la producción puede orientar a los niveles jerárquicos de la organización a la acertada toma de decisiones a nivel económico y operacional (Romero, Grandón, & Abufarde, 2004). En Chile, el autor publica un modelo de apoyo a la toma de decisiones para Scheduling en talleres de aserraderos. El modelo formulado tiene como objetivo maximizar la utilidad por producto elaborado a partir de una clase diamétrica de trozo, considerando restricciones de capacidad y abastecimiento (Romero et al., 2004).

Para este caso, el problema central se presenta como la función de planificación y programación al momento de decidir el pedido a fabricar, ya que se deben considerar los rendimientos de la materia prima, de manera tal que se optimice el aprovechamiento y rentabilidad del aserradero. Debido a esto, esta industria suele presentar problemas de la pérdida de eficiencia, productividad y aprovechamiento de la materia prima, con su incidencia en los costos de producción. En la perspectiva económica, los efectos que se observan son en la utilidad, obtenida de cada producto, debido principalmente a que, al emplear materia prima no adecuada para la elaboración del mismo, no se optimiza su aprovechamiento, incidiendo en la rentabilidad del negocio (Romero et al., 2004). Después de elaborar una metodología y toma de datos para la elaboración de una ruta de prioridad para los pedidos que se van a procesar, se elabora un diagrama de proceso para conocer cómo deberían ser los procedimientos dentro del taller de trabajo. Seguido a esto, los administradores y/o jefe de taller realizan la construcción de variables de decisión junto con sus restricciones para dar a conocer la solución más óptima.

Para finalizar, Romero et al. (2004) concluye que se logró un incremento en la rentabilidad de los pedidos al optimizar la asignación de materia prima para la elaboración de un pedido, también determinó las acciones necesarias al momento de programar la producción, de manera de cumplir con las fechas de entrega propuestas. La heurística creada determina cuando es necesario realizar un cambio en la opción de producción de modo de no generar desviaciones en la fecha de entrega del pedido y disminuciones en la rentabilidad del pedido. La validación realizada con datos históricos del sistema permitió comparar las opciones de producción programadas por personal del aserradero, con las propuestas por el modelo, las cuales, consideran las disponibilidades de trozos y el retorno económico.

2.3 Consideraciones de éxito para las decisiones de *Scheduling*

Implementar *Scheduling* a los procesos de las pymes es vital para lograr la cooperación y rendimiento en los objetivos propuestos; para referenciar una de sus muchas motivaciones, Liu, Lu, & Qi (2018) propone un juego de cooperación donde varios jugadores poseen múltiples trabajos que deben ser procesados en diferentes maquinas dentro de un taller de trabajo. En su artículo, se muestra la colaboración en la secuenciación y la programación de tareas para darle solución al problema después de ser presentadas varias alternativas de solución, como cambiar puestos de trabajo u obtener un nuevo horario con una restricción clara que es la reducción de costos. Basado en esto, se han realizado numerosas investigaciones basadas en el objetivo de optimizar la programación de la producción a nivel mundial y muchas de estas en Latinoamérica; una microempresa procesadora de filetes de pescado implementó estrategias dentro de su proceso en busca de determinar las cantidades de fabricación semanal que arrojan la mayor contribución a las utilidades netas de la empresa, decisiones que se toman desde el nivel operativo de la organización con el consentimiento y apoyo económicos de los niveles más alto de la organización como los gerenciales y directivos (Ortiz Triana & Caicedo Rolón, 2014).

De esta forma, numerosas industrias han adoptado modelos de programación de la producción motivados por los grandes beneficios que ésta trae para efectos económicos y operacionales. Los anteriores casos referenciados como la empresa de aserrío son evidencia de esto. Esta empresa aplicó algoritmos en su planta de trabajo en busca de maximizar la utilidad por producto elaborado a partir de modificaciones por trozo, considerando restricciones de capacidad y abastecimiento (Romero et al., 2004). Para comenzar la elaboración e implementación del algoritmo, fue necesario un levantamiento de información considerando las variables y parámetros propios de la línea de producción que se manejaba en el taller de trabajo. Seguido a esto, los investigadores consultaron la literatura que les pudiera suministrar información relevante al problema que ellos iban a tratar en la organización. Básicamente, buscaban modelos y aplicaciones relacionados con el procesamiento industrial. A partir de las dos fases mencionadas, el propósito fue plantear la formulación de heurísticas en programación, considerando las variables y restricciones del sistema real y finalmente, una fase de validación del programa construido. De forma práctica, la primera actividad fue la descripción del modelo que iban a trabajar, el cual fue estructurado en 3 partes: Recepción y priorización de pedidos, definición y evaluación de las opciones de producción y programación de la producción (*Scheduling*). Estas tres etapas tienen por objetivo maximizar la rentabilidad y reducir las desviaciones operaciones, las cuales son las responsables de los atrasos en las entregas de los pedidos. La Figura 14 es el resumen del modelo construido, el cual fue tomado de Romero et al. (2004).

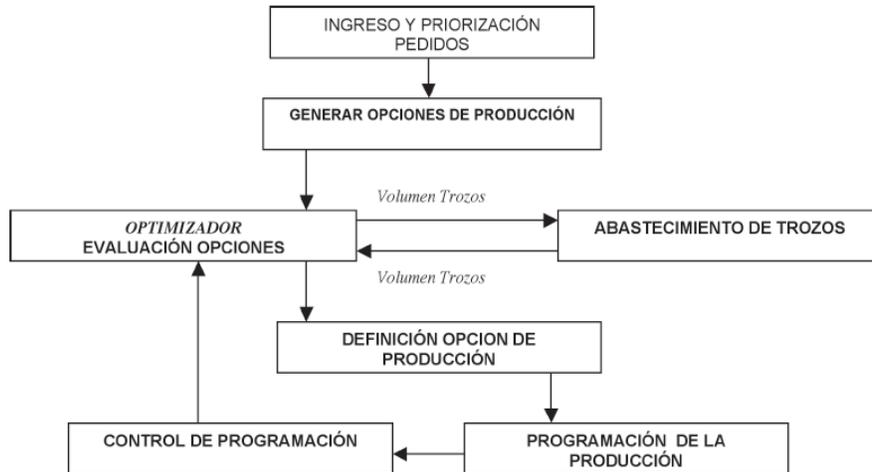


Figura 14. Diseño de modelo de empresa manufacturera

Fuente: Tomado de Romero et al. (2004)

En la primera etapa denominada como *Recepción y priorización de pedidos*, se incorporan todos los elementos relevantes para la organización en su proceso (fecha de entrega, precio de venta (US\$/m³), dimensiones y volumen). Luego éstos son priorizados según su fecha de entrega, para planificar los pedidos con fecha de entrega más cercana. Los pedidos seleccionados ingresan a la etapa de generación de opciones de producción.

En la segunda etapa denominada *definición y evaluación de las opciones de producción*, los analistas hicieron un alto para consolidar información importante para continuar con su investigación. Esto es caracterizar el aserradero, en función de su capacidad instalada de producción, clases diamétricas, cantidad de líneas de producción, alturas de cortes y espesores, especificaciones técnicas de corte y dimensionamiento de piezas, productividades de trozos aserrados según su clase diamétrica. Después de esto, en el análisis de opciones de producción, analizan las alternativas de cortes asignadas a los distintos trozos, con el fin de generar más de una opción para el procesamiento de los trabajos de acuerdo a su necesidad y requerimiento del cliente. Después de esto, los analistas clasifican cada tipo de corte, priorizándolo por la utilidad del trozo, volúmenes necesarios y disponibilidad de materia prima para su elaboración. Luego, las soluciones con mejor retorno económico y que sean factibles, pasarán a la fase de programación. La utilidad de los trozos asignados a los pedidos será la variable de decisión económica, y en el aspecto operacional, la variable crítica es la fecha de entrega del pedido. En este sentido se determinó que una restricción importante del modelo es la fecha de recepción y volumen disponible de trozos por clase diamétrica, para poder programar la elaboración del pedido. De esta forma, el análisis estadístico del proceso de abastecimiento reveló que el stock se ajusta a una distribución de probabilidad, esto quiere decir que el estudio se puede modelar.

A partir de la información recopilada y del desarrollo de todo el proceso anteriormente nombrados, se elaboró el modelo de optimización, que resuelve el problema de programación a través de programación lineal (PL) (Romero et al., 2004). Para ello, se utiliza un software de optimización, que determina las opciones de producción óptimas según su clase diamétrica.

Finalmente, en la última etapa correspondiente a programación de la producción, se emplean heurísticas de programación y secuenciamiento para ordenar los pedidos que serán elaborados por el aserradero. Dentro de esta programación se incorpora la aleatoriedad del abastecimiento de la materia prima, modelándolo como un proceso que se comporta según una función de distribución, definida por la media y desviación estándar del volumen recepcionado de trozos por día. Seguido a esto, se estableció un criterio de priorización de pedidos, basado en las holguras de tiempo del pedido, esta holgura se definió como la diferencia entre la fecha de entrega, el tiempo de proceso del pedido dentro del aserradero, el tiempo de elaboración restante y el tiempo de configuración y ajuste de la línea de producción. De este modo, se programan pedidos en función a las holguras disponibles por pedido, y la disponibilidad de trozos por clases diamétricas para su fabricación.

Después de realizar las pruebas de validación con datos históricos del sistema, se permitió comparar las opciones de producción programadas por personal del aserradero, con las propuestas por el modelo, las cuales, consideran las disponibilidades de trozos y el retorno económico. Los resultados en la construcción de esta heurística fueron positivos. Estos arrojaron un incremento en la rentabilidad de los pedidos al optimizar la asignación de materia prima para la elaboración de un pedido, también, se pudo observar situaciones para un posterior ajuste en la programación de la producción de manera tal que se cumpla con las fechas de entrega propuestas y la posibilidad de terminar cuando es necesario un cambio en la opción de producción (corte de trozo) para mayor optimización de los criterios del taller.

Por varios años, industrias del sector manufacturero han desarrollado metodologías y procedimientos empíricos y basados en la experiencia para mejorar sus procesos industriales. Pese a esto, la implementación de procesos innovadores en los talleres de producción y de procesamiento de trabajos han tenido grandes resultados para los objetivos plantados en las organizaciones. Mejora en el tiempo de procesamiento de los trabajos, entrega más pronta del producto al cliente, optimizar los recursos utilizados para aumentar la rentabilidad del negocio son uno de estos.

3. Modelo de gestión de la producción en el sub-sector metalmecánico

El sector manufacturero se muestra como la cuarta actividad productiva más representativa en Colombia con una participación aproximada del 12% en el PIB total (Procolombia, 2017). Dentro de ella, sub-sectores como lo es el metalmecánico se esfuerzan por aumentar su competitividad frente a sus similares latinoamericanos. En efecto, la calidad y precio que manejan las compañías nacionales ponen en ventaja a nuestro país. En este capítulo, se menciona el desarrollo tecnológico y algunas limitaciones presentes en la gestión de la producción de las empresas manufactureras. También, se sintetiza el comportamiento comercial del sector metalmecánico en el departamento del Tolima, basado en fuentes primarias de información como entidades regulares y empresarios de la región. Por último y como caso de referencia, se analiza con detalle los procesos internos que lleva a cabo el taller metalmecánica SOTO, ubicado en la ciudad de Ibagué, identificando las decisiones claves de los niveles jerárquicos para su correcto funcionamiento comercial.

3.1 Generalidades del Sub-sector metalmecánico en Colombia.

El gobierno nacional a través del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia creó el Programa de Transformación Productiva (PTP) en el año 2008, con el fin de establecer la política industrial de desarrollo productivo de Colombia, con la que se buscaba generar entornos más competitivos y empresas más fuertes y productivas. El PTP desde su creación ha sido un aliado de los empresarios colombianos al ofrecer acompañamiento para acelerar su productividad y competitividad, orientando sus capacidades y aprovechando sus ventajas comparativas (Ciani, 2017).

Fuentes primarias como la Encuesta Anual Manufacturera (EAM) señala que durante el periodo comprendido entre los años 2000 y 2007 la producción del sector metalmecánico registró un incremento de su participación sobre el sector industrial del país; su contribución en la producción industrial nacional pasó del 8,9% al 11,3% (Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Economía., Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Teoría y Política Económica., & Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Economía., 2012). Esto es debido a las múltiples ventajas de este sector en Colombia, en comparación con otros países. Por ejemplo, las empresas colombianas del sector metalmecánico ofrecen menores tiempos de entrega, además de la posibilidad de producir lotes pequeños y hacer entregas de menor valor que las de los competidores internacionales (Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Economía. et al., 2012).

Es importante resaltar que un gran logro de este programa gubernamental fue destacar veinte sectores importantes en las industrias de clase mundial. Los sectores vinculados al PTP cuentan con planes de negocio diseñados que definen el curso a seguir para alcanzar incrementos decisivos en la productividad y competitividad, mientras fortalecen sus cadenas productivas y se posicionan internacionalmente (Ciani, 2017). Estos sectores los cuales son resumidos e identificados en la Tabla 5 y los cuales el Programa de Transformación Productiva define como priorizados en búsqueda de una diversificación de la oferta

exportable son definidos por Ciani (2017), en donde el sector de interés para esta investigación, el sector metalmeccánico, se muestra dentro de la clasificación.

Tabla 5. Sectores priorizados en Colombia

SECTOR	SECTORES PRIORIZADOS EN COLOMBIA
Sectores de Servicios:	BP&O, Software y TI, Energía Eléctrica, Bienes y Servicios conexos, Turismo de salud, Turismo de Bienestar, Turismo de Naturaleza.
Sectores de manufactura:	Cosméticos y Aseo, Editorial e industria de la Comunicación Gráfica, Autopartes y Vehículos, Textil y Confecciones, (Cuero, Calzado y Marroquinería), Metalmeccánico , Siderúrgico, Astillero.
Sectores de Agroindustria:	Acuícola, Carne Bovina, Lácteo, Palma, Aceites, Grasas Vegetales y Biocombustibles, Chocolatería, Confeitería y Materias Primas, Hortofrutícola.

Fuente: Tomado de Ciani (2017)

El mismo autor en su artículo, registra mediante la Figura 15 información suministrada por el Dane en el año 2016 donde muestra la distribución regional del empleo en el sector metalmeccánico de Colombia.

DEPARTAMENTO	% DE EMPLEO
CUNDINAMARCA	30
ANTIOQUIA	16,6
VALLE	12,6
ATLANTICO	6,9
SANTANDER	4,7
BOYACÁ	3,4
BOLIVAR	3,3
CALDAS	2,6
NORTE DE SANTANDER	2,3
CAUCA	1,9
CESAR	1,8
TOLIMA	1,6
META	1,5
NARIÑO	1,5
MAGDALENA	1,4
HUILA	1,1
CÓRDOBA	0,9
LA GUAJIRA	0,8
SUCRE	0,8
CAQUETÁ	0,7
QUINDÍO	0,7
CHOCÓ	0,4

Figura 15. Distribución regional del empleo en el sector metalmeccánico en Colombia

Fuente: Tomado de Ciani (2017)

El Sector Metalmeccánico está compuesto por un diverso conjunto de actividades industriales y su desarrollo está influenciado por la dinámica de otros sectores. Entre los principales subsectores o sectores a los que se enlaza la cadena metalmeccánica están: el sector de la construcción, minero, automotriz, infraestructura, petrolero, manufactura y agroindustrial; la tecnología de la soldadura, como área transversal, además de tener relación directa con la cadena metalmeccánica, participa en diferentes empresas manufactureras, químicas, de alimentos, eléctricos y electrónica, entre otras. Sus productos principalmente son bienes de consumo duraderos como electrodomésticos, equipos de refrigeración, de transporte y electrónicos, siendo de esta manera también un sector clave para otras actividades económicas (SENA, 2012)

Adicionalmente, se destaca que desde la clasificación industrial CIIU, se presenta un eslabonamiento en la fabricación de productos metálicos hacia adelante, en la medida en que aporta insumos para la obtención de las herramientas requeridas en el proceso productivo de las siguientes agrupaciones, así como en la elaboración de partes y piezas indispensables para su fabricación. El proceso del sector siderúrgico y metalmeccánico se puede observar en forma esquemática como se evidencia en la Figura 16, tomada de la Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Economía. et al., (2012):

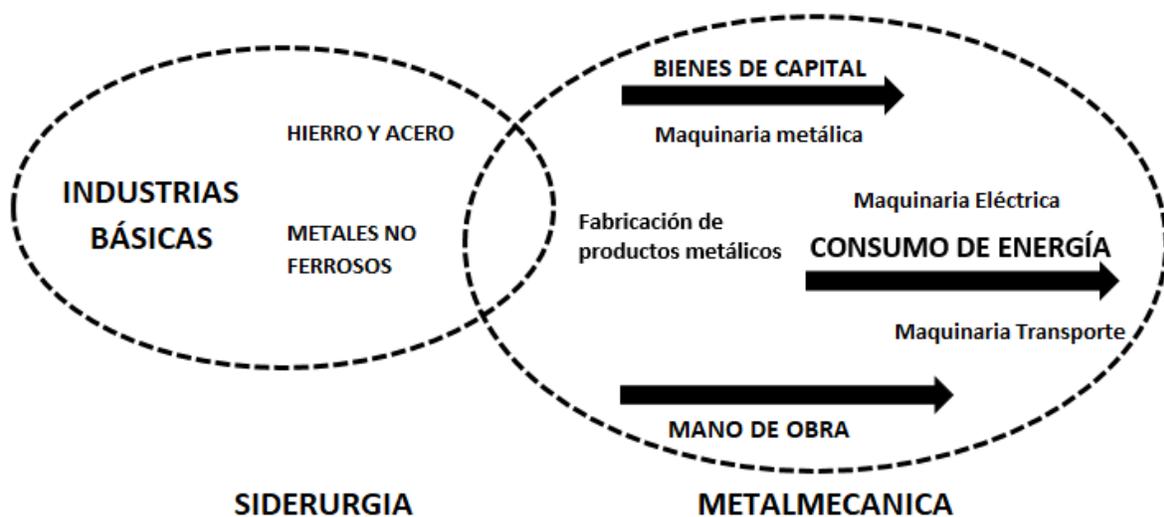


Figura 16. Proceso productivo en sectores afines

Fuente: Tomado de Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Economía. et al. (2012):

En términos de la gestión productiva, la industria metalmeccánica recibe insumos que son distribuidos en laminado, reducción y fundición. Esto es de acuerdo al requerimiento del producto final y clasificados en artículos metalmeccánicos y maquinaria no eléctrica. El primer grupo corresponde a los bienes terminados empleados en el hogar, las oficinas y las ferreterías, en tanto que el segundo grupo de productos se constituye, generalmente, en todas

aquellas maquinarias primas necesarias por otros sectores o grupos industriales (Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Economía. et al., 2012).

En consolidación de toda la información acerca de los eslabones de la cadena productiva del sector metalmeccánico, se presenta la Figura 17.

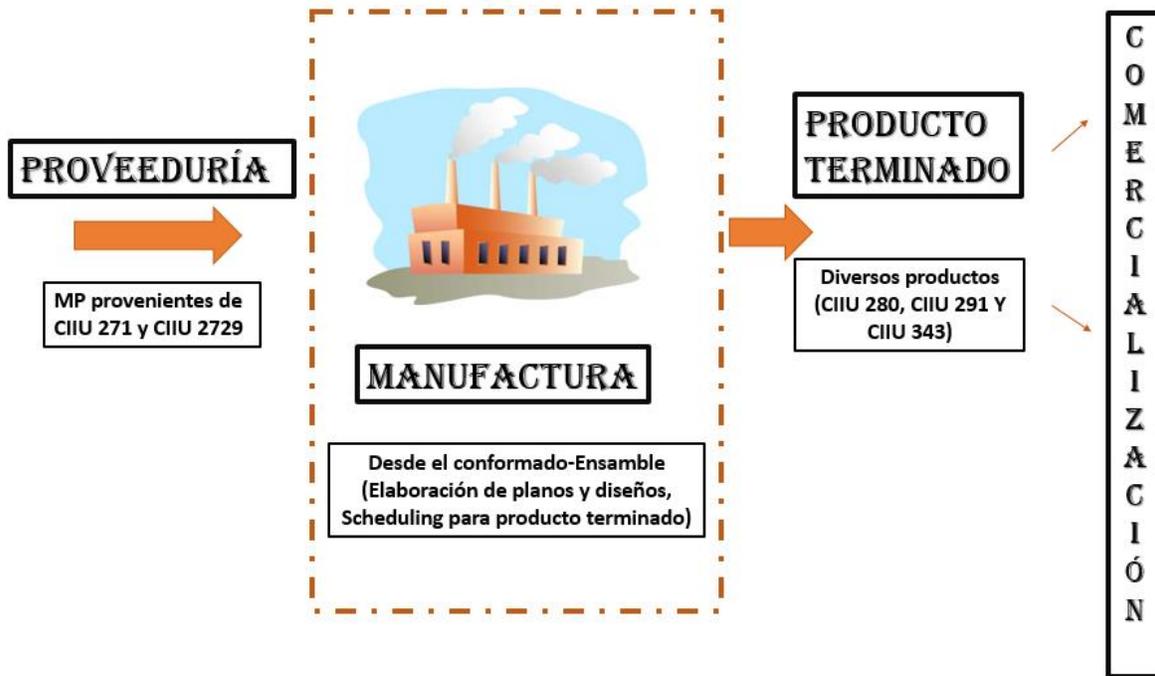


Figura 17. Cadena productiva sector metalmeccánico

La figura anterior muestra de forma detallada cada eslabón de la cadena productiva del sector metalmeccánico. En ella es encontrar el primer eslabón de la cadena *Proveeduría* en la cual las materias primas MP llegan de industrias básicas de hierro y de acero, las cuales pertenecen al código que se muestra en la imagen. La industria posee una tendencia netamente importadora de materia prima, debido a que la producción nacional no satisface todos los requerimientos de esta industria en calidades especiales y productos planos. El 70% de la materia prima se importa, mientras que el 30% restante es suministrado por el mercado local. Las materias primas más importadas por la industria son: aceros inoxidables, calidades especiales, hojalatas, chapas de acero laminadas en frío o en caliente, alambrones de acero y láminas de aluminio (SENA, 2012). Seguido a esto, el segundo eslabón en la cadena corresponde a la *Manufactura*, proceso llevado a cabo dentro de la industria en donde comienza la elaboración de diseños y la construcción de productos metálicos, usando software de tipo CAD. Seguido a esta planificación, la compañía debe comenzar su proceso de programación de la producción para la transformación de la MP a PT. En la tercera fase *Producto Terminado*, son encontrados diversos productos los cuales son categorizados en tres grandes grupos: fabricación de productos elaborados de metal, fabricación de máquina de uso general y fabricación de partes, piezas y vehículos automotores (SENA, 2012).

Finalmente, en la *comercialización* los productos terminados lo componen las empresas con los códigos CIIU 5030, 5161, 5162, 5136, 5163, 5169 y 5141. Los productos consumidos en el mercado local son comercializados por almacenes mayoristas en su mayor parte, los cuales adquieren grandes volúmenes de mercancía, para distribuirlos a nivel local y nacional, por medio de empresas o almacenes minoristas.

En un mercado globalizado, en el que la industria metalmecánica colombiana está compitiendo hombro a hombro con países de gran potencia tecnológica como Corea del sur, China, India y Tailandia, hace necesario implementar y adoptar tecnológicas de mejora continua, calidad y productividad como el lean manufacturing. Lo anterior, es referenciado por Universidad nacional (2017) donde afirma que este sub sector de la industria proporciona un 13.5% de empleo del sector manufacturero en Colombia. Sin embargo, este sector se ha visto afectado por medio de sanciones por diferentes aspectos como el cuidado del medio ambiente y la responsabilidad social, mayormente en las empresas pequeñas, las cuales priorizan sus indicadores económicos. La Encuesta Anual Manufacturera (EAM) especificó que el 70 % de la industria metalmecánica nacional está constituida por pequeñas y microempresas, de ahí la preocupación del investigador por hacer un análisis de cómo estas organizaciones logran un equilibrio entre el crecimiento económico, la protección del medioambiente y la responsabilidad social para generar un desarrollo sostenible. En ese sentido y es por esto que las dificultades propias del entorno industrial colombiano como la reducción de empleos y la devaluación del peso hacen que la lucha por la supervivencia económica sea la gran prioridad de micro y pequeñas empresas (Universidad nacional, 2017).

En adición, el autor afirma que el enfoque lean manufacturing en la industria colombiana ha sido bien adoptado por el sector metalmecánico, puesto que dentro sus grandes características se encuentra la reducción de inventarios, optimización de los recursos, flexibilidad, mejora continua y entrega de pedidos oportunos, propiedades fundamentales para este sector.

3.2 Sub-sector metalmecánico en el Tolima

Fuentes primarias de información como la cámara de comercio de Ibagué, mediante el control y regulación de datos estadísticos que tiene en su jurisdicción en el departamento del Tolima, la cual abarca a 11 municipios (Ibagué, Cajamarca, Rovira, San Antonio, Valle de San Juan, Anzoátegui, Venadillo, Alvarado, Roncesvalles, Santa Isabel y el municipio de Piedras), reporta que, en el presente año 2018, 283 empresas del sector metalmecánico se encuentran activas y laborando de forma legal. De estas 283 organizaciones, 269 están ubicadas en la capital del departamento. Es decir que, de las empresas pertenecientes al sector metalmecánico en el Tolima, el 95% de las organizaciones cuya labor comercial corresponden a actividades de metalurgias y sectores afines, se encuentran en Ibagué. Del mismo modo y con el ánimo de un reporte de información más preciso, se menciona la

clasificación industrial internacional uniforme (código CIIU) de algunas de las organizaciones mencionadas las cuales representan el mayor número de empresas reportadas, información suministrada por la cámara de comercio de Ibagué en Julio de 2018. Los códigos son C2511, C2592, C2599, C2920, y C2930 cuyas empresas pertenecen a sectores como la Fabricación de productos metálicos para uso estructural, tratamiento y revestimiento de metales mecanizados, fabricación de otros productos elaborados de metal, fabricación de carrocerías para vehículos automotores y fabricación de partes piezas.

Hurtado Sarmiento & CIA LTDA es una de las 269 empresas registradas ante la cámara de comercio de Ibagué. Su planta física está ubicada en la capital tolimense con varios años de experiencia en su ejercicio de carpintería metálica en aluminio y vidrio, pertenecientes al sector metalmeccánico. “Bernardo Hurtado quien es uno de sus propietarios, señala que el proceso de adquisición de la materia prima para su negocio es fácil y a precios cómodos para su negocio. Teniendo en cuenta la magnitud de su empresa la cual ha llegado a contar con hasta 130 empleados, manifiesta que en la ciudad de Ibagué no tiene competencia para la comercialización de sus productos, siendo el 100% de su producción enviada a Bogotá para los proyectos que allí tienen. Sin embargo, reconoce que los pequeños talleres de la ciudad, pueden llegar a ofrecer precios más bajos, pero no de igual calidad que los de su compañía.” (B. Hurtado, Comunicación Telefónica, 27 de Julio de 2018). Así mismo, el empresario manifiesta que, en temas de reglas de producción y despacho de pedido a sus clientes, siguen la política *primero en llegar, primero en salir*. Sin embargo, tienen la capacidad de atender más de un proyecto al mismo tiempo, previendo los costos asociados a esto y siempre cumpliendo con los requerimientos del cliente en cuanto a calidad y fecha de entregas pactadas (B. Hurtado, Comunicación Telefónica, 27 de Julio de 2018).

El Tolima, con una participación poco significativa en el PIB nacional (2,2%) y una tasa de desempleo (10,4%) superior a la media presente en el país, es una región que presenta una evidente necesidad de generar alternativas dinamizadoras de su economía (Alberto & Castillo, 2017).

Según PROCOLOMBIA (2017) en el departamento del Tolima para 2016 se identificaron un conjunto de empresas que han realizado exportaciones las cuales están agrupadas en la denominadas “cadenas priorizadas” definidas por el Ministerio de Comercio Industria y Turismo, a través del Programa de Transformación productiva. La Figura 18 muestra el comportamiento comparado de las cadenas priorizadas para el Tolima en los años 2015-2016, las cadenas Sistema moda (307,2%); Metal-mecánica (35,0%); y Minera (32,7%) son las que tuvieron mayor crecimiento (Alberto & Castillo, 2017).

CADENA PRIORIZADA	USD/2015	USD/2016	VARIACIÓN
MINERA	15.365.106	20.381.865	32,70%
AGRO-ALIMENTOS	151.594.190	151.790.816	0,1%
INDUSTRIAS 4.0 (Editorial, BPO, Software Y TI)	-	-	0,0%
METALMECANICA Y OTRAS INDUSTRIAS	846.034	1.141.744	35,0%
SISTEMA MODA	42.527	173.186	307,2%
QUIMICOS Y CIENCIAS DE LA VIDA	4.547.197	5.075.361	11,6%
OTROS	5.000	750	-85,0%
TOTAL	\$172.400.054	\$178.565.738	3,6%

Figura 18. Crecimiento de los sectores priorizados a 2017

Fuente: Tomado de Alberto & Castillo (2017)

Como se mencionaba, dentro de las cadenas priorizadas por el gobierno nacional, para el departamento del Tolima el sector metalmecánico ha incrementado levemente sus exportaciones a los diferentes países donde se ha convenido relación comercial. Estos reportes son motivadores para el sector y para el departamento, puesto que como es sabido dentro del objeto social y operacional del sector metalmecánico, hay contempladas un gran número de actividades con la posibilidad de ofrecer diversos productos y piezas de alta calidad para comercializar a nivel internacional y aportar a la economía del departamento y al PIB nacional. En adición a lo mencionado, Alberto & Castillo (2017) referencia las empresas del sector metalmecánico en el Tolima las cuales su actividad de exportación es importante para el departamento, las cuales nombramos entre muchas otras: Agroindustrial del Tolima, Empresa Andina de Herramientas, Exprecol S.A.S, Icollantas, Hurtado Sarmiento & CIA LTDA, Joserrego S.A.S, Inversiones deposito Tolimense S.A.S y Sinergy Pack S.A.S. Del mismo modo, es importante relacionar cuales son los productos más comercializados en el exterior por el sector metalmecánico del Tolima, de los cuales encontramos: accesorios de elevación, ferretería pesada, flejes, herramienta industrial para chapas metálicas, maquinaria industrial y mesas de corte (Alberto & Castillo, 2017).

3.3 Descripción del nivel tecnológico

Para los empresarios, el desafío más importante, es alcanzar mayores niveles de competitividad en un entorno más globalizado, enmarcado por los tratados comerciales y donde las demandas de tecnologías de la información, electrónica y comunicaciones, así como el desarrollo de materiales y procesos industriales, marcan el progreso de una nueva cultura y etapa industrial. Las transformaciones productivas, asociadas al cambio y desarrollo tecnológico que demanda el empresariado nacional, requieren en el ámbito de la competencia internacional, importantes inversiones para alcanzar tamaños mínimos de mercado y barreras de entrada frente a nuevos competidores. La composición y estructura actual del capital de PYMES tienen un sesgo que no facilita el desarrollo tecnológico, justamente por los altos niveles de inversión que el mercado demanda y que una inversión limitada no puede suplir, tal es el caso del sector metalmecánico (SENA, 2012).

La automatización industrial, es considerada como el manejo de la información en las empresas para la toma de decisiones en tiempo real, que incorpora la informática y el control automatizado para la ejecución autónoma y de forma eficiente de procesos diseñados según los criterios de ingeniería y los planes de la dirección empresarial. Con la automatización de las empresas y todos sus sistemas productivos los procedimientos lógicos son desarrollados por máquinas especiales y programas, las cuales son capaces de procesar información y generar datos para la toma de decisiones muchos más rápido que un ser humano (Higuera, 2009). El mismo autor plantea que a la hora de incorporar nueva tecnología en una organización se debe tener en cuenta dos aspectos importantes; la importancia de lograr un equilibrio social, sobre los efectos en la sociedad, sobre la economía, sobre la legislación actual, y más importante aún sobre el rechazo que se suele presentar en contra de estos nuevos cambios y segundo, poder desarrollar nuevas formas de gestión organizacionales que den respuestas al cambio y a la evolución de la tecnología, creciendo paralelamente a las innovaciones tecnológicas, innovaciones en la organización del trabajo, en la administración de la producción, en la fuerza de trabajo, en las comunicaciones, y en la forma de producir.

Cada vez, la tecnología es más específica. Las máquinas están conectadas a una red de manejo remoto y son controladas desde la casa matriz. Los mantenimientos de las máquinas son apoyados con equipos electrónicos de diagnóstico que poseen los fabricantes y proveedores de la tecnología. Ya no sirve para mucho la experticia del técnico en mantenimiento, las máquinas son cajas negras con componentes de quitar y poner (SENA, 2012).

En el entorno tecnológico prevalecen varios de los problemas básicos del sector. Entre ellos se pueden resaltar: la falta de adaptabilidad de normas técnicas y los altos costos de materia prima. La constante de las empresas del sector metalmeccánico es que tienen un nivel tecnológico medio y una capacidad tecnológica muy por debajo de la ideal. Son pocas las empresas que han logrado incorporar mejoras en tecnología dentro de sus procesos de diseño y de manufactura, y algunos de los fabricantes emblemáticos de maquinaria han desaparecido (SENA, 2012).

Dentro del censo realizado en el trabajo investigativo del autor, y de acuerdo a las 796 empresas que fueron objeto de estudio, el 49% usan tecnologías tradicionales entre máquinas herramientas y herramientas manuales. Y, además, el uso de equipos electrónicos, automatizados, control numérico computarizado (CNC) y tecnologías CAD-CAM-CAE, están en un porcentaje de uso del 45%. Lo cual denota la migración que se está haciendo hacia la automatización de la cadena metalmeccánica (SENA, 2012). Adicional a esto, el estudio también arroja que las empresas que conforman la población del estudio usan *software* en red y ERP en un nivel del 68% del total de la cadena metalmeccánica.

La cadena metalmecánica en todos los eslabones mencionados, con mayor representatividad en el primero (proveedores), presenta una clara intención hacia la automatización de sus operaciones al ubicar a sus operarios en la operación de máquinas semiautomáticas, también se denota la incursión de las empresas en sus grandes inversiones para la utilización de equipos automáticos. A continuación, la Figura 19 consolida la información para el análisis de la misma, resaltando las actividades de los operarios en los talleres de trabajo.

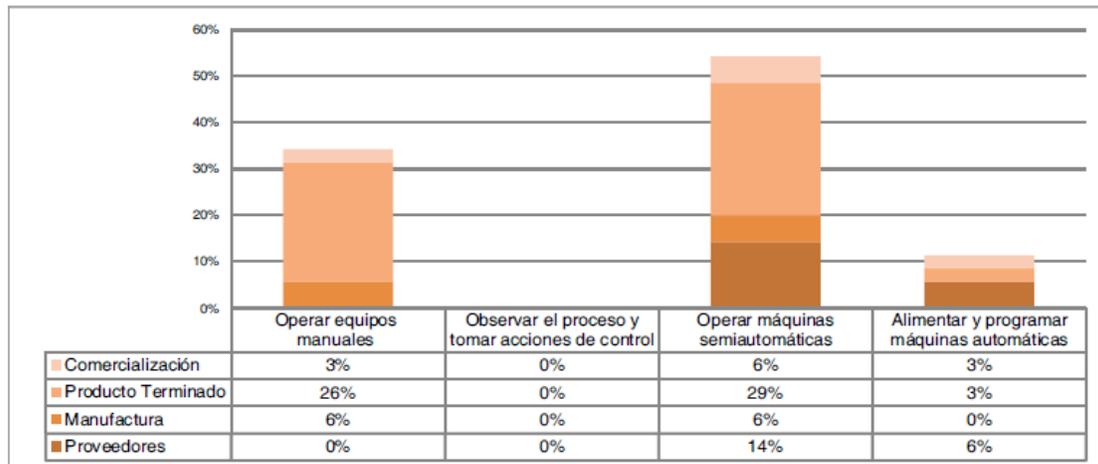


Figura 19. Funciones de los operarios según eslabón

Fuente: Tomado de Sena, 2012

El desarrollo tecnológico, transforman comportamientos organizacionales y exigen que cada una de las unidades funcionales y estratégicas de la empresa respondan al comportamiento globalizado de competitividad, es decir, un mercado donde las limitaciones geográficas, temporales y las distancias son cada vez menores.

Teniendo en cuenta lo descrito y según Oswaldo Higuera en su trabajo publicado en el 2009, lo que se busca con la implantación de nuevas tecnologías en sistemas flexibles de manufactura es son; cero Defectos, cero retrasos, cero papeles y cero inventarios.

Sin embargo, una constante de las empresas del sector metalmecánico es que tienen una capacidad tecnológica muy por debajo de la ideal. Son pocas las empresas que han logrado incorporar mejoras en tecnología dentro de sus procesos de diseño y de manufactura, y algunas que han incorporado las tecnologías al parecer no las han sabido aprovechar, ya sea por falta de buenas relaciones con el proveedor, falta de cultura o falta de preparación de sus empleados (SENA, 2012).

Un dato importante del estudio realizado por el SENA, (2012) y de acuerdo al censo de las 796 empresas que ellos realizaron a nivel nacional (incluyendo una empresa de Ibagué), se estima que un 50% de ellas realizan inversión tecnológica para su proceso, siendo éste un

10% aproximadamente de su presupuesto anual (SENA, 2012). En la Figura 20 se consolida la información suministrada por el estudio.

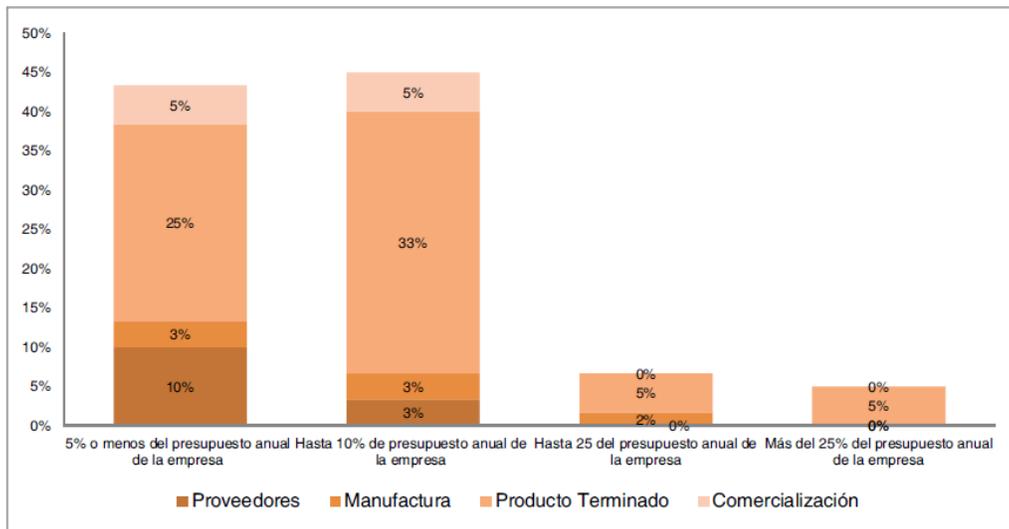


Figura 20. Porcentaje de Inversión en el sector Metalmeccánico
Fuente: Tomado de Sena, 2012

3.4 Problemas de las empresas para la gestión de la producción

Como se viene mencionando, es de gran importancia la tecnología y la automatización de procesos en el sector metalmeccánico. Esto es debido a la variedad de procesos que dentro del sector se manejan para la transformación de MP en productos terminados para la posterior distribución a sus aliados comerciales. Teniendo en cuenta lo anterior, las organizaciones que presentan fallas o ausencia de competencias tecnológicas tienden a presentar dificultades para la gestión de la producción. Entonces, es posible concluir que las brechas tecnológicas pueden acarrear problemas en la gestión de la producción en las organizaciones. Esta conclusión la comparte Ovalle, Ocampo, & Acevedo (2013) al realizar una investigación y tomar un cierto número de empresas metalmeccánicas como muestreo. De un 100% de empresas censadas en la muestra tomada, 40% tienen un nivel medio de automatización; un 10% se encuentra entre la categoría media-alta a clase mundial y el 50% restante tiene bajos niveles de automatización y una mayor brecha tecnológica, debido al carácter manual de las operaciones de la cadena de valor. Las mayores brechas se detectaron en la gestión logística que comprende las operaciones de abastecimiento de materiales, almacenamiento y despacho. Se encontraron falencias en la gestión tecnológica, en aspectos claves como la identificación y el seguimiento de nuevas tecnologías y los planes tecnológicos. Mejorar la gestión tecnológica en las organizaciones, puede contribuir al cierre de las brechas tecnológicas detectadas (Ovalle et al., 2013).

Soportando lo dicho anteriormente, la agregación de valor en los procesos productivos, los bajos niveles de innovación y de absorción de tecnologías limitan la competitividad. Es por

esto que el autor sugiere facilitar el desarrollo tecnológico en las organizaciones para mejorar la competitividad y la gestión de la producción en las organizaciones. Sin embargo, los principales criterios para la automatización industrial la cual conllevara a una mejora en la gestión de la producción, posibles problemas en su programación son nombrados así según su orden de importancia: Aumentar la capacidad de producción, mejorar la calidad, planeación de estrategias competitivas, modernización tecnológica, flexibilidad del proceso e innovación (Ovalle et al., 2013). Además, es importante mencionar que un alto porcentaje de las empresas con un grado tecnológico y productivo significativo en algunas regiones de Colombia, cuentan con una persona encargada del presupuesto anual que, junto a sus colaboradores, deben rediseñar para mejorar los procesos productivos de la organización, aumentando la flexibilidad, mejora de calidad y objetivos claros de reducción de costos. Otro porcentaje similar de las organizaciones, postulan a un director de producción con la misión de mejorar los procesos productivos; existe un fondo para las inversiones no previstas que se puede utilizar ocasionalmente para poner en marcha algunos proyectos concretos de mejoramiento para la gestión en general y en un porcentaje más reducido, no existe ninguna estrategia de desarrollo de nuevos procesos de producción (Ovalle et al., 2013).

Sin embargo, es necesario ser precavidos para evitar una programación errónea y mal implementada pues tendría fuertes impactos dentro de la organización; problemas como la falta de eficiencia, productividad y aprovechamiento de la materia prima, afectando de manera negativa los costos de producción dentro de la organización (Ortiz Triana & Caicedo Rolón, 2014). Complementando esto, en el caso de las pymes que no deciden realizar *Scheduling* a su proceso, se suelen generar problemas como conflicto entre recursos, aumento de inventarios de producción en proceso que va a generar costos de almacenamiento, tiempo ocioso de maquinaria y de personal, insatisfacción a los requerimientos del cliente y de esta forma, disminución de los ingresos percibidos por la organización.(Álvarez et al., 2011).

Debido a la complejidad que estas configuraciones pueden conllevar en la aplicación en sus respectivas áreas sumada a la poca importancia que se le otorga y a la falta de personal capacitado para incorporar estos métodos a las pymes, muchas organizaciones suelen ser poco competitivas dentro del mercado. Por ejemplo, en Colombia muy pocas organizaciones realizan *Scheduling* y en un bajo porcentaje de las que lo implementan, cuentan con el personal calificado para esta labor (Méndez Giraldo, Álvarez Pomar, Caicedo Cárdenas, & Malaver Gallego, 2013). Por esto mismo, los problemas relacionados con la productividad y la competitividad tienen una participación del 43.7% y el 34.4% respectivamente, por tanto, las empresas que quieran sobresalir en el mercado deben apostarle a la innovación, productividad y competitividad (Ortiz Triana & Caicedo Rolón, 2014). Otro aspecto relevante que contribuye a la poca implementación de *Scheduling* en las organizaciones es su elevado costo. A pesar de ello, el uso de herramientas computacionales como *sistemas*

expertos solucionan la limitación, ya que esta inteligencia artificial guía a la organización a la toma de decisiones como un ser humano especializado (Méndez Giraldo et al., 2013).

Por lo anterior, la errónea aplicación de estas técnicas en los procesos de las organizaciones trae consigo diferentes problemas de acuerdo al tipo de sistema que está incorporado el proceso. Sin embargo, la solución de estos problemas de programación han sido aplicados en diversas etapas y zonas de la industria para una acertada toma de decisiones y lograr beneficios económicos en poco tiempo bajo determinadas restricciones (Lu, Shi, Fei, Zhou, & Mao, 2018). En este sentido, la amplia cobertura permite la aplicación en varios campos de aplicación; operaciones de producción en una industria de manufactura, procesamiento computacional en un sistema operativo, movimiento de camiones en transporte, etc. Estos problemas de optimización son combinatorios (Salto, 2000). Los problemas que se presentan en los procesos son de mucha importancia en el mundo actual, por esto, su solución debe ser óptima. Por el contrario, una solución poco fundamentada puede acarrear costos innecesarios en la organización y desperdicio de recursos asociados al problema (Marquez, 2012).

Por otro lado, una opción de mejora para las dificultades que se pueden presentar en el nivel tecnológico de las organizaciones del sector metalmecánico y las cuales pueden afectar la producción de la misma, es desarrollar un plan de gestión tecnológica acorde con las necesidades y recursos de la empresa. Este plan es determinado por los procedimientos internos y externos. En los internos, se pueden tomar medidas como; balancear las capacidades tecnológicas de diseño y manufactura, lograr niveles de desarrollo mayores en el área tecnológica y establecer planes de mejoramiento ordenado y acordes con los recursos disponibles. En los aspectos externos, es necesario establecer la oferta y/o demanda de servicios tecnológicos, categorizar productos, o los procesos desde los indicadores de la tecnología y desarrollar estrategias de asociación o políticas sectoriales. (SENA, 2012)

Para destacar, una buena adaptabilidad y cambio de actitud se ha evidenciado durante los últimos años. La planificación y control de la programación en talleres de trabajo del sector manufacturero o productivo ha sido de gran interés por diferentes actores alrededor del mundo; esto por su gran aporte como herramienta que permite conocer las cantidades óptimas a fabricar y el buen uso de todo su sistema productivo. Esto es una ventaja frente a la competencia y le permitirá al dueño de empresa ser más hábil frente a la solución y respuesta de las necesidades de la demanda, cumpliendo y satisfaciendo los requerimientos del cliente, entregando pedidos en el menor tiempo posible, aumentando la confiabilidad en la organización, considerando las restricciones del taller de trabajo y maximizando las utilidades netas de la organización. (Ortiz Triana & Caicedo Rolón, 2014).

3.5 Consideraciones para la formulación de políticas

Las organizaciones manufactureras con el ánimo de cumplir con las solicitudes del cliente y entregar sus pedidos dentro de las fechas acordadas, implementan estrategias y reglas en sus áreas o procesos. Muchas de estas estrategias implementadas son definidas como políticas las cuales pueden abarcar la producción, normatividad gubernamental, cumplimiento en seguridad y salud en el trabajo y hasta del cuidado del medio ambiente. Dentro de las políticas de producción o asociadas a la entrega de productos, es común encontrar el concepto *primero en entrar, primero en salir*, respetando así el orden de llegada de los clientes en llevar a cabo su orden. Grandes empresas del Tolima como es uno de los casos de referencia Hurtado Sarmiento & Compañía LTDA, adopta esta técnica para el procesamiento de los pedidos, dando así buenos resultados y logrando la satisfacción de sus clientes. Del mismo modo, organizaciones de gran tamaño como esta, tienen la capacidad de abarcar más de un pedido al mismo tiempo, sin desmejorar su calidad y previniendo una posible baja demanda en periodos posteriores. Otras organizaciones han adoptado dentro de sus políticas de producción para el procesamiento de pedidos, la subcontratación la cual es habitual para poder cumplirle a los clientes (Cortés, Flor, José, García, & José, 1996). Muchas otras, hacen uso de ordenadores para la planificación y control de la producción; y otras, para ámbitos del control de calidad de sus pedidos, hacen inspecciones en fases intermedias del proceso productivo (Cortés et al., 1996).

En el marco legal para el normal funcionamiento de sus organizaciones, el sector metalmecánico continúa siendo regulado por las mismas instituciones que hace una década: DIAN, Cámaras de Comercio y la Superintendencia de Industria y Comercio. Por el lado del comercio exterior INCOMEX no sigue rigiendo y a cambio es el Ministerio de Turismo, Industria y Comercio quienes lo hacen (SENA, 2012).

Dentro de las políticas ambientales resulta que menos del 20% de las compañías del sector están certificadas en ISO 14000. La normativa ambiental en Colombia para las industrias metalmecánicas es vigente desde antes del año 2000. Normas internacionales de salud ocupacional y seguridad en soldadura como OSHA 29 y ANSI Z49 son de obligatorio cumplimiento en otros países mientras que en Colombia su adopción no es total por parte de las empresas. Entre las principales causas de la problemática ambiental se encuentra el comportamiento tradicional que impulsa al empresario a seguir realizando los procesos productivos en forma tradicional y muchas veces obsoleta, sin la necesidad de contemplar posibilidades de reconversión y uso de tecnologías más limpias (SENA, 2012).

3.6 Metalmecánica SOTO un caso de referencia

El taller metalmecánico SOTO se encuentra ubicado a las afueras de la ciudad de Ibagué, 200 mt abajo de la glorieta de Mirolindo vía picaleña. La organización se localizó en este punto debido a que los dueños son propietarios del lote; lo cual suprime costos indirectos como el arriendo de un nuevo lugar. Así mismo, la empresa considera que es una localización estratégica a las fueras de la ciudad de Ibagué, puesto que allí están más cercas de las fincas

y minimizan en gran porcentaje el desplazamiento de sus clientes a través de la ciudad, lo cual lo ven como un pilar de competitividad. Su ejercicio comercial es el desarrollo, producción y distribución de maquinaria agrícola. Para comenzar, es necesario conocer el proceso de transformación de la materia prima (tubos y láminas) el cual comienza cuando almacenan las láminas que reciben en un sitio ya establecido. Después son llevadas a corte y moldeamientos. Por otro lado, el proceso llevado a cabo para los tubos es similar; éstos son cortados por una cizalla mecánica, después pasa al área de maquinado. Seguido de esto, se lleva al área de ensamblaje hasta llegar finalmente al re-soldado. Por último, el proceso de limpieza de los residuos del anterior proceso es fundamental, puesto que el paso a seguir es llevarlo a pintura y laca, donde termina el procesamiento y se obtiene un nuevo Producto Terminado. En la distribución de planta y específicamente en cada puesto de trabajo, cada operario tiene un locker dotado con las herramientas necesarias para su función, flexómetros, brocas y otros elementos útiles para llevar a cabo el trabajo en el taller. Cada puesto de trabajo está debidamente marcado y diferenciado de los demás, conservando el orden y organización dentro de la planta.

Para la programación y procesamiento de trabajos en el taller, SOTO trabaja de dos maneras; bajo pedido de los clientes, los cuales procesan la orden de acuerdo a la llegada de los mismos y en serie. Para la elaboración de maquinaria bajo este último criterio, analizan información de los años anteriores con el fin de conocer la posible demanda que se avecina; de esta forma, se aseguran de tener maquinaria en Stock para entrega inmediata sus clientes. Así mismo, al pactar una nueva solicitud, SOTO solicita a sus clientes un plazo promedio de 30 días para la entrega de sus pedidos. En caso de no alcanzar a cumplir con el tiempo estipulado, la empresa tiene implementada una estrategia para sobrellevar la situación; la compañía asume los costos de transporte y acarreo de la maquinaria hasta el sitio donde el cliente la requiera. De esta forma buscan conservar las relaciones comerciales.

En cuanto la automatización, sistematización y uso de sistemas de información para la toma de decisiones, todas las máquinas con las que cuenta la empresa requieren de por lo menos un operario, el cual tiene funciones específicas ya establecidas durante el corte del material. Sin embargo, cuentan con un pantógrafo el cual trabaja a través de una memoria la cual contiene comandos de corte y características especiales ya establecidos para su funcionamiento. Del mismo modo para la programación de pedidos a sus proveedores, la organización adquirió e implementó un Software llamado Syscafe para el control y manejo con sus proveedores. Este Software trabaja con un margen del 30% y al llegar al límite mencionado, el programa lanza una alerta indicando que se debe realizar un nuevo pedido a los proveedores.

Bajo una política institucional, los mantenimientos al taller de trabajo se realizan una vez al año. Cumplido el tiempo, es contratada una empresa externa la cual se encarga del desarme, lubricación, mantenimiento e informes en general de toda la maquinaria existente en el taller de trabajo. Así mismo, cada sábado al terminar la jornada laboral, los operarios deben dejar limpios y aseados los puestos de trabajo.

Conclusiones

- ❖ Conocer la demanda más probable en un periodo de tiempo permite desarrollar programas para la producción, que permitan a la compañía el rendimiento deseado, cumpliendo con estándares de calidad, eficacia y eficiencia, sin mantener grandes stocks en tiempos excesivos, los cuales acarrearán costos innecesarios en la organización.
- ❖ El *Makespan* es un criterio de un complejo proceso de minimización y tal vez, es el más importante en los sistemas de Producción. Las posibles demoras provenientes de este criterio acarrearán graves inconvenientes a la organización, exponiendo las relaciones comerciales con los clientes
- ❖ Implementar *Scheduling* en las líneas de trabajo puede parecer costoso y complejo. Sin embargo, los resultados otorgados por el personal especializado servirán para regular el procesamiento de trabajos en periodos de tiempos posteriores, lo cual es una ventaja competitiva frente a sus competidores con sistemas tradicionales.
- ❖ En las organizaciones, el *Scheduling* es propio del nivel operativo. Los otros niveles jerárquicos, se ocupan de temas de planeación a mediano y largo plazo, plan de inversiones y otros temas de proyección monetaria y de resultados.
- ❖ Los sistemas de información y los Sistemas Expertos son poderosas herramientas para el apoyo en el desarrollo de las tareas los funcionarios. Así mismo, soportan la toma de decisiones de los altos niveles de la organización.

Referencias Bibliográficas

- Albert Díaz, M. E., & Hernández Torres, M. (2010). Sistema De Control De Gestión Para La Integración Estratégica. *Ingeniería Industrial*, 29(1), 5 pág.
- Alberto, C., & Castillo, T. (2017). Las empresas exportadoras del Tolima y su papel en la dinámica del sector comercio exterior en el departamento. *Camara de Comercio*.
- Álvarez, L., Caicedo, C., Malaver, M., & Méndez, G. (2011). Investigación y desarrollo de un prototipo de Sistema Experto para Scheduling en Pymes con entorno Job Shop. *Revista ...*, (12), 125–136. Retrieved from <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/article/viewFile/605/828>
- Amjad, M. K., Butt, S. I., Kousar, R., Ahmad, R., Agha, M. H., Faping, Z., ... Asgher, U. (2018). Recent Research Trends in Genetic Algorithm Based Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9270802>
- Atan, T., & Eren, E. (2018). Optimal project duration for resource leveling. *European Journal of Operational Research*, 266(2), 508–520. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.022>
- Bürgy, R., & Bülbül, K. (2018). The job shop scheduling problem with convex costs. *European Journal of Operational Research*, 268, 82–100. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.027>
- Chung, S., Yang, M., & Kao, C. (2012). Reactive scheduling to minimize makespan of parallel-machine problem with job arrival in uncertainty. *African Journal of Business Management*, 6(27), 7995–8009. <https://doi.org/10.5897/AJBM11.477>
- Ciani, C. (2017). Sector metalmecánico del departamento de santander en el periodo 2010 – 2015, (October).
- Correa Espinal, A. A., Rodríguez Velásquez, E., & Londoño Restrepo, M. I. (2008). Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Job Shop: Estado del arte. *Avances En Sistemas E Informática*, 5(3), 151–161.
- Cortés, C., Flor, C., José, F., García, L., & José, J. (1996). Estrategias de producción en empresas manufactureras Alicantinas.
- Dauz, S. (1998). Multi-resource shop scheduling with resource flexibility, 107.
- Duncan, W. P. (2011). Methods for reducing changeover times through scheduling. *ProQuest Dissertations and Theses*, 184. Retrieved from http://proxy.mul.missouri.edu/login?url=http://search.proquest.com/docview/865649131?accountid=14576%5Cnhttp://ew3dm6nd8c.search.serialssolutions.com/?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&rfr_id=info:sid/ProQuest+Dissertations+%26+Theses+A%26I&r
- Framinan, J. M., & Perez-Gonzalez, P. (2018). Order scheduling with tardiness objective: Improved approximate solutions. *European Journal of Operational Research*, 266(3), 840–850. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.064>

- Györgyi, P., & Kis, T. (2018). Minimizing the maximum lateness on a single machine with raw material constraints by branch-and-cut. *Computers and Industrial Engineering*, 115(June 2017), 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.11.016>
- Herrmann, J. W. (2004). Information flow and decision-making in production scheduling. *IIE Annual Conference and Exhibition 2004*, 1811–1816. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-30044448973&partnerID=40&md5=24e6d24cc2a2ffbc86840d56a0dc5c4>
- Higuaita, O. (2009). *PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UNA PLANTA PROTOTIPO DE PRODUCCIÓN FLEXIBLE E INTELIGENTE*.
- Jimenez, A. (2012). Solución al problema de Flow Shop flexible empleado GA Chu-Beasley, 167.
- Kacem, I., Hammadi, S., & Borne, P. (2002). Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems : hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic, 60, 245–276.
- Koulamas, C., & Panwalkar, S. S. (2018). New index priority rules for no-wait flow shops. *Computers and Industrial Engineering*, 115(December 2017), 647–652. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.015>
- Liu, Z., Lu, L., & Qi, X. (2018). Cost allocation in rescheduling with machine unavailable period. *European Journal of Operational Research*, 266(1), 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.015>
- Lu, H., Shi, J., Fei, Z., Zhou, Q., & Mao, K. (2018). Analysis of the similarities and differences of job-based scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 0, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.051>
- Marquez, J. E. (2012). Optimización de la programación (scheduling) en Talleres de Mecanizado Optimización de la programación (scheduling) en Talleres de Mecanizado, 212.
- Méndez Giraldo, G., Álvarez Pomar, L., Caicedo Cárdenas, C., & Malaver Gallego, M. (2013). *Sistema experto para la programación de producción - investigación y desarrollo de un prototipo*.
- MORA, A. M. R. (2015). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA EXPERTO PARA MINIMIZAR EL RIESGO DE FRAUDE NO PRESENCIAL PROCESADO CON TARJETAS DE CRÉDITO, 101.
- Ortiz Triana, V. K., & Caicedo Rolón, Á. J. (2014). Programación óptima de la producción en una pequeña empresa de calzado – en Colombia. *Ingeniería Industrial*, 35(2), 114–130. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4786532&info=resumen&idioma=ENG>
- Osorio, C. J., Castrillon, O., Toro, J., & Orejuela, J. P. (2008). Modelo de programación jerárquica de la producción en un Job shop flexible con interrupciones y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. *Revista Ingeniería E Investigación*, 28(2),

72–79.

- Osorio, J. C., Lasso, D. F., & Ruiz, G. A. (2012). Job Shop Scheduling Biobjetivo Mediante Enfriamiento Simulado Y Enfoque De Pareto. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(21), 113–126.
- Ovalle, A. M., Ocampo, O. L., & Acevedo, M. T. (2013). Identificación de brechas tecnológicas en automatización industrial de las empresas del sector metalmecánico de Caldas, Colombia. *Ingeniería Y Competitividad*, 15(1), 171–182.
- Procolombia. (2017). La manufactura en Colombia | Colombiatrade - Compradores. Retrieved September 9, 2018, from <http://www.procolombia.co/compradores/es/explore-oportunidades/manufactura-en-colombia>
- Romero, R. R., Grandón, M. P., & Abufarde, F. B. (2004). INDUSTRIA DEL ASERRÍO, 19–24.
- Ruiz, R., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 205(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.024>
- Salto, C. (2000). ALGORITMOS EVOLUTIVOS AVANZADOS COMO SOPORTE DEL PROCESO PRODUCTIVO.
- SENA. (2012). Caracterización Del Sector Metalmecánico Y Área De Soldadura, 1.
- Universidad nacional. (2017). Industria metalmecánica, a competir con sostenibilidad - UNIMEDIOS: Universidad Nacional de Colombia. Retrieved July 22, 2018, from <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/industria-metalmecanica-a-competir-con-sostenibilidad.html>
- Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Economía., G. B., Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Teoría y Política Económica., G. A. B., & Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Economía., J. J. M. (2012). *Cuadernos de economía : revista del Departamento de Economía, Universidad Nacional de Colombia. Cuadernos de Economía* (Vol. 31). Departamento de Economía, Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ceconomia/article/view/37978>
- Vincent T'kindt, J.-C. B. (2001). *Multicriteria Scheduling Second Edition* (Vol. 40). [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010316\)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C)
- Winckfl, P. A., Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., ... (Nrcs)., D. D. A. D. L. E. (Usda). S. D. C. D. R. N. (2009). Planeación Estratégica. *Mendeley Desktop*, 44(6879), 17. Retrieved from <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AUGURA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=002625%5Cnhttp://www.mendeley.com%5Cnhttp://www.nature.com/nature/journal/v416/n6879/full/416389a.html>
- Ye, H., Li, W., & Abedini, A. (2017). An improved heuristic for no-wait flow shop to

minimize makespan. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 273–279.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.04.007>