

**MODELO PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
EN AMBIENTES JOB SHOP FLEXIBLES APLICADO A UN CASO
DE ESTUDIO**

**CRISTIAN ANDRES BARRERA SALGADO
CRISTIAN DAVID MILLAN PINEDA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERIA INDUSTRIAL
2018**

**MODELO PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
EN AMBIENTES JOB SHOP FLEXIBLES APLICADO A UN CASO
DE ESTUDIO**

**CRISTIAN ANDRES BARRERA SALGADO
CRISTIAN DAVID MILLAN PINEDA**

Trabajo de grado para optar por el título en Ingeniería Industrial

Director: Leidy Carolina Vargas Acuña

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERIA INDUSTRIAL
2018**

NOTA DE ACEPTACION

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

**Guadalajara de Buga, Noviembre
del 2018**

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
4. OBJETIVOS.....	6
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
5. JUSTIFICACIÓN.....	7
6. MARCO DE REFERENCIA.....	9
6.1 MARCO CONCEPTUAL.....	9
6.2 ESTADO DEL ARTE.....	10
7. GENERALIDADES DE MODELOS MATEMÁTICOS: PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES.....	14
7.1 EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN.....	14
7.2 EL PROBLEMA DE MÚLTIPLES RUTAS.....	16
7.3 PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES EN AMBIENTES JOB-SHOP FLEXIBLES.....	16
8. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	18
8.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE PRODUCCIÓN.....	20
8.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS.....	22
8.3 DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS.....	25
8.3.1 EQUIPOS DE BOMBEO.....	25
8.3.2 EQUIPOS DE FILTRACION.....	27
8.3.3 EQUIPOS DE DRAGADO.....	29
8.3.4 EQUIPOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	29
8.4 INDICADORES.....	30
8.4.1 INDICADORES DE EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD.....	30
9. DATOS DE ENTRADA AL MODELO.....	33
9.1 CLASIFICACIÓN ABC DE LOS PRODUCTOS.....	33
9.2 PARÁMETROS DE PRODUCTO TIPO A.....	35
9.2.1 PARÁMETROS.....	35
9.3 SUPUESTOS.....	38
10. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMATICO.....	40

10.1	CONJUNTOS	40
10.2	PÁRAMETROS	40
10.3	VARIABLES DE DECISIÓN	41
10.4	FUNCIÓN OBJETIVO	41
10.5	RESTRICCIONES.....	43
11.	RESULTADOS.....	47
12.	CONCLUSIONES	57
13.	LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	67
14.	BIBLIOGRAFÍA	68
15.	APÉNDICE	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Caracterización de procesos.....	23
Tabla 2 Caracterización de procesos.....	24
Tabla 3 Indicadores de eficiencia situación actual.	32
Tabla 4 Clasificación ABC Primer nivel (familia de productos)	34
Tabla 5 Clasificación ABC Segundo nivel (productos de familia tipo A)	34
Tabla 6 Secuencia de operaciones por subproducto	36
Tabla 7 Tiempo de procesamiento para cada subproducto por operación.	36
Tabla 8 Indicadores de eficiencia del modelo propuesto	49
Tabla 9 Indicadores de eficiencia de modelo que minimiza el tiempo máximo de terminación de cada operación	53
Tabla 10 Consolidado de resultados en porcentaje de utilización	54
Tabla 11 Consolidado de resultados en porcentaje de tiempos ociosos	54
Tabla 12. Indicadores de eficiencia para tres equipos de bombeo estacionario con modelo matemático	61
Tabla 13 Indicadores de eficiencia para tres equipos de bombeo estacionario con supuesto	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo del sistema productivo del caso de estudio	19
Figura 2 Distribución del área de producción.....	21
Figura 3 Equipo de Bombeo estacionario.....	25
Figura 4 Equipo de bombeo móvil.....	26
Figura 5 Equipo de bombeo flotante	26
Figura 6 Filtro precapa.....	27
Figura 7 Filtro trómel.....	27
Figura 8 Filtro rotatorio de vacío.....	28
Figura 9 Filtro de banda de presión	28
Figura 10 Equipo de dragado	29
Figura 11 Equipo de tratamiento térmico.....	30
Figura 12 Estructura del equipo de bombeo estacionario.....	35
Figura 13 Diagrama de Gantt del proceso de fabricación de un equipo de bombeo	37
Figura 14 Diagrama de Gantt proceso productivo propuesto por el modelo matemático	48
Figura 15 Diagrama de Gantt de modelo que minimiza el tiempo máximo de terminación de cada operación	52
Figura 16 Comparativo de indicadores de eficiencia.....	55
Figura 17 Diagrama de Gantt 1 de modelo para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 1).....	57
Figura 18 Diagrama de Gantt modelo para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 2)	58
Figura 19 Diagrama de Gantt de modelo para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 3).....	59
Figura 20 Diagrama de Gantt para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 1).....	62
Figura 21 Diagrama de Gantt para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 2).....	63
Figura 22 Diagrama de Gantt para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 3).....	64

1. RESUMEN

El problema de programación de operaciones en ambientes Jobshop flexibles (En adelante FJSP), es una variación del problema clásico de programación de operaciones en sistemas productivos intermitentes. El FJSP es un problema NP-hard y principalmente se centra en la solución de dos problemáticas. La primera se refiere al problema de asignación de máquinas o recursos a un conjunto de operaciones pendientes por procesar, y el segundo, es el problema de secuenciación de operaciones por cada una de las máquinas asignadas (Yazdani, Amiri, & Zandieh, 2010).

En este documento se presenta un modelo matemático que resuelve el problema de la programación de operaciones en ambientes JobShop Flexibles, construido a partir de las necesidades de una empresa caso de estudio y de la revisión de la literatura, utilizando lenguaje de programación AMPL. El modelo propuesto presenta una mejora de acuerdo a la situación actual de la empresa caso de estudio, disminuyendo el tiempo de procesamiento del producto analizado en 8,63 días, aumentando la productividad en 21% y disminuyendo en promedio 60% de tiempos ociosos.

ABSTRACT

The scheduling problem in flexible Jobshop environments (FJSP) is a variation of the scheduling problem in intermittent production systems. The FJSP is a NP-hard problem and mainly focuses on the solution of two problems. The first refers to the problem of assigning machines or resources to a set of operations, and the second, the problem of sequencing operations for each of the assigned machines (Yazdani, Amiri, and Zandieh, 2010).

This document presents a mathematical model that solves the problem of programming operations in flexible JobShop environments, built from the needs of a company case study and literature review, using programming language AMPL. The proposed model presents an improvement according to the current situation of the company case study, reducing the processing time of the product analyzed in 8.63 days, increasing productivity by 21% and decreasing on average 60% of idle time.

2. INTRODUCCIÓN

“La programación de las operaciones es el proceso de organizar, elegir, y dar tiempos al uso de recursos para llevar a cabo todas las actividades necesarias, para producir las salidas deseadas en los tiempos deseados, satisfaciendo, a la vez, un gran número de restricciones de tiempo y relaciones entre actividades y recursos” (Morton & Pentico, 1995). El problema típico de la programación de las operaciones se puede caracterizar en dos grandes aspectos, el primero siendo la carencia de disponibilidad de recursos cuando se trabajan múltiples proyectos y el segundo la priorización de los trabajos y la secuenciación de las actividades de estos. En la industria metalmecánica es común encontrar este problema, esto suele deberse a las características intrínsecas de la industria, las cuales tienden a ser empresas que funcionan bajo sistemas de producción intermitente con políticas de producción bajo pedido. Además, estas acostumbran a tener múltiples proyectos en producción simultánea, agregando así complejidad a la problemática de la programación de las operaciones.

La complejidad de la programación de las operaciones se incrementa cuando se habla de un sistema de producción intermitente bajo pedido aplicado a la industria metalmecánica, puesto que en esta se suele manejar gran variedad de productos a ser fabricados simultáneamente, los cuales se caracterizan por tener una secuenciación de actividades propias de cada producto, más aún cuando existe la posibilidad de tener varias máquinas en paralelo. La complejidad se ve reflejada al momento de intentar dar cumplimiento a los objetivos organizacionales, como la satisfacción del cliente, manejo de inventarios y utilización de recursos.

En el presente trabajo, se considera como caso de estudio una empresa metalmecánica enfocada al diseño y elaboración de sistemas de tratamiento de fluidos, la cual funciona bajo un sistema de producción intermitente bajo pedido con política multi-proyecto, en donde las diferentes órdenes compiten por el uso de los recursos. Los principales problemas que se presentan en el área de producción son; tiempos de entrega tardíos con respecto a lo pactado con el cliente, y sobre costos generados por el reproceso. Estos problemas son causados por dos factores principales, la secuenciación de las actividades y la asignación de los recursos (maquinaria). Se propone un modelo para la

programación de la producción teniendo en cuenta los parámetros y restricciones presentados por el área de producción.

Este documento se desarrolla de la siguiente manera: En la sección 3 plantea el problema de investigación, en donde se especifica la complejidad para la solución del problema. Sección 4, planteamiento de objetivos, tanto general como específicos. Sección 5, describe la importancia de abordar la problemática de la programación de la producción para ambientes flexibles de Job shop bajo pedido. Sección 6, revisión bibliográfica de los temas a tratar en el presente documento. Sección 7, Explicación de los principales problemas para el FJSP y se realiza una revisión bibliográfica del cómo se ha abordado cada problema en la literatura. Sección 8, descripción del caso de estudio. Sección 9, determinación de los datos necesarios para ser ingresados en el modelo, adicionalmente se presentan los indicadores utilizados para comprobar el rendimiento del modelo. Sección 10, formulación del modelo matemático que soluciona el problema presentado. Sección 11, se muestran resultados y se genera un análisis comparativo entre la situación actual y la arrojada por el modelo matemático. Por último, en la sección 12, se presentan las conclusiones del trabajo, además de propuestas para futuro proyectos.

3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La programación de operaciones consiste en la asignación de recursos a un conjunto de operaciones que requieren ser procesadas durante un periodo de tiempo. De acuerdo al sistema productivo de la empresa, el problema de programación de operaciones puede variar en su nivel de complejidad (Watanabe, Ida, & Gen, 2005). El presente documento presenta un caso de estudio basado en una empresa metalmecánica, dedicada a la fabricación de productos de manejo de aguas, filtración, dragado y tratamiento térmico.

El sistema productivo bajo el cual se comporta el área de producción de la empresa, es un sistema de producción intermitente, también conocido como Jobshop. Un jobshop es un sistema de producción en el cual la elaboración de un producto se realiza por lotes pequeños y la distribución física del área se encuentra compuesta comúnmente por células o áreas de trabajo conformadas por máquinas similares entre sí. La programación de operaciones en este tipo de ambientes ha sido un tema de gran interés investigativo por su grado de complejidad (Zhang & Gen, 2005).

Al igual que en la mayoría de sistemas productivos Jobshop, la empresa caso de estudio funciona bajo un modelo de producción bajo pedido o make to order, lo cual se refiere a que el proceso productivo inicia solo cuando un cliente ha generado una orden de proceso. Es común para este tipo de empresa ofrecer gran variedad de productos debido a la posibilidad de personalización requerida por cada cliente. Por lo tanto, los niveles de inventario de producto terminado suelen ser bajos, lo cual disminuye la capacidad de respuesta a cambios de la demanda.

Por otra parte, dentro de cada una de las áreas o células de trabajo de la empresa caso de estudio, se encuentran máquinas con características idénticas y ubicadas en paralelo, lo cual permite que un producto pueda ser elaborado por múltiples rutas (Salazar & Medina, 2010). Por lo tanto, se presenta una variación del problema clásico de programación de operaciones en ambientes Jobshop,

conocida como el problema del Jobshop flexible. El problema de programación de operaciones en jobshop flexibles es una extensión del problema clásico del jobshop, en el cual se permite que una operación pueda ser procesadas por cualquier máquina de un conjunto de máquinas (Xing, Chen, & Yang, 2009).

Actualmente, en el área de producción de la empresa caso de estudio, las decisiones referentes a la secuenciación y priorización de los proyectos se están realizando de forma empírica, esta metodología para la programación de la producción carece de un análisis de las condiciones de capacidad del área, es decir, no se tiene en cuenta una secuencia ordenada de producción para cada producto, ni tampoco una correcta utilización de los recursos, esto a su vez implica una priorización inadecuada de los proyectos que compiten por estos.

Lo anteriormente escrito, indica para la empresa un porcentaje promedio de utilización de recursos del 69,28%, algunos de los casos críticos, son soldadura y pintura, actividades las cuales cuentan con una utilización de 27,96% y 32,56% respectivamente. En cuanto a tiempos ociosos del área de producción, se cuenta con un índice del 30,73% consecuencia de la baja utilización de los recursos del área de producción, los índices anteriores son específicamente para la elaboración de un equipo de bombeo estacionario, el cual presenta un tiempo de elaboración de 48.75 días

La empresa caso de estudio presenta un incumplimiento del tiempo de entrega en un 70% de los proyectos, es decir, 7 de cada 10 proyectos están siendo entregados en fechas posteriores a las pactadas con el cliente. Las principales causas que generan estos retrasos son: reprocesos y una planificación inadecuada de la disponibilidad de los recursos y equipos. Estos factores de forma directa o indirecta afectan los costos de producción, los cuales se ven perjudicados en un incremento del 25% por proyecto, según lo presupuestado por la empresa. Estos sobrecostos son asumidos por la empresa y disminuyen el margen de utilidad.

Adicionalmente, Estos altos niveles de incumplimiento pueden llevar a la pérdida de la confianza de los clientes, baja competitividad, disminución en la participación en el mercado, y en el peor de los casos, el cese total de las actividades operativas. Por tal motivo, en el presente documento se busca dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación.

¿Cómo afrontar el problema de la programación de la producción en ambientes Job Shop Flexible para la empresa en estudio?

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Plantear un modelo de programación de la producción en ambientes Job shop flexibles bajo pedido, con el fin de mejorar el desempeño operativo de la empresa en estudio.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico de los procesos dentro del área de producción de la empresa en estudio, con el fin de determinar su estado actual en términos de productividad y eficiencia.
- Identificar y definir las variables y parámetros que afectan la producción de la empresa en estudio, con el propósito de introducirlos en un modelo que optimice su programación.
- Evaluar el desempeño del modelo mediante su aplicación en un caso de estudio representativo de la empresa, con la finalidad de concluir sobre su aplicabilidad.

5. JUSTIFICACIÓN

El proceso de manufactura o producción en un ambiente Job shop bajo pedido se encuentra fuertemente regido por la demanda real, puesto que, en este tipo de sistemas de producción, las empresas fabrican para cubrir las necesidades específicas de cada uno de sus clientes. Es un proceso en el cual el cliente participa continuamente en la elaboración del producto, siendo el cliente quien da inicio a la producción en el momento que emite la orden de compra o el pedido, especificando las características que considera relevantes y necesarias del producto.

Esta característica de pedidos únicos hace que el manejo de los inventarios de producto terminado sea un tema complejo puesto que no permite manejar ningún tipo de stock de seguridad para afrontar la demanda, lo cual conlleva a que las empresas que funcionan bajo este sistema de producción incurran en un nivel de respuesta crítico de la demanda y dificultades en el cumplimiento de las fechas de entrega (Chung, Lee, Shin, & Park, 2005).

Adicional a esto, se debe tener en cuenta que la programación del taller y la secuenciación de las actividades puede llegar a ser tan única para cada pedido como el producto mismo. Otro factor importante, es la priorización de los proyectos entrantes al sistema de producción, para los cuales su nivel de complejidad radica en la definición de los criterios a tener en cuenta para la priorización de estos, también se debe considerar el problema de la programación dinámica de las ordenes o reprogramación de ordenes en curso cada que entra un proyecto nuevo al área de producción.

Finalmente, la programación de la producción en ambientes de manufactura Job shop bajo pedido se enfrenta a la problemática de la limitación o restricción de recursos disponibles para llevar a cabo las actividades productivas, y más aún cuando la empresa maneja un sistema de producción multi-proyecto, en el cual diferentes órdenes compiten por el uso de estos recursos (Castro e. a., 2012).

La carencia de un modelo para la planeación y programación de la producción influye directamente en la productividad y eficiencia de la compañía, puesto que una errónea planificación y asignación de recursos para la producción contribuye

a que se tengan que incurrir en costos innecesarios para llevar a cabo las actividades cotidianas, lo cual a su vez afecta directamente el precio de sus productos. Se pretende enfocar los esfuerzos en un modelo que minimice el tiempo de entrega del pedido, asignando de una forma óptima los recursos de la compañía.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1 MARCO CONCEPTUAL

Sistemas de producción: Cuando se habla de sistemas productivos, se hace referencia a las características que componen el proceso de producción, como lo son: la continuidad con la que se produce, el control de inventarios, volúmenes de producción y variedad de productos, entre otros.

De acuerdo al conjunto de características que componen el proceso productivo, este puede clasificarse dentro de diferentes categorías, si se tiene en cuenta la continuidad de producción puede clasificarse como sistemas de producción intermitentes o continuos.

El interés del presente trabajo se centra en sistemas productivos intermitentes, los cuales se caracterizan por estar orientados a la fabricación de pequeños lotes de producción, pero con capacidad de procesar gran variedad de productos, incluso elaborar productos personalizados. Es común para este tipo de sistemas productivos distribuir sus máquinas en grupos similares por áreas, y los trabajos suelen seguir rutas diferentes. Este concepto de producción intermitente también se conoce como JobShop (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).

Una variación del Jobshop, es un sistema de producción intermitente flexible (Jobshop Flexible), el cual se caracteriza por tener máquinas en paralelo, lo cual agrega complejidad a la programación de operaciones, ya que se genera el problema de asignación de máquinas a trabajos, el cual es diferente al problema inicial de secuenciación de trabajos por cada una de las máquinas (Krajewski, Malhotra, & Ritzman, 2008). Es importante no confundir la secuenciación de actividades o precedencia de cada trabajo con la secuenciación de operaciones o ruta que toma cada operación para su procesamiento.

Producción bajo pedido: La producción bajo pedido o “Make to order” es una metodología de producción en la cual el proceso productivo inicia solo después de haber recibido una orden de producción por parte del cliente (Arreola & DeCroix, 1996). Por lo tanto, es común que se mantengan bajos niveles de inventario de producto terminado debido a la variabilidad de los productos consecuencia de las personalizaciones de los clientes. Esto disminuye la

capacidad de respuesta de respuesta a la demanda que tienen este tipo de empresas (Alomia & Lozano, 2013).

Múltiples rutas: El problema de múltiples rutas se genera por la posibilidad de tener máquinas con capacidades y cualidades idénticas ubicadas en paralelo dentro de un área de producción. Estas máquinas pueden realizar el mismo tipo de trabajo, por lo tanto, un trabajo se puede procesar en cualquiera de estas máquinas, y una vez procesado por cualquiera de estas, queda terminado (Sipper & Bulfin, 1998).

6.2 ESTADO DEL ARTE

La programación de operaciones hace referencia a la asignación de recursos para realizar un conjunto de actividades en un periodo de tiempo definido. Muchos problemas de programación en las industrias manufactureras son complejos y de gran dificultad para ser abordados por las técnicas convencionales de optimización. La complejidad de estos problemas depende directamente de las restricciones y los ambientes de trabajo bajo los cuales se encuentra definido el problema. El problema de programación de operaciones en ambientes Job-Shop es uno de los problemas de optimización combinatoria más difíciles en el campo de la programación (Watanabe, Ida, & Gen, 2005).

La programación de operaciones en ambientes Job-Shop puede llegar a ser aún más compleja cuando se agrega flexibilidad al sistema de manufactura, puesto que existen máquinas idénticas paralelas que permiten la programación de operaciones por diferentes rutas, haciendo así, que el problema sea considerado NP-Hard combinatorio (Garey, Johnson , & Sethi, 1976).

A pesar de que se reconoce la complejidad del problema FJSP, existen muchos más estudios enfocados en el problema de programación de operaciones job-shop simples que en el problema flexible. Unos de los primeros en abordar el problema FJSP fueron (Brucker & Schlie, 1990), quienes desarrollaron un algoritmo polinomial para la resolver este problema aplicado a solo dos trabajos. En los últimos años se han aplicado diferentes heurísticas y meta heurísticas para dar solución al problema, como lo son, la búsqueda tabú y algoritmos genéticos, entre muchos otros.

Por otra parte, el problema también ha sido abordado desde dos perspectivas distintas, enfoque jerárquico y enfoque integrado. El enfoque jerárquico aborda el problema de programación de operaciones en dos etapas, la asignación de máquinas y la secuenciación de máquinas con el fin de facilitar la resolución del problema, mientras que el enfoque integrado busca dar solución al problema sin realizar esta distinción por etapas, siendo entonces una metodología de mayor complejidad pero que ofrece mejores resultados.

El enfoque jerárquico fue utilizado por (Brandimarte, 1993), en donde se aplica el enfoque de descomposición para resolver el FJSP. Se resolvió el problema de asignación de forma simple haciendo uso de reglas de despacho ya existentes, y se centró en la utilización de búsqueda tabú para dar solución a la secuenciación de las operaciones. Esta misma metodología fue aplicada por (Barnes & Chambers, 1996) en donde se utiliza un algoritmo dinámico y adaptable de búsqueda tabú. De igual forma, (Hurink, Jurisch, & Thole, 1994), aplicaron el algoritmo de búsqueda tabú basado en el enfoque integral para dar solución al problema de programación de operaciones en máquinas multipropósito.

(Dauzere & Paulli, 1997) Presentan una nueva estructura de vecindario de búsqueda local para el problema, en donde no hay distinción entre reasignar o volver a secuenciar una operación, finalmente aplican búsqueda tabú de enfoque integral. (Mastrolilli & Gambardella, 2000) Proponen dos nuevos vecindarios de soluciones para el algoritmo de búsqueda tabú, con los cuales buscan reducir el conjunto de vecindarios posibles a un subconjunto el cual siempre tendrá el tiempo de procesamiento más corto.

En cuanto a los estudios realizados por (Chen, Ihlow, & Lehmann, 1999), presentan un nuevo algoritmo genético para dar solución al problema de programación de operaciones en ambientes job shop flexibles, el cual es una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución que intenta replicar el comportamiento de la selección natural y genética. (Zhang & Gen, 2005) Presenta una nueva representación basada en operaciones de varias etapas para hacer más simple el cromosoma. De esta forma, logran garantizar que por medio de programación dinámica se apliquen todos los cruces y mutaciones posibles. (Xia & Wu, 2005) Presentan un modelo multi-objetivo de optimización híbrido, el cual combina optimización por enjambre de partículas para resolver el problema

de asignación, y el algoritmo de recocido simulado para abordar la secuenciación de las operaciones en un conjunto de máquinas.

(Fattahi, Mehrabad, & Jolai, 2007) Presentan seis diferentes algoritmos para abordar el problema aplicando un modelo matemático, dos meta-heurísticas y los dos enfoques (integral y jerárquico).

(Pezzella, Morganti, & Ciaschetti, 2008) Presentan un algoritmo genético para el problema de programación de operaciones en ambientes job shop flexibles, el cual utiliza diferentes estrategias para generar la población inicial, la selección de candidatos para reproducción y la reproducción de los nuevos individuos. Demuestran que entre mayor sea la integración de estas estrategias mejores serán los resultados. (Gao, Sun, & Gen, 2008) Abordan el problema con tres objetivos en mente, minimizar el tiempo de procesamiento, minimizar la máxima carga de trabajo de las máquinas y minimizar la carga de trabajo total. Para lo cual desarrollan un algoritmo genético híbrido con enfoque integral.

Por su parte, (Cortes, Garcia, Pastor, & Andrés, 2005) enfrentan el problema de asignación y secuenciación de operaciones en máquinas paralelas, donde los tiempos de procesamiento son dependientes de la asignación de recursos, finalmente presentan la aplicación del modelo en un caso problema propuesto. (Osorio, Castrillon, Toro, & Orejuela, 2008) Estudia la aplicación de heurísticas de jerarquía para la planificación y programación de operaciones, teniendo en cuenta la posibilidad de interrupciones y tiempos de alistamiento. En (Alomia & Lozano, 2013) se presenta un modelo de programación de operaciones enfocado en la optimización de consumo de recurso energético aplicado a un caso de estudio.

En el estudio realizado por (Pérez, Jöns, & Hernández, 2015) se propone un algoritmo de estimación de distribuciones para secuencia miento “AEDS” por sus siglas, para dar solución al problema de secuenciación en configuraciones Job shop flexibles, este algoritmo intenta encontrar la relación entre las variables de entrada, trabajos, operaciones, etc., para optimizar la variable de salida del proceso de manufactura. Por su parte, un año después, (Zhang & Wong, 2016) abordan el problema de planificación de operaciones con enfoque en las especificaciones de productos y secuenciación de operaciones, para lo cual plantean una metaheurística para abordar el proceso de secuenciación y

planeación integrado “IPPS” por sus siglas en inglés, con el objetivo de minimizar el tiempo de procesamiento del proceso de manufactura.

En (Zhang, Tang, Wu, & Wang, 2017) se plantea un enfoque diferente para el problema de programación de operaciones en ambientes job shop flexibles, el cual consiste en la optimización de la eficiencia energética del proceso productivo. Se presenta un modelo matemático de programación lineal entera mixta para dar solución al problema de asignación y secuenciación de operaciones, mientras que se aplica una heurística para abordar el problema de consumo energético. Este mismo año, (Himmiche, Aubry, Marangé, & Péltin, 2017) Abordan el problema de programación de operaciones desde un enfoque de sistemas de eventos discretos basados en la heurística “Timed Automata”, y sus resultados son comparados con el enfoque clásico de programación lineal entera mixta.

(Defersha & Movahed, 2018) desarrollaron un modelo de programación lineal que apoya la metaheurística de algoritmo genético para abordar la problemática de programación de operaciones en job-shop flexibles, por lo tanto se considera como un enfoque híbrido del problema.

A lo largo de los años se han aplicado diferentes metodologías para abordar el problema de programación de operaciones en ambientes job shop flexibles, como búsqueda tabú, algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas, programación dinámica, etc. Sin embargo, lo que todas comparten, es el enfoque para resolver el problema, ya sea integral o jerárquico, se busca la mejor forma de asignar los trabajos al conjunto de máquinas y la óptima secuenciación de estas operaciones en las máquinas asignadas con el objetivo de minimizar el tiempo de procesamiento (makespan).

Según la revisión de la literatura, el problema del jobshop flexible no ha sido abordado en tanta magnitud como el problema del jobshop clásico, por otra parte, su aplicación en casos de estudio no ha sido muy representativa de la situación real de las empresas, por ende, se pretende contribuir a la ampliación del conocimiento acerca de esta problemática, mediante la propuesta de un modelo matemático que se adapte a las necesidades y características de una empresa real caso de estudio.

7. GENERALIDADES DE MODELOS MATEMÁTICOS:

PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES

"Programar es el proceso de organizar, elegir y dar tiempos al uso de recursos para llevar a cabo todas las actividades necesarias, para producir las salidas deseadas en los tiempos deseados, satisfaciendo a la vez un gran número de restricciones de tiempo y relaciones entre las actividades y los recursos", (Morton & Pentico, 1993).

La programación se puede comprender entonces, como la toma de decisiones de cómo, cuándo y dónde llevar a cabo cierta actividad, sujeto a restricciones propias del proceso.

A continuación, se abordarán los problemas del “como” y “cuando”, los cuales se pueden interpretar como *el problema de asignación*. Por otro lado, también se estudiará el “donde”, cualidad que hace referencia *al problema de la flexibilidad por múltiples rutas*.

7.1 EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN

El problema de asignación es un problema particular de localización, por lo tanto, lo que busca esta metodología es encontrar la combinación óptima entre trabajos a ser procesados y máquinas disponibles que minimice el costo total de la actividad, en donde cada trabajo y máquina cuentan con características particulares que afectan de una forma u otra la eficiencia del proceso (Sinha, 2006).

La dificultad del problema de asignación consiste en que se trata de un problema combinatorio, lo cual quiere decir que entre mayor sea el número de trabajos y máquinas, mayores serán las posibles soluciones convirtiéndose así en un problema NP-hard (Chu & Beasley, 1997).

Para generar un mejor entendimiento, se presenta un planteamiento general del modelo matemático para problemas de asignación tomado de (Sinha, 2006).

Generalmente, este tipo de problemas se componen de una variable de decisión binaria, la cual tiene como finalidad asignar o no un recurso para cada operación a realizar, la cual se define a continuación.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna el recurso } j \text{ para procesar el trabajo } i \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Si, además, se define C_{ij} como el costo asociado a asignar el recurso i para llevar a cabo el trabajo j , la función objetivo se compone de la siguiente ecuación.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

De esta forma, se garantiza que el resultado obtenido por el modelo matemático, sea la combinatoria que presente menor costo. Sin embargo, esta solución aún no presenta resultados factibles, puesto que no existen condiciones que garanticen el cumplimiento de todas las operaciones. Por lo tanto, se definen las siguientes restricciones:

En primera instancia, se define la restricción de satisfacción o cumplimiento de la totalidad de los trabajos, la cual garantiza que para cada trabajo se asigne mínimo una máquina para su procesamiento.

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \geq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Por otro lado, se define la restricción de utilización de recursos, la cual garantiza que para cada trabajo se asigne máximo 1 máquina, con el fin de optimizar la utilización de recursos.

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Finalmente, lo que se obtiene, es un modelo programación lineal entera, el cual como se mencionó anteriormente puede llegar a ser complejo de resolver cuando se somete a ciertas condiciones que amplían el conjunto de soluciones posibles,

por ejemplo, grandes cantidades de trabajos y/o máquinas, o también, cuando es combinado con la problemática de flexibilidad de los procesos productos, es decir, cuando se presentan escenarios con máquinas idénticas paralelas que permiten soluciones por múltiples rutas.

7.2 EL PROBLEMA DE MÚLTIPLES RUTAS

Los problemas de programación de operaciones consideran frecuentemente el uso de múltiples máquinas, estas pueden estar organizadas de forma secuencial o en paralelo. Cuando la disposición de las máquinas es en paralelo, se suele suponer que estas cuentan con las mismas características en términos de tiempos de alistamiento, procesamiento y eficiencia, por lo tanto, pueden considerarse máquinas idénticas, por ende, cualquier trabajo puede ser procesado por cualquier máquina (Sipper & Bulfin, 1998).

(Salazar & Medina, 2010) Explican el problema de múltiples rutas como “Resolver la programación de trabajos en un sistema de capacidad múltiple con m máquinas que realizan operaciones iguales, dispuestas en paralelo y n trabajos a procesar en una, y solo una, de las máquinas”. Partiendo de este planteamiento, se puede concluir que el problema de múltiples rutas busca encontrar la mejor forma de programar la secuenciación de trabajos en un entorno programación flexible caracterizado por la distribución de máquinas idénticas en paralelo.

7.3 PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES EN AMBIENTES JOB-SHOP

FLEXIBLES

La programación de operaciones en ambientes Job-Shop (JSP), consiste en realizar un conjunto de n trabajos en un conjunto de m máquinas, donde cada trabajo está compuesto por un subconjunto de operaciones a ser procesadas por estas máquinas. Este problema estudia la forma más apropiada de realizar la asignación de operaciones a cada máquina (Secuenciación de operaciones) con el fin de optimizar un indicador de desempeño en cuestión (Yazdani, Amiri, & Zandieh, 2010).

Para sobrevivir en el sistema productivo actual, las empresas deben adaptar sus sistemas de manufactura a un entorno más eficiente y flexible. Para lograr esto,

no solo basta con la automatización de los procesos, también es necesario contar con sistemas de programación de la producción flexibles.

Por lo tanto, se presenta una nueva problemática de programación de operaciones, "*El problema de programación de la producción en ambientes job-shop flexibles (FJSP)*". Este problema es una adaptación del problema "JSP" inicial, en el cual existe la posibilidad de que una o varias operaciones puedan ser procesadas por un conjunto de máquinas idénticas.

(Yazdani, Amiri, & Zandieh, 2010) Plantean dos principales dificultades para este tipo de problemas, la primera siendo la asignación de cada operación de cada trabajo a una sola máquina dentro de un conjunto de máquinas disponibles, y la segundo, corresponde a secuenciar las operaciones asignadas en cada máquina.

Por lo tanto, el FJSP es conocido por ser un problema NP-Hard Combinatorio (Garey, Johnson , & Sethi, 1976).

8. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Para el caso de estudio se tomó como referencia una empresa metalmecánica colombiana dedicada al diseño, producción y ensamble de productos de filtración, manejo de aguas, sistemas de dragado, y tratamiento térmico.

El proceso productivo de la empresa da inicio desde el departamento de ventas, es esta área quien toma el pedido con las especificaciones y necesidades del cliente, una vez se toma el pedido este pasa al área de diseño en donde se realizan los planos y determinan las necesidades de materiales, los planos son pasados al área de producción y los requerimientos de materiales al departamento de compras, una vez se tienen las materias primas necesarias para la realización del producto, el área de producción se encarga de su realización, y posteriormente, cuando ya se ha terminado de acuerdo a las especificaciones del cliente, el área de despacho se encarga de la logística de entrega en el lugar pactado con el cliente.

En la figura 1, se presenta en forma de diagrama de flujo el sistema productivo del caso de estudio.

Una explicación más detallada del sistema productivo de la empresa es expresada a continuación; La empresa opera bajo un sistema de producción “Make-to-order”, es decir, no maneja un stock de producto terminado, sino que la elaboración de un producto inicia cuando el cliente emite una orden. Esta orden es recibida por el departamento de ventas, el cual, luego de realizar un estudio de los históricos de tiempos de procesamiento del producto, y la disponibilidad del área de producción, acuerda con el cliente la fecha de entrega o terminación del producto factible para ambas partes. Cabe aclarar, que la empresa no puede plantear fechas de entregas muy lejanas puesto que existe el riesgo de perder la venta.

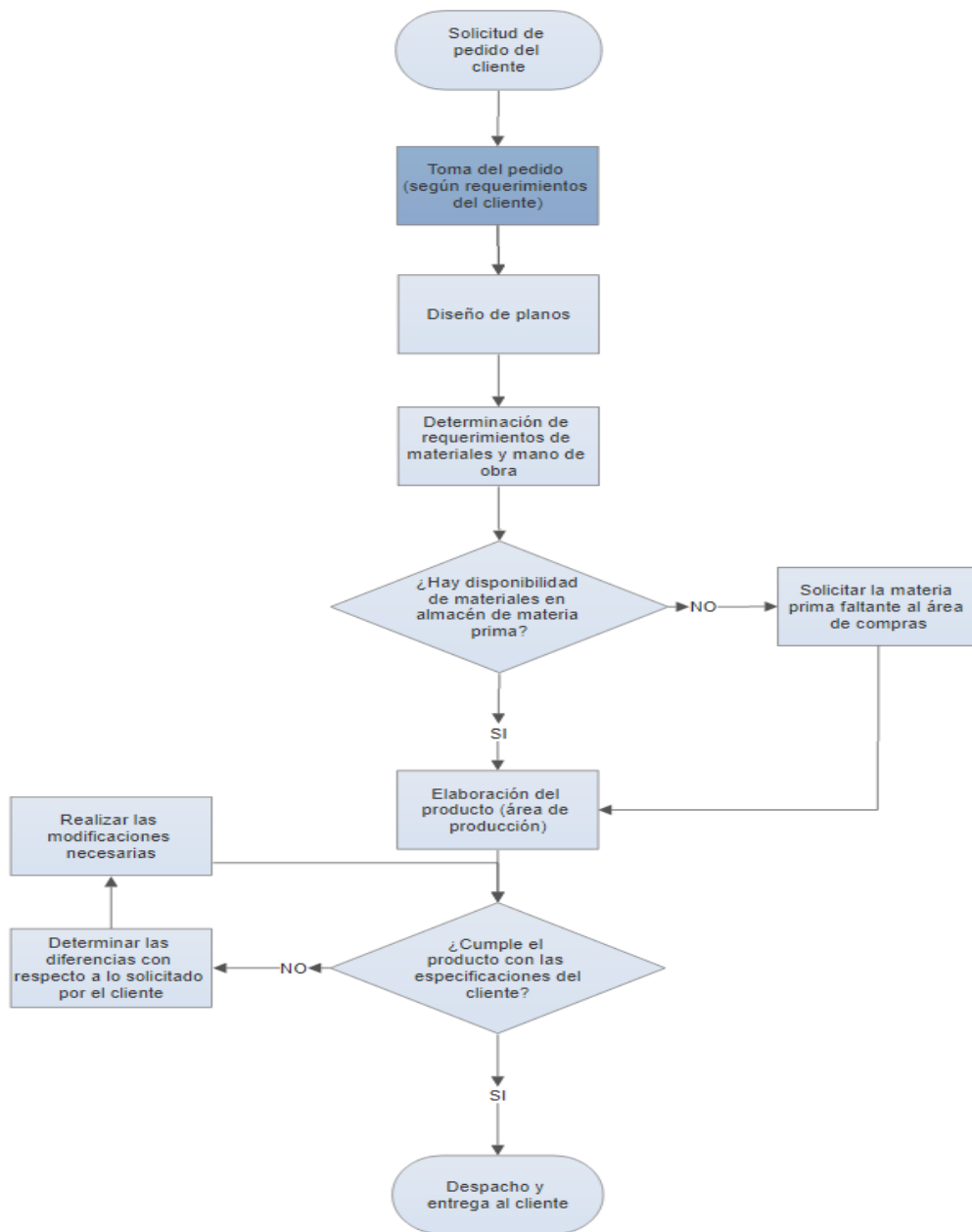


Figura 1 Diagrama de flujo del sistema productivo del caso de estudio

Fuente: Elaboración propia

Una vez se definen las características particulares del producto, la orden ingresa al área de diseño, donde se realizan los planos de producción y se definen los requerimientos del producto especificados por el cliente, una vez son obtenidos los planos del producto es esta área quien define la cantidad necesaria de materia prima para la producción, estas necesidades de materiales son pasadas al departamento de compras.

El área de producción se encarga de revisar el inventario de materias primas, partiendo del nivel de inventario que se tiene en el almacén y las necesidades de materiales para la realización del producto, es esta área quien emite una orden de requerimientos de materiales al departamento de compras. El departamento de compras partiendo de lo especificado por producción, adquiere los materiales necesarios para la producción del producto.

El área de producción se encuentra dividida en cinco (5) áreas principales: corte, armado, maquinado, soldadura, y pintura. Es en esta área en donde se toman decisiones de acuerdo con la secuenciación que tomarán cada uno de los trabajos por cada una de estas sub-áreas. Un reto adicional que se presenta para la secuenciación es la flexibilidad existente dentro de cada sub-área del área de producción, consecuencia de la presencia de máquinas paralelas, adicional a esto, existe la posibilidad de procesar varios productos en el mismo instante de tiempo, es decir, existen varios productos en proceso compitiendo por un número de recursos limitados, lo cual agrega complejidad a la programación de la producción al ser un ambiente job-shop flexible. Debido a esta misma complejidad, el presente estudio se enfoca en cómo abordar la toma de decisiones en cuanto a secuenciación de actividades en el área de producción.

Finalmente, el producto debidamente procesado pasa al área de distribución, y se dispone para ser entregado al cliente. De esta forma se da como finalizado el proceso productivo de la empresa.

8.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE PRODUCCIÓN

Como se mencionó anteriormente, el área de producción se encuentra dividida en cinco (5) subáreas, las cuales se encuentran diferenciadas de acuerdo al tipo de proceso que en esta se realiza. En la figura 2, se representa visualmente el área

de producción de la empresa caso de estudio, y a continuación, se define con más detalle cada uno de estos procesos.

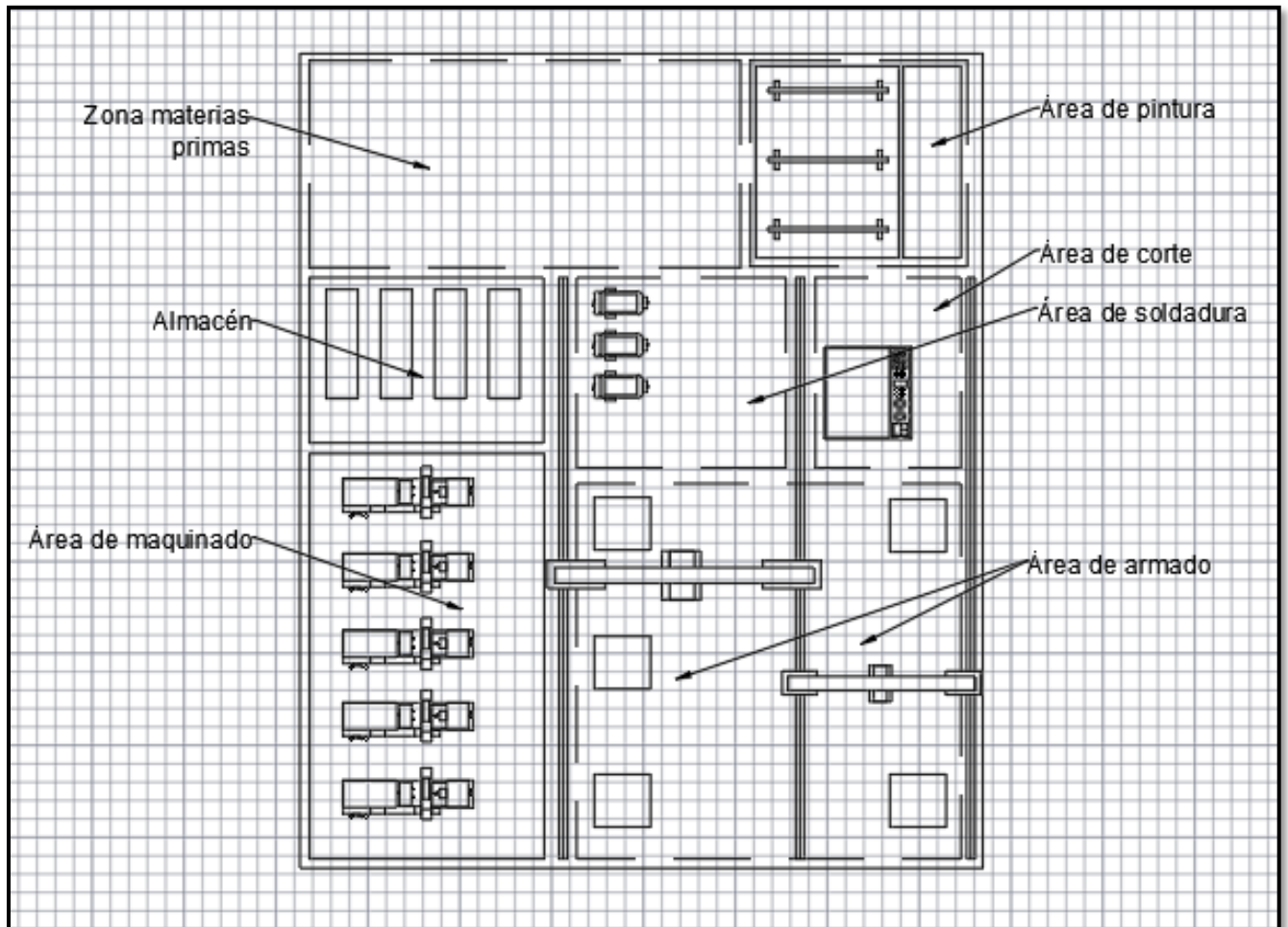


Figura 2 Distribución del área de producción.

Fuente: Elaboración propia

Proceso de armado. En el proceso de armado se llevan a cabo las actividades de formado y ensamble de piezas. Para dar cumplimiento a estas actividades se requieren los subprocesos de doblado, prensado y curvado, para los cuales se cuenta con cinco máquinas idénticas que se encargan de realizar estas actividades.

Proceso de soldadura. El proceso de soldadura consiste en la unión y refuerzo de piezas. Para llevar a cabo este proceso la empresa cuenta con dos operarios encargados del manejo de las máquinas de soldar, ambos operarios cuentan con las mismas características en términos de experiencia y capacidad de manejo de la maquinaria.

Proceso de pintura. El pintado del material se lleva a cabo por medio de un proceso conocido como Sand Blasting, el cual consiste en un chorro de arena abrasivo que se aplica a altas presiones y velocidades sobre una superficie. Se cuenta con tres pistolas y sus respectivos compresores para llevar a cabo la actividad, además de 3 operarios y los insumos de pintura necesarios.

Proceso de corte. El proceso de corte suele ser el primero para cada producto, puesto que es en este en el que se dividen las grandes láminas de acero de acuerdo con las dimensiones necesarias para ser procesadas por las otras estaciones del área. Para este proceso la empresa maneja una mesa de corte o pantógrafo, el cual es operado por un solo operario.

Proceso de maquinado. En esta área se realizan operaciones de conformación de componentes por la eliminación de exceso de material, se cuenta con cinco (5) máquinas para la realización de diferentes actividades como lo es la perforación, torneado y fresado.

8.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS

En las tablas 1 y 2, se complementa la información anteriormente mencionada realizando la caracterización de cada uno de los procesos del área de producción del caso de estudio.

Tabla 1 Caracterización de procesos

Proceso	Proveedor	Entradas	Actividades	Duración o momento de ejecución	No. Máquinas	Salidas	Cientes
Corte	Área de diseño Departamento en ventas	Planos de los componentes del producto Materia prima para el corte (laminas)	Se realiza el corte de las láminas de acuerdo con las especificaciones de los planos generados en el área de diseño.	Se ejecuta una vez se tienen los planos de las piezas y la materia prima.	1	Componentes particionados	Proceso de maquinado, pintura, armado, soldado.
Armado	Proceso de corte Área de diseño Proceso de maquinado Proceso de soldadura	Planos de los componentes del producto Partes ya procesadas en otros procesos de producción (Corte, maquinado, soldadura)	Se genera el ensamble de los componentes que ya han sido procesados por otras áreas de procesos, se tiene en cuenta como una de las etapas finales para la terminación del producto. Para dar cumplimiento a estas actividades se requieren los subprocesos de doblado, prensado y curvado.	Inicia una vez se tiene partes para ser ensambladas.	5	Conformado de piezas (piezas ensambladas)	Proceso de pintura, maquinado, soldadura, área de distribución.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2 Caracterización de procesos

Proceso	Proveedor	Entradas	Actividades	Duración o momento de ejecución	No. Máquinas	Salidas	Clientes
Soldadura	Proceso de corte	Partes ya procesadas en otros procesos de producción	Consiste en la unión y refuerzo de piezas.	Inicia una vez se tiene partes para ser unidas por soldadura.	2	Piezas Soldadas	Proceso de pintura, maquinado, ensamble.
	Proceso de maquinado	(Corte, maquinado, soldadura)					
	Área de diseño	Planos de los componentes del producto					
Pintura	Proceso de armado	Partes ya procesadas en otros procesos listas para ser pintadas	Se proporciona una capa de pintura a los componentes que lo requieren, y que ya han pasado por otros procesos.	Se inicia en el momento en el que ingresan partes al proceso	3	Componentes pintados	Proceso de ensamble.
	Proceso de maquinado						
	Proceso de corte						
	Proceso de soldadura						
Maquinado	Proceso de corte	Planos de los componentes	Se realiza remoción del exceso de material de la pieza, para formar el componente deseado. Dentro de este proceso se generan actividades para obtener la pieza deseada, como lo es el torneado, taladrado y fresado.	Inicia una vez entran piezas con necesidades de maquinado al área	5	Piezas maquinadas	Proceso de ensamble, pintura, corte, soldadura.
	Área de diseño	Materiales					
	Proceso de soldadura	Componentes ya procesados en otras áreas de producción					

Fuente: Elaboración propia

8.3 DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la empresa funciona bajo un sistema de producción por orden o por pedido, por lo tanto, es importante estudiar los productos y su relación que estos tienen con los procesos, puesto que, dado la individualidad de cada producto, su secuencia de actividades será diferente respecto a los demás, sin dejar de mencionar que los tiempos de procesamiento de cada producto en relación con cada máquina o estación varían de acuerdo con el pedido del cliente.

La empresa fabrica productos relacionados con el manejo y tratamientos de agua, los cuales se dividen en diferentes categorías de acuerdo con las necesidades que estas satisfacen. Estas categorías son: Equipos de bombeo, filtración, dragado, tratamiento térmico y lavadoras de pulpas. A continuación, se realizará una descripción más detallada de cada una de estas categorías de productos.

8.3.1 EQUIPOS DE BOMBEO

Los equipos de bombeo son máquinas generadoras que absorben la energía mecánica y la transforma en energía hidráulica, la cual es transferida al fluido que por estas transita, desplazando este de un punto a otro (Salazar F. C., 2013). Los equipos de bombeo fabricados por la empresa en estudio son:

Equipos de bombeo estacionarios: Como lo dice su nombre, Son bombas caracterizadas por ser construidas para una instalación fija de bombeo permanente. Su aplicación suele ser para el riego de cultivos o para drenajes en áreas de inundación. Estas bombas se clasifican a su vez en tres diferentes tipos: Axiales, Mixtas e Hidráulicas.



Figura 3 Equipo de Bombeo estacionario

Fuente: Empresa caso de estudio

Equipos de bombeo móviles: Son bombas utilizadas para actividades que no requieren un bombeo permanente, y dada su versatilidad no necesitan de gran esfuerzo para su instalación y desplazamiento. Se manejan dos tipos de bombas móviles, el primero consiste en una bomba y unidad de potencia construida sobre el remolque con el fin de facilitar el transporte de la bomba; la segunda está compuesta por una bomba fija y un sistema de unidad de potencia el cual se encuentra ensamblado al remolque, lo cual permite realizar mantenimientos en los sitios de operación.



Figura 4 Equipo de bombeo móvil

Fuente: Empresa caso de estudio

Equipos de bombeo flotantes: Son bombas compuestas por pontones, los cuales son embarcaciones que permiten la flotación del sistema sobre el agua. Son ideales para granjas acuícolas, control de inundaciones y acueductos.



Figura 5 Equipo de bombeo flotante

Fuente: Empresa caso de estudio

8.3.2 EQUIPOS DE FILTRACION

El proceso de filtración consiste en la separación de sólidos en una suspensión a través de un medio mecánico poroso, estos procesos también suelen ser llamados tamiz, criba, cedazo o filtro (Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker, 2003).

Filtro precapa: Son filtros al vacío de alta eficiencia para la remoción de sólidos en suspensión, especialmente efectivo en soluciones que requieren un alto grado de pureza.



Figura 6 Filtro precapa

Fuente: Empresa caso de estudio

Filtro trómel: Se caracterizan por tener una tela cilíndrica rotatoria, la cual se encarga de filtrar el flujo que pasa a través de esta. Estos filtros son comúnmente utilizados para remover solidos grandes o gruesos, de manera rápida y a un bajo costo de operación.



Figura 7 Filtro trómel

Fuente: Empresa caso de estudio

Filtro rotatorio de vacío: Son filtros continuos en donde los componentes solidos entran en forma de mezcla y son separados por una tela filtrante porosa; el vacío aplicado a la superficie interna obliga a los sólidos a acumularse en la superficie como una capa sobre la cual se diluye el líquido.



Figura 8 Filtro rotatorio de vacío

Fuente: Empresa caso de estudio

Filtro de banda de presión: Son filtros en los cuales su funcionamiento consiste en conseguir la separación del solido-liquido de los lodos mediante un proceso de escurrido entre dos bandas bajo tensión.



Figura 9 Filtro de banda de presión

Fuente: Empresa caso de estudio

8.3.3 EQUIPOS DE DRAGADO

Las dragas son embarcaciones móviles, compuestas por un sistema de propulsión, sistema de flotación, unidad de potencia, cabezal de corte y bomba de lodos, especialmente diseñadas para extraer o excavar material de fondos marinos, lacustres, ríos o canales.

En la empresa en estudio se fabrican tres tipos de dragas: Diesel accionada por cable, eléctrica accionada por cable y diésel autopropulsada. Estas tres son a grandes rasgos idénticas, la única diferencia que entre ellas existe es el tipo de motor que llevan.



Figura 10 Equipo de dragado

Fuente: Empresa caso de estudio

8.3.4 EQUIPOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Como su nombre lo indica, son máquinas que permiten someter partículas o sólidos a diferentes tipos de temperatura en un ambiente controlado. El equipo de tratamiento térmico fabricado en la empresa estudio son las cámaras de agua caliente, las cuales se utilizan principalmente para el tratamiento de semillas contra enfermedades que disminuyen los rendimientos de los cultivos.



Figura 11 Equipo de tratamiento térmico

Fuente: Empresa caso de estudio

8.4 INDICADORES

Un indicador es una herramienta que permite determinar el estado actual o estado meta con respecto a un objetivo planteado, el cual relaciona dos o más variables y parámetros para su determinación, este presenta información de importancia con el fin de medir el avance o retroceso para el alcance de algún objetivo planteado (DAFP, 2015).

Con el objetivo de evaluar el rendimiento del modelo se plantean indicadores que relacionan la eficiencia y la productividad, los cuales serán tratados a continuación, los indicadores mostrados a continuación son para el Equipo de bombeo estacionario.

8.4.1 INDICADORES DE EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD

La utilización de herramientas y elementos planificadores es un método que permite poder ordenar, sistematizar, estructurar la realización y ejecución de un programa o proyecto, las cuales permitan determinar supuestos base para disminuir el riesgo al fracaso (Pastor, 2011). El enfoque para los indicadores de eficiencia y productividad mencionados a continuación, es de acuerdo a la programación de operaciones, en donde se tiene en cuenta el nivel de producción y tiempos propios de la realización de un equipo de bombeo estacionario.

La eficiencia es la medida en la que se alcanzan los objetivo teniendo en cuenta los recursos utilizados, por lo tanto, puede interpretarse como la relación entre lo que se ha invertido y lo obtenido (Mokate, 1999). La productividad puede ser considerada como una proporción que se relaciona con los resultados obtenidos y los recursos utilizados (Toro Alvarez, 1990), en este documento, se presenta un enfoque de productividad

parcial, puesto que se tiene en cuenta solo los productos tipo A y el recurso “tiempo” para el cálculo de este indicador. Es un error común considerar que estos dos conceptos son iguales, sin embargo, su diferencia radica en que la eficiencia consiste en el alcance de los objetivos con una la cantidad de recursos mínima, y la productividad muestra la capacidad se tiene para producir un bien o servicio con relación al tiempo.

A continuación, se presentan los indicadores de productividad y eficiencia que se tuvieron en cuenta, para un equipo de bombeo estacionario.

Indicador de productividad parcial (IP): Relación entre el la cantidad de productos terminados y el tiempo necesario para la producción de estos. El IP que tiene el equipo de bombeo estacionario actualmente es de 0.00769 U/hora.

$$IP = \frac{\# \text{ productos producidos}}{\text{Tiempo total}} = \frac{1 \text{ Unidad}}{130 \text{ horas}} = 0.0077 \text{ U/hora}$$

Indicador de eficiencia (IE): Este indicador es enfocado a la utilización de las máquinas y tiempo ocioso generado en el proceso de producción de un equipo de bombeo, es expresado como la relación entre el tiempo en el que la maquinaria está en uso y el tiempo total disponible. Para una mejor visualización del indicador se realiza el levantamiento del indicador para cada operación. Los valores fueron extraídos del diagrama de Gantt para el equipo de bombeo estacionario antes mencionado. En la tabla 3 se observan los datos necesarios para la obtención de los indicadores, los datos se encuentran expresados en horas, en las columnas encontramos, tiempo de inicio de operación el cual hace referencia al momento en el que la operación es iniciada. Momento fin de operaciones, tiempo en el que se terminan todas las operaciones para todos los subproductos, es decir, tomando como ejemplo la operación de corte, para la hora numero 38 todas las operaciones de corte han sido realizadas.

$$\text{Tiempo disponible} = T.\text{inicio operaciones} - T.\text{fin operaciones}$$

$$\%TU = \frac{\text{Tiempo en uso}}{\text{Tiempo total disponible}} * 100\%$$

$$\%TO = 1 - \%TU$$

% TU: Tiempo utilización.

% TO: Tiempo ocioso.

Tabla 3 Indicadores de eficiencia situación actual.

INDICADORES DE EFICIENCIA						
Operaciones	Tiempo Inicio operaciones	Tiempo Fin operaciones	Tiempo disponible	Tiempo utilizado	%TU	% TO
Corte	1	38	37	37	100,00%	0,00%
Armado	1	90	89	78	87,64%	12,36%
Soldadura	7	100	93	26	27,96%	72,04%
Maquinado	6	78	73	64	87,67%	12,33%
Pintura	44	130	86	28	32,56%	67,44%
Ensamble	11	125	114	91	79,82%	20,18%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3, se puede evidenciar como actualmente la empresa presenta serios problemas en la programación de sus operaciones, reflejándose en altos tiempos ociosos y baja utilización de sus recursos, los casos de mayor interés son los de soldadura y pintura, ya que cuentan con un porcentaje de tiempo ocioso del 72% y 67% respectivamente, lo cual quiere decir que más de la mitad del tiempo que tienen disponible para producir está siendo desaprovechado. De igual forma, se puede identificar que la operación cuello de botella es el corte, puesto que cuenta con una utilización del 100%, esto se debe a que se cuenta con una sola máquina de corte para llevar a cabo la elaboración de todos los proyectos.

En términos generales, la empresa caso de estudio presenta un porcentaje de tiempos ociosos promedio del 30,73% y promedio de utilización de recursos del 60,28% para la elaboración de un equipo de bombeo estacionario.

9. DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Partiendo del análisis de la información del capítulo anterior se permite identificar y definir las variables y parámetros que afectan el área de producción de la empresa caso de estudio, los cuales son necesarios para la formulación del modelo matemático de optimización. En este capítulo se realiza la determinación y explicación de los parámetros de entrada al modelo matemático.

Con el fin de depurar la información necesaria para la entrada de datos al modelo posteriormente planteado, se realiza en este capítulo una clasificación ABC de los productos que maneja la empresa, esto nos permite enfocar los estudios en el producto que tiene mayor incidencia en ventas para la empresa, y de esta forma tener mayor facilidad en la obtención de parámetros y variables necesarias para la modelación, los cuales también son determinados en este capítulo. Se aclara que el modelo será corrido con un solo producto, esto con el objetivo de determinar cuál es la secuencia óptima y las máquinas que debe utilizar por unidad de tiempo, además disminuye el tiempo computacional para la obtención del resultado, sin embargo, con la recolección de datos de los demás productos es posible determinar para cada uno la secuencia que estos deben seguir en el área de producción y obtener un mínimo tiempo de elaboración.

Cabe aclarar que el modelo es totalmente adaptable para todos los productos que elabora la empresa caso de estudio, esté permite determinar para cada uno de los productos la forma es como debe ser secuenciadas las operaciones dentro del área de producción y los recursos que deben ser asignados para cada uno, de esta forma realizar los productos con el mínimo tiempo de elaboración posible.

9.1 CLASIFICACIÓN ABC DE LOS PRODUCTOS

La clasificación ABC de productos se realiza por categorías de acuerdo con su importancia o relevancia por algún tipo de criterio (Castro, Velez, & Castro, 2011), en este estudio se realiza teniendo en cuenta el nivel de ventas realizadas por producto para el año 2017. La metodología implementada sugiere una clasificación de 2 niveles, la primera por familia de productos, generando una vista macro de la familia de productos que tiene mayor incidencia en ventas para la empresa. Una vez determinada la familia de productos con mayores ventas se realiza una segunda clasificación teniendo en cuenta el mismo criterio (número de ventas para el 2017), la cual pretende la determinación final de los productos tipo A.

El desglose planteado para clasificación ABC genera una vista clara de los productos que tienen mayor incidencia en el área de producción en dos niveles, el primero determinado por la familia el cual es de gran importancia, dado que este es el punto en el que se diferencia en gran tamaño un producto de otro por el mecanismo o funcionabilidad. El segundo nivel permite una vista detallada de qué tipo de producto es el que los clientes demandan con mayor influencia con respecto a los otros productos de la familia tipo A y de esta forma concentrar los estudios realizados.

Tabla 4 Clasificación ABC Primer nivel (familia de productos)

CLASIFICACIÓN ABC POR FAMILIA DE PRODUCTOS		
FAMILIAS DE PRODUCTOS	UNIDADES VENDIDAS (2017)	PARTICIPACIÓN (%)
EQUIPO DE BOMBEO	29	76%
EQUIPO DE FILTRACIÓN	6	16%
EQUIPO DE DRAGADO	2	5%
EQUIPOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO	1	3%
TOTAL	38	100%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4, se muestra la clasificación ABC realizada para las familias de productos, y en esta se evidencia que la familia de productos con mayores ventas es el Equipo de Bombeo con 29 ventas para el año 2017 y un porcentaje de participación del 76% sobre las otras familias de productos. En la tabla 5 se muestra la clasificación ABC realizada para los productos de la familia tipo A (Equipos de bombeo), se observa que el producto con mayor incidencia en ventas es el Bombeo Estacionario con 20 ventas para el año 2017 y un porcentaje de participación del 69%.

Tabla 5 Clasificación ABC Segundo nivel (productos de familia tipo A)

CLASIFICACIÓN ABC POR PRODUCTO (FAMILIA EQUIPOS DE BOMBEO)		
EQUIPOS DE BOMBEO	UNIDADES VENDIDAS (2017)	PARTICIPACIÓN (%)
BOMBEO ESTACIONARIO	20	69%
BOMBEO MOVIL	5	17%
BOMBEO FLOTANTE	4	14%
TOTAL	29	100%

Fuente: Elaboración propia.

En los posteriores apartados se dará enfoque al producto tipo A, se realiza un estudio detallado, con el objetivo de determinar los parámetros necesarios para la introducción en el modelo matemático de optimización.

9.2 PARÁMETROS DE PRODUCTO TIPO A

En este apartado se definen y determinan los parámetros que afectan la producción de un equipo de bombeo estacionario, para ser introducidos en el modelo matemático de optimización. Como se especificó con anterioridad para la determinación de los parámetros se tiene en cuenta un producto tipo A (Equipo de Bombeo Estacionario).

9.2.1 PARÁMETROS

Subproductos: Son los elementos necesarios para la elaboración del producto principal, para mejor detalle se usa un diagrama de estructura del producto, el cual permite detallar a nivel jerárquico como se compone el producto principal. En la figura 12 se muestran los componentes necesarios para la construcción de un equipo de bombeo, en este se observa que el producto principal cuenta con siete (7) subproductos los cuales son; Canastilla, impulsor, caja de rodamiento, columna de descarga, columna principal, conjunto camisas y ejes, y transmisión reductor. También muestran las cantidades necesarias de cada subproducto para la construcción de un equipo de bombeo estacionario.

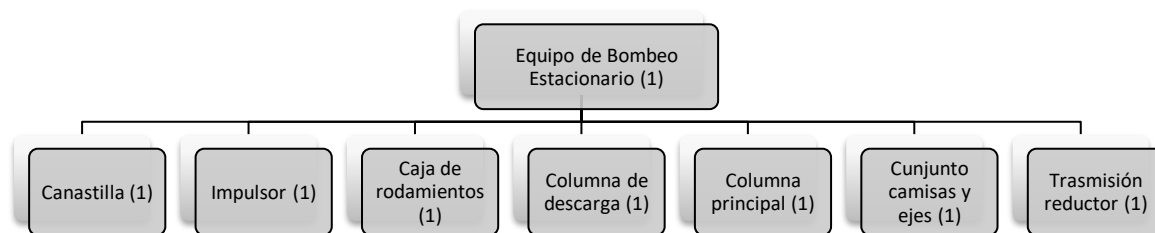


Figura 12 Estructura del equipo de bombeo estacionario

Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de operaciones: Consiste en determinar las precedencias operacionales de cada subproducto dentro del área de producción, es decir, en que orden de operaciones debe ser procesado cada uno de los componentes del Equipo de Bombeo Estacionario. En la tabla 6 se muestra la secuencia de actividades para cada subproducto. Las operaciones van de izquierda a derecha para cada uno, por ejemplo, el subproducto Canastilla empieza con la operación de corte, continúa con armado, soldadura, maquinado y por último ensamble.

Tabla 6 Secuencia de operaciones por subproducto

SECUENCIA DE ACTIVIDADES						
Subproducto	Operaciones					
Canastilla	Corte	Armado	Soldadura	Maquinado	Ensamble	
Impulsor	Corte	Armado	Maquinado	Soldadura	Ensamble	
Caja de rodamiento	Corte	Armado	Soldadura	Maquinado	Ensamble	Pintura
Columna de descarga	Corte	Maquinado	Armado	Soldadura	Ensamble	Pintura
Columna	Corte	Maquinado	Armado	Soldadura	Pintura	Ensamble
Conjunto de camisas y ejes	Corte	Maquinado	Armado	Pintura	Ensamble	
Transmisión reductor	Armado	Corte	Maquinado	Soldadura	Pintura	Ensamble

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de procesamiento: Es la duración que tiene el subproducto en cada una de las operaciones, las unidades utilizadas son en horas, en la tabla 7 se muestran las unidades de tiempo que requiere cada subproducto en las operaciones. Los subproductos están ordenados por columnas y las operaciones por filas. Cabe aclarar, que, con el fin de disminuir la carga computacional, se dividen los tiempos de procesamiento en un factor común igual a 3 unidades.

Tabla 7 Tiempo de procesamiento para cada subproducto por operación.

TIEMPO DE PROCESAMIENTO (HORAS)							
Operación	Subproductos						
	Canastilla	Impulsor	Caja de rodamiento	Columna de descarga	Columna	Conjunto de camisas y ejes	Transmisión reductor
Corte	1	2	6	12	4	2	6
Armado	5	58	23	18	15	5	4
Soldadura	3	2	6	10	2	0	5
Maquinado	1	17	27	34	16	33	21
Pintura	0	0	8	5	5	9	6
Ensamble	15	20	13	25	18	12	15

Fuente: Elaboración propia

Diagrama de Gantt: Se utiliza esta herramienta para representar la forma actual en que el área de producción realiza la secuenciación de operaciones para el equipo de bombeo estacionario. En la figura 13 se observa cómo están organizadas las operaciones para cada uno de los subproductos.

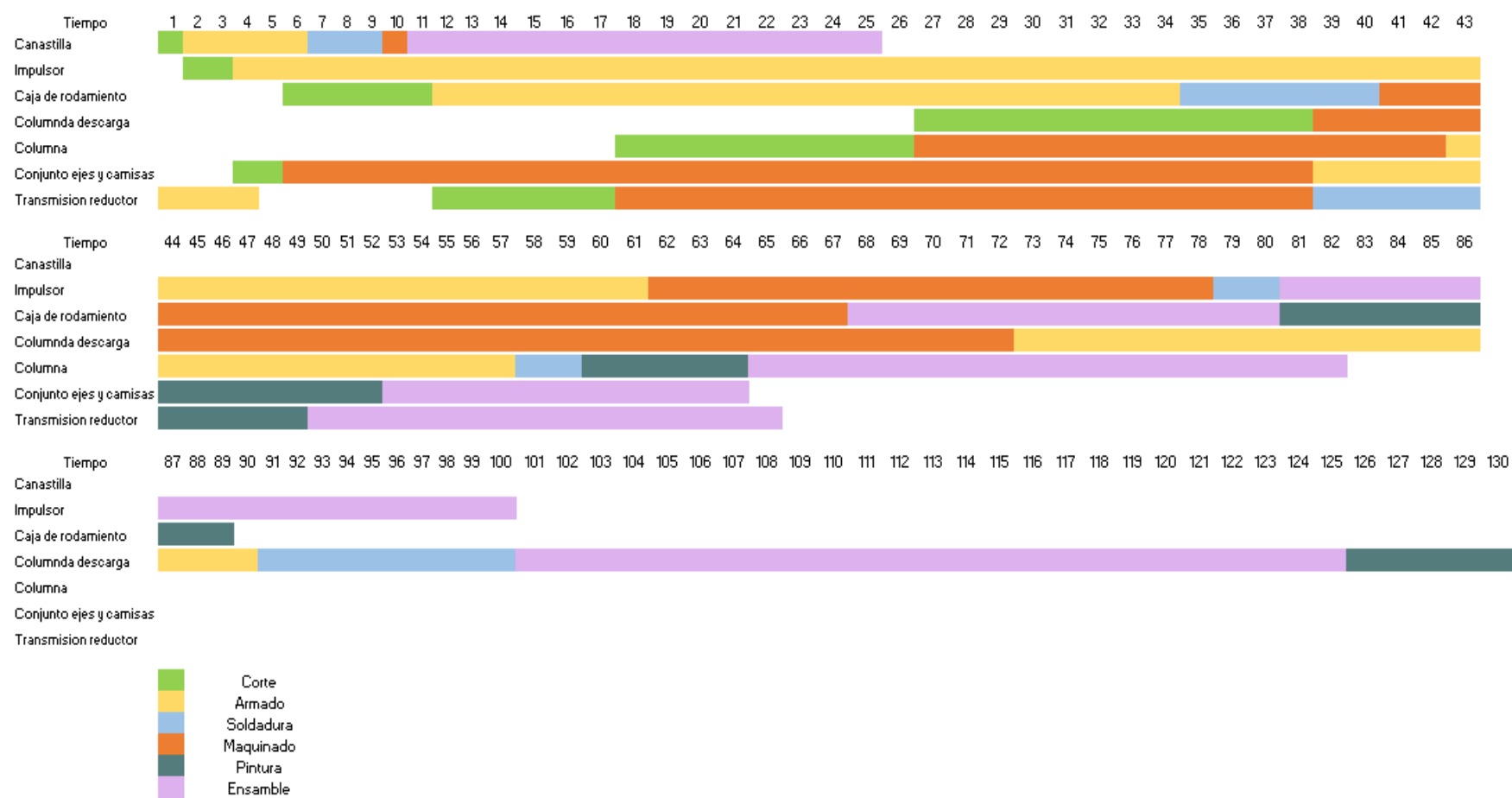


Figura 13 Diagrama de Gantt del proceso de fabricación de un equipo de bombeo

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13, se presenta un diagrama de Gantt de la situación actual del proceso de fabricación de un equipo de bombeo estacionario, cada operación se encuentra identificada por un color para facilitar su entendimiento, y debido a su gran tamaño, fue dividido en tres secciones, sin embargo, las unidades de tiempo mantienen la secuencia del proceso.

Por ejemplo, para el caso del impulsor, se inicia el proceso de corte en la unidad de tiempo 2 y termina en la unidad de tiempo 4, es decir, tiene un tiempo de procesamiento de 2 horas. A partir de la unidad de tiempo 4, y hasta la unidad de tiempo 62, se realiza el proceso de armado, el cual tiene una duración de 58 horas, desde la unidad de tiempo 62 hasta la 78, se realiza el maquinado del producto con una duración de 16 horas, de la 79 a la 81, se realiza el soldado del producto, y finalmente desde la unidad de tiempo 81 hasta la 101, se realiza el ensamble del producto y de esta forma termina su proceso de fabricación. De esta forma, el tiempo de procesamiento de este producto fue de 100 horas, y de la misma manera se pueden interpretar los productos restantes.

Tiempo de producción (TP): Especifica el tiempo necesario para la elaboración de un equipo de bombeo estacionario desde que se inicia el procesamiento del primer producto hasta que se elabora el ultimo (Salazar Horning & Sanchez Pinto, 2013). Este indicador también se conoce como “Makespan”.

$$TP = 130 \text{ horas}$$

Teniendo en cuenta que los tiempos de procesamiento fueron divididos por un factor común de 3 unidades, el tiempo real de procesamiento o makespan es de 390 horas.

9.3 SUPUESTOS

A continuación, se presentan los supuestos que se tuvieron en cuenta en la formulación del modelo matemático:

- No es posible interrumpir una operación en proceso.
- No se considera la entrada de nuevos proyectos durante el proceso de fabricación.
- Se desprecian tiempos de alistamiento y desplazamientos entre áreas y máquinas. Excepto, para el caso de las máquinas de pintura, en las cuales el tiempo de

alistamiento para cambio de pinturas fue considerado dentro del tiempo de procesamiento.

- Se ignoran restricciones de materias primas.
- Todas las máquinas se encuentran disponibles en $t = 0$, lo cual implica que no se cuenta con inventario de producto en proceso.
- Todos los proyectos a procesar se conocen en $t = 0$.

10. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

A partir de la información recolectada mediante la revisión de la literatura, visitas a la empresa caso de estudio y al análisis previo a este capítulo, se presenta a continuación un modelo matemático que aborda el problema de programación de la producción en ambientes Jobshop flexibles.

Se define como método de solución la programación lineal, puesto que esta presenta mejores resultados para el problema del jobshop flexible en comparación a métodos heurísticos y metaheurísticos, siendo su principal desventaja el requerimiento computacional (Himmiche, Aubry, Marangé, & Péltin, 2017), sin embargo, al hacer uso de servidores en la nube, este problema de capacidad computacional se reduce de tal forma que deja de ser un problema significativo.

10.1 CONJUNTOS

Como su definición lo dice, un conjunto es una colección de elementos con características similares entre sí. A continuación, se plantean los conjuntos que se encuentran adaptados a las necesidades del caso de estudio y rigen el comportamiento del modelo matemático.

Productos: Conjunto de productos $\{1 \dots i\}$, contiene el subíndice i .

Operaciones: Conjunto de operaciones $\{1 \dots j\}$, contiene el subíndice j .

Máquinas: Conjunto de máquinas $\{1 \dots m\}$, contiene el subíndice m .

Precedencia: Conjunto ordenado de operaciones j para cada producto i , contiene el subíndice i .

Tiempo: Conjunto ordenado de instantes de tiempo $\{1 \dots t\}$, contiene el subíndice t , en otras palabras, hace referencia al horizonte de tiempo sobre el cual se programarán las operaciones.

10.2 PÁRAMETROS

A continuación, se presentan los parámetros previamente definidos en el capítulo 9, que caracterizan el caso de estudio.

Tiempo de procesamiento ($TP_{i,j}$): Hace referencia al tiempo de procesamiento de la operación j del producto i .

Capacidad de operaciones simultaneas (CAP_j): Es la cantidad de operaciones simultaneas que se pueden realizar para cada operación j , se podrán ejecutar tantas operaciones, como máquinas estén disponibles.

10.3 VARIABLES DE DECISIÓN

Para la definición de las variables de decisión es necesario retomar los dos problemas principales que afronta la programación de la producción en ambientes Jobshop flexibles, la asignación de recursos y la secuenciación de actividades (Osorio, Castrillon, Toro, & Orejuela, 2008).

Para enfrentar el problema de asignación de recursos se plantea la siguiente variable de decisión.

$$W_{j,m,i} = \begin{cases} 1, & \text{Si se asigna la máquina } m \text{ para realizar la operación } j \text{ del producto } i \\ 0, & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

Mientras que, para abordar el problema de la secuenciación de operaciones por cada una de las máquinas asignadas, se propone la siguiente variable binaria de decisión.

$$Z_{j,i,t} = \begin{cases} 1, & \text{Si se realiza la operación } j \text{ del producto } i \text{ en el instante de tiempo } t \\ 0, & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

Finalmente, se plantean las variables de decisión que se encargan de definir en qué momento iniciar y finalizar cada una de las operaciones j para cada producto i .

$X_{j,i}$: Decide en qué momento inicia el procesamiento de la operación j para el producto i

$Y_{j,i}$: Decide en qué momento finaliza el procesamiento de la operación j para el producto i

10.4 FUNCIÓN OBJETIVO

El principal objetivo del modelo matemático propuesto es minimizar el tiempo total de procesamiento de cada una de las operaciones a procesar, lo cual, garantiza la minimización del tiempo de procesamiento del producto o “Makespan”. (Alomia &

Lozano, 2013) propone la siguiente función objetivo para dar cumplimiento a lo anterior planteado.

$$\text{Min } Z: \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J E_{i,j}$$

Lo cual es igual a:

$$\text{Min } Z: E[1,1] + [1,2] + \dots + E[n,n]$$

Donde $E_{i,j}$ hace referencia al tiempo de finalización de la operación j para el producto i , por lo tanto, lo que está realizando la función objetivo es minimizar la sumatoria de los tiempos de terminación para cada operación y producto, lo que la hace una función objetivo lineal.

Sin embargo, esta función objetivo no presenta resultados óptimos en cuanto a minimización del tiempo total de procesamiento, puesto que, el hecho de que una programación ofrezca menor valor para la sumatoria de los tiempos de terminación, no garantiza que sea la programación que termine más pronto, por ejemplo, si suponemos las actividades A y B, como actividades cuyas operaciones pueden ser elaboradas simultáneamente, y sus tiempos de finalización son de 5 y 10 horas respectivamente, la sumatoria de sus tiempos de procesamiento sería igual a 15 horas, y el tiempo total de procesamiento serían 10 horas, si por otra parte, estas mismas actividades contaran con un tiempo de finalización de 8 horas cada una, la sumatoria de estos tiempos tendría un valor de 16 horas, y el tiempo total de procesamiento serían 8 horas.

De acuerdo con la función objetivo planteada por (Alomia & Lozano, 2013), la primera programación sería mejor que la segunda puesto que la sumatoria de cada uno de los tiempos de minimización es menor que en el segundo caso, a pesar de que en este el tiempo total de procesamiento sea menor.

Partiendo de esta conclusión, se plantea entonces una función objetivo cuya finalidad sea encontrar la programación de operaciones que minimice el tiempo total de procesamiento.

$$\text{Min } Z = \text{Max } Y_{i,j}$$

Donde $Y_{i,j}$ se refiere al momento de terminación de la operación j de cada producto i . Al minimizar el máximo tiempo de terminación para cada producto y operación, se garantiza

que la solución brindada por el modelo matemático, sea igual a la programación que termine más pronto el procesamiento de cada uno de los productos.

10.5 RESTRICCIONES

Para el planteamiento de las restricciones del modelo, se parte del proceso de revisión bibliográfica y análisis de las restricciones propias de la empresa caso de estudio, algunos de los referentes para este proceso fueron (Osorio, Castrillon, Toro, & Orejuela, 2008), (Cortes, Garcia, Pastor, & Andrés, 2005), (Fattahi, Mehrabad, & Jolai, 2007), entre otros.

Restricción de inicio: Se encarga de que la primera operación j de cada producto i , inicie en instantes de tiempo superiores o iguales al primer instante de tiempo, esta restricción se puede entender de forma similar a las restricciones de no negatividad.

$$X_{i,j} \geq 1, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Precedencia } I[1]$$

Restricción de tiempo de procesamiento: Garantiza que la diferencia entre el tiempo de finalización y de inicio de la operación j del producto i , sea exactamente igual al tiempo de procesamiento de esta.

$$Y_{i,j} + TP_{i,j} = Y_{i,j}, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Operaciones}$$

Restricción de precedencia: Se encarga de garantizar que la operación actual solo pueda iniciar una vez haya terminado la operación anterior. Esta restricción también garantiza que se respete el debido orden de procesamiento de las operaciones para cada producto.

$$Y_{i,j-1} \leq X_{i,j}, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Operaciones}$$

Restricción de secuenciación de operaciones: Su propósito es garantizar que para cada instante de tiempo t se esté procesando máximo una operación por cada producto.

$$\sum_{j \in \text{Operaciones}}^J Z_{i,j,t} \leq 1, \quad i \in \text{Productos}; t \in \text{Tiempo}$$

Restricción de asignación de máquinas a operaciones: Se encarga de que para cada instante de tiempo t se estén procesando tantas operaciones como máquinas disponibles para procesarlas.

$$\sum_{i \in \text{Productos}}^I Z_{i,j,t} \leq CAP_j, \quad j \in \text{Operaciones}; t \in \text{Tiempos}$$

Cabe aclarar que el parámetro CAP_j tiene en cuenta las maquinas disponibles para cada operación, es decir, para cada operación j , el parámetro toma un valor igual al numero de operaciones que se pueden realizar al tiempo, este numero es igual al numero de maquinas disponibles para realizar esta operación.

Restricción de asignación de máquinas a operaciones: Tiene como objetivo garantizar que se asigne como mínimo una máquina para cada operación.

$$\sum_{m \in \text{Máquinas}}^M W_{i,j,m} \geq 1, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Operaciones}$$

Restricción de asignación de máquinas a productos: Garantiza que para cada producto se asigne máximo una máquina por operación, esto se debe a que cada operación solo debe ser procesada por una máquina.

Con estas últimas dos restricciones se aborda el problema de asignación de máquinas, garantizando que cada operación cuente con solo una máquina asignada para su procesamiento.

Restricción de ejecución de operaciones: Tiene como propósito garantizar que el número total de instantes de tiempo que se asignan para realizar una operación sea igual al tiempo de procesamiento que esta operación requiere.

$$\sum_{t \in \text{Tiempos}}^T Z_{i,j,t} = TP_{i,j}, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Operaciones}$$

Restricción de ejecución consecutiva de operaciones: Esta es una restricción que se divide en dos partes. La primera se encarga de garantizar que la asignación de instantes de tiempo t no sea superior al momento de finalización de la operación j del producto i .

$$t * Z_{i,j,t} \leq Y_{i,j} - 1, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Operaciones}; t \in \text{Tiempos}$$

Mientras que la segunda, se encarga de limitar la asignación de instantes de tiempo t inferiores al momento de inicio de procesamiento de la operación j del producto i .

$$(-P) * (1 - Z_{i,j,t}) + X_{i,j} \leq t * Z_{i,j,t}, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Operaciones}; t \in \text{Tiempos}$$

Donde P es un numero muy grande (Ej. 5000, 10000)

Estas últimas dos restricciones, en conjunto con la restricción de ejecución de operaciones se encargan de garantizar que el procesamiento de la operación no pueda ser interrumpido, es decir, una vez sea iniciada la operación j del producto i , esta no podrá ser interrumpida hasta t instantes de tiempo iguales al tiempo de procesamiento requerido por la operación.

Restricción de ruta crítica: Con el fin de garantizar que el modelo de prioridad al producto que presenta mayor tiempo de procesamiento, se plantea la siguiente restricción.

$$Y_{i,j} \leq RC, \quad i \in \text{Productos}; j \in \text{Operaciones}$$

Donde se busca que el tiempo de terminación de cada operación j para cada producto i , sea menor o igual al tiempo de procesamiento de la ruta crítica mas una holgura prudente (RC).

Restricción de utilización de recursos: Esta restricción tiene como objetivo garantizar que la secuenciación de las operaciones de un mismo proceso se encuentra distribuidas de tal forma que se disminuyan los tiempos ociosos de este.

$$Max Y_{i,j} - Min X_{i,j} \leq \sum_{i \in \text{Productos}}^I TP_{i,j} + 10, \quad j \in \text{Operaciones}$$

Al restar el tiempo de finalización del procesamiento de la operación j para el producto que presenta el tiempo de terminación mas alto, con el tiempo de inicio de la misma operación del producto que presenta el tiempo de inicio mas pronto, se esta calculando el tiempo de procesamiento total para dicha operación j .

Por otra parte, en el lado derecho de la ecuación, se están los tiempos de procesamiento de la operación j para cada producto, de esta forma se esta calculando el tiempo mínimo que puede tomar realizar dicha operación para la totalidad de los productos.

Entonces, la inecuación busca que el tiempo de procesamiento total para cada operación j sea menor o igual, al tiempo de procesamiento mínimo necesario para realizar dicha operación en cada producto i , además se le suma un valor de 10, el cual es un tiempo de holgura decidido por los autores luego de analizar los tiempos de procesamiento del caso de estudio.

11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez planteado el modelo matemático y definidos los parámetros del mismo, se procede a cargar la información al lenguaje de programación AMPL. Dado que la función objetivo se considera integral, el modelo matemático se comporta como un modelo de programación no lineal entero.

Con el fin de disminuir la necesidad de capacidad computacional para resolver el modelo, se plantea una operación ficticia $N \in Operaciones$, la cual es compartida por todos los productos y se encuentra ubicada al final de la precedencia de actividades de cada uno de estos. Se replantea entonces la función objetivo de la siguiente manera.

$$Min Z = Max Y_{i,N}$$

Como “N” es la última operación de la secuencia de actividades de cada producto, se garantiza que la función objetivo busque una solución que minimice el tiempo de finalización total más alto, minimizando así el tiempo de terminación total del producto.

Una vez replanteado el modelo de programación en AMPL de acuerdo a la nueva función objetivo, se hace uso del servicio gratuito “Neos Server”, el cual ofrece un conjunto de servidores en la nube con gran capacidad computacional que facilitan la resolución del problema. Cabe aclarar que se utilizó el solver “FilMINT” para resolver el modelo puesto que este ofrece buenos resultados en tiempos de computo debido a su algoritmo de linealización.

Como resultado del modelo, se obtiene el siguiente diagrama de Gantt (Figura 14), donde se puede evidenciar que el modelo cumple con las restricciones de precedencia, ejecución consecutiva de operaciones, tiempos de procesamiento y relacionados con capacidad de las máquinas.

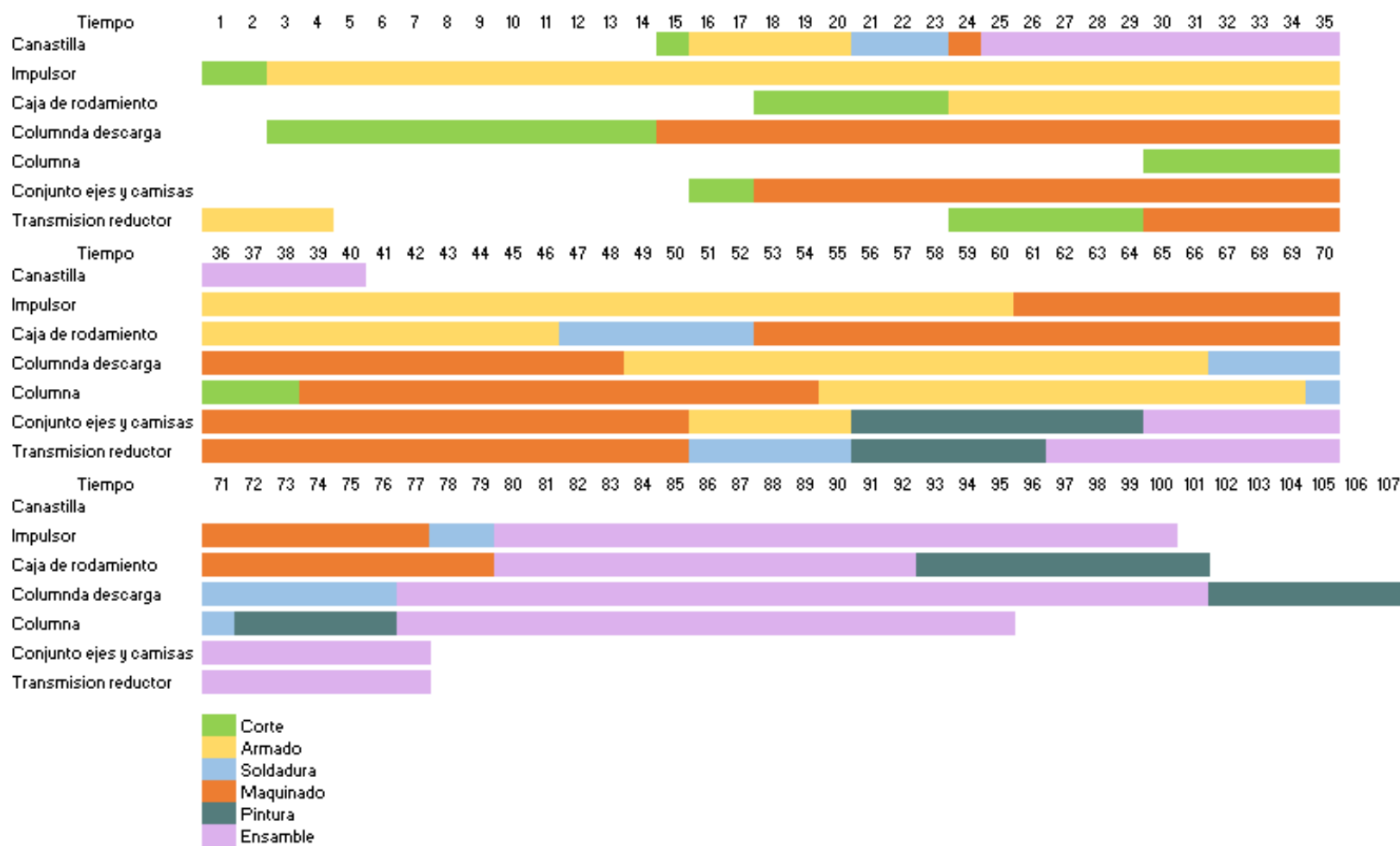


Figura 14 Diagrama de Gantt proceso productivo propuesto por el modelo matemático

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de procesamiento obtenido por el modelo fue de 107 horas, el cual representa un ahorro del 17,69% con respecto al tiempo de procesamiento actual, el cual tiene un valor de 130 horas.

Ahora bien, si se tiene en cuenta que, en un principio, con el fin de simplificar el modelo, los tiempos de procesamiento fueron divididos por un factor común de 3, los tiempos reales actuales y modelos son 390 y 321 horas respectivamente, lo cual en días es equivalente a 48,75 y 40,12 días, teniendo así un ahorro de 8,63 días laborales en el proceso de elaboración de un equipo de bombeo estacionario.

En cuanto a indicadores de productividad el modelo presenta los siguientes resultados.

$$IP = \frac{\# \text{ productos producidos}}{\text{Tiempo total}} = \frac{1 \text{ Unidad}}{107 \text{ horas}} = 0.0093 \text{ U/hora}$$

Teniendo en cuenta que la productividad inicial para la fabricación de una bomba estacionaria era de 0.0077 U/hora, se puede evidenciar un incremento del 20,78% de la productividad del proceso de elaboración.

Por otra parte, la eficiencia en el proceso de fabricación también presenta mejoras de acuerdo a los resultados obtenidos del modelo. A continuación, se presenta una tabla resumen de la información.

Tabla 8 Indicadores de eficiencia del modelo propuesto

INDICADORES DE EFICIENCIA						
Operaciones	Tiempo Inicio operaciones	Tiempo Fin operaciones	Tiempo disponible	Tiempo utilizado	%TU	% TO
Corte	1	38	37	37	100,00%	0,00%
Armado	1	69	68	68	100,00%	0,00%
Soldadura	21	79	58	26	44,83%	55,17%
Maquinado	15	79	64	64	100,00%	0,00%
Pintura	56	107	51	29	56,86%	43,14%
Ensamble	25	101	76	56	73,68%	26,32%

Fuente Elaboración Propia

Si comparamos estos resultados con los presentando en la Tabla 3, se evidencia que los tiempos ociosos del proceso de armado y maquinado se eliminaron en su totalidad, lo cual implica una optima utilización del tiempo para los recursos de estos procesos. Para

los procesos de soldadura y pintura, los tiempos ociosos se reducen en 23,43% y 36,03%, lo cual representa una mejora frente a la situación inicial, sin embargo, aún se presentan tiempos ociosos elevados. Por su parte, el proceso de ensamble es el único que presenta resultados negativos frente a la situación actual del caso de estudio, puesto que incrementa sus tiempos ociosos en 6 puntos porcentuales. Sin embargo, analizando el área de producción como el conjunto de cada uno de sus procesos, los resultados presentan mejoras frente a la situación inicial, con un incremento promedio de la utilización del tiempo en sus procesos del 14,4% y disminución promedio de sus tiempos ociosos en un 32,4%.

Como se menciona anteriormente, se puede evidenciar que, para los procesos de soldadura y pintura, los tiempos ociosos son significativamente altos, por lo cual se decide realizar una serie de pruebas de sensibilidad para analizar el comportamiento de estos indicadores.

La primera prueba consiste en disminuir la capacidad de las máquinas de los procesos de soldadura y pintura. Soldadura pasa de tener 2 a 1 sola máquina, y pintura de 3 a 2 máquinas.

En este escenario, el porcentaje de utilización de los recursos de soldadura y pintura fue de 47,46% y 58,82% respectivamente, lo cual representa un incremento en la utilización de recursos del 2,63% para el proceso de soldadura y 1,96% para el proceso de pintura. Los demás procesos se mantuvieron en sus valores, a excepción del proceso de ensamble que empeoró su situación disminuyendo de un 73,6% a un 69,7%.

Se realiza una segunda prueba en la cual ambos procesos se llevan a capacidad de 1 máquina por operación. Los resultados para el proceso de soldadura no difieren del análisis anterior, y la mejora para el proceso de pintura no representa un cambio representativo en los porcentajes de utilización y tiempos ociosos, esto quiere decir, que con una sola máquina para cada proceso es suficiente para elaborar un equipo de bombeo estacionario, por lo tanto, las demás quedan disponibles para ser utilizadas por otros proyectos.

De acuerdo a estos resultados se puede evidenciar que el modelo no está presentando soluciones que optimicen la utilización de los recursos, motivo por el cual se presentan tiempos ociosos tan elevados para algunos procesos, por lo tanto, se plantea una nueva función objetivo y se evalúan nuevamente los resultados.

Para la nueva función objetivo, se elimina la operación ficticia mencionada al inicio de este capítulo, y se replantea de tal forma que se minimicen el tiempo de terminación más alto para cada producto.

$$\text{Min } Z = \text{Max } Y_{i,j}$$

De esta forma se obtienen los resultados presentados en la figura 15. En este diagrama de Gantt se presenta la programación de las operaciones que propone mejores resultados con respecto al modelo inicial y a la situación actual, debido a que no solo se esta analizando la operación que termine de ultima, sino todas y cada una de las ultimas operaciones para cada producto. Además, con la restricción de utilización de recursos mencionada en el capítulo 10, se garantiza que las operaciones se organicen de tal forma que mejoren las condiciones de utilización de recursos., es decir, se busca reducir los tiempos ociosos del área de producción.

Al aplicar esta restricción, se presentan “brechas” entre operaciones para algunos productos, es decir, a pesar de que la operación j del producto i puede iniciar inmediatamente cuando termina la operación anterior, esta no lo hace en algunos casos, esto se debe a que el modelo da prioridad a la programación de la ruta crítica, y a partir de ahí organiza las operaciones para el resto de productos.

Los productos que no pertenecen a la ruta crítica cuentan con cierta holgura en sus tiempos de procesamiento, lo cual permite que una operación pueda ser ejecutada en diferentes instantes de tiempo sin afectar el tiempo de procesamiento final del proceso. Ahora bien, el factor que si se afecta al programar estas operaciones son los tiempos ociosos, por lo tanto, el objetivo de dicha restricción es disminuir estos mediante la agrupación de las operaciones de acuerdo a su proceso.

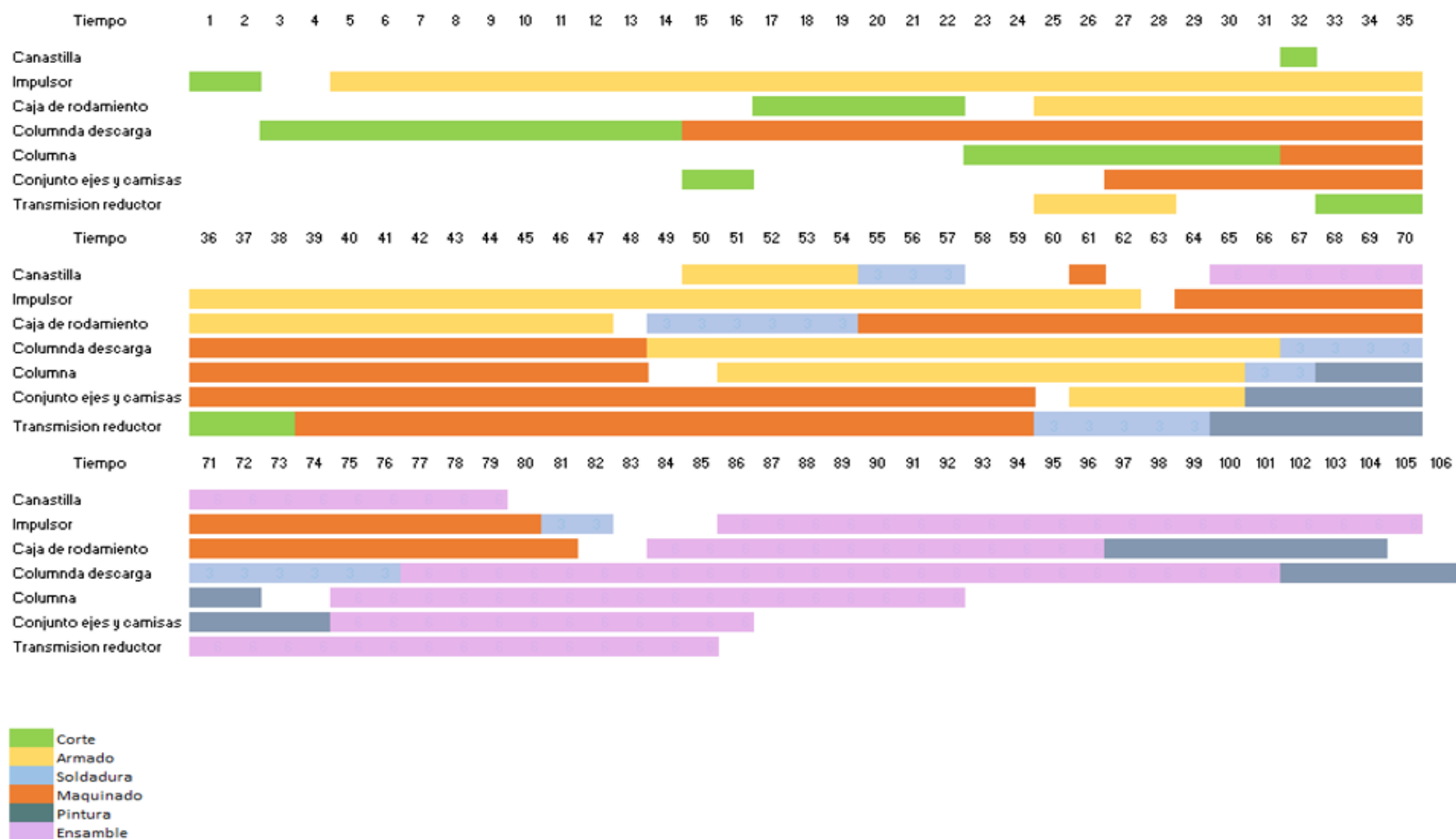


Figura 15 Diagrama de Gantt de modelo que minimiza el tiempo máximo de terminación de cada operación

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9 Indicadores de eficiencia de modelo que minimiza el tiempo máximo de terminación de cada operación

INDICADORES DE EFICIENCIA						
Operaciones	Tiempo Inicio operaciones	Tiempo Fin operaciones	Tiempo disponible	Tiempo utilizado	%TU	% TO
Corte	1	39	38	38	100%	0%
Armado	5	67	62	62	100%	0%
Soldadura	49	83	34	27	79%	21%
Maquinado	15	82	67	67	100%	0%
Pintura	65	107	42	20	48%	52%
Ensamble	65	106	41	41	100%	0%

Fuente: Elaboración propia.

Comparando estos resultados con los obtenidos por el modelo inicialmente planteado, se evidencia que el tiempo de procesamiento total sigue siendo 107 horas, sin embargo, la utilización de los recursos presenta mejora significativa en cada una de las operaciones como se muestra a continuación.

En ambos modelos matemáticos, los procesos de soldadura y pintura presentan tiempos ociosos elevados. La metodología empleada para este cálculo considera el tiempo que estuvo sin procesar alguna operación para cada una de las áreas durante el periodo de inicio de algún proceso en el área y el fin del procesamiento de la última operación.

En la figura 15, se puede observar que el producto “caja de rodamientos” es el primero en hacer uso del área de soldadura iniciando en el instante de tiempo 49, y este recurso se encuentra ocupado hasta el momento 58, desde esté instante hasta el 60, el área de soldadura no procesa ningún producto, por lo tanto, se considera como tiempo inutilizado u ociosos.

Teniendo en cuenta que la última operación procesada en el área de soldadura termina en el instante de tiempo 83, se asume que el área estuvo disponible para operar durante 34 horas, de las cuales solo 27 horas fueron utilizadas efectivamente, por lo tanto, las 7 horas restantes son tiempo ocioso equivalente al 21% del tiempo total disponible.

El tiempo ocioso se debe entonces a las brechas existentes entre operaciones en el área de soldadura, las cuales son resultado de la forma en como el modelo secuencía las actividades en el área de producción y a la precedencia propia de cada producto.

Cabe aclarar que debido a que en el presente documento se evalúa el modelo matemático para un solo proyecto, se decide calcular el tiempo ocioso del área y no de cada máquina, puesto que, si este se calcula recurso a recurso, se encontrará que para algunos procesos los tiempos ociosos serán muy elevados debido a que la empresa caso de estudio cuenta con capacidad para procesar más de un solo proyecto simultáneamente.

Tabla 10 Consolidado de resultados en porcentaje de utilización

VARIACIÓN DE UTILIZACIÓN DE RECURSOS			
Operaciones	% de utilización estado actual	% de utilización modelo inicial	% de utilización modelo mejora
Corte	100,00%	100,00%	100,00%
Armado	87,64%	100,00%	100,00%
Soldadura	27,96%	44,83%	79,41%
Maquinado	87,67%	100,00%	100,00%
Pintura	32,56%	56,86%	47,62%
Ensamble	79,82%	73,68%	100,00%
Promedio	69,28%	79,23%	87,84%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Consolidado de resultados en porcentaje de tiempos ociosos

VARIACIÓN DE TIEMPOS OCIOSOS			
Operaciones	% tiempo ocioso estado actual	% tiempo ocioso modelo inicial	% tiempo ocioso modelo mejora
Corte	0,00%	0,00%	0,00%
Armado	12,36%	0,00%	0,00%
Soldadura	72,04%	55,17%	20,59%
Maquinado	12,33%	0,00%	0,00%
Pintura	67,44%	43,14%	52,38%
Ensamble	20,18%	26,32%	0,00%
Promedio	30,73%	20,77%	12,16%

Fuente: Elaboración propia.

El modelo inicialmente planteado presentaba mejoras en términos de porcentajes de utilización y tiempos ociosos, a excepción del proceso de ensamble. Sin embargo, la forma en cómo se encontraba planteada su función objetivo solo garantizaba la minimización del tiempo de procesamiento total de la última actividad de todo el proceso productivo, ignorando el tiempo que permanecían inactivas las máquinas de cada proceso, motivo por el cual se presentan tiempos ociosos tan elevados para los procesos de soldadura y pintura.

Al modificar la función objetivo, se presentan mejoras significativas frente al modelo inicialmente propuesto y el estado actual, como se ve en la siguiente figura.

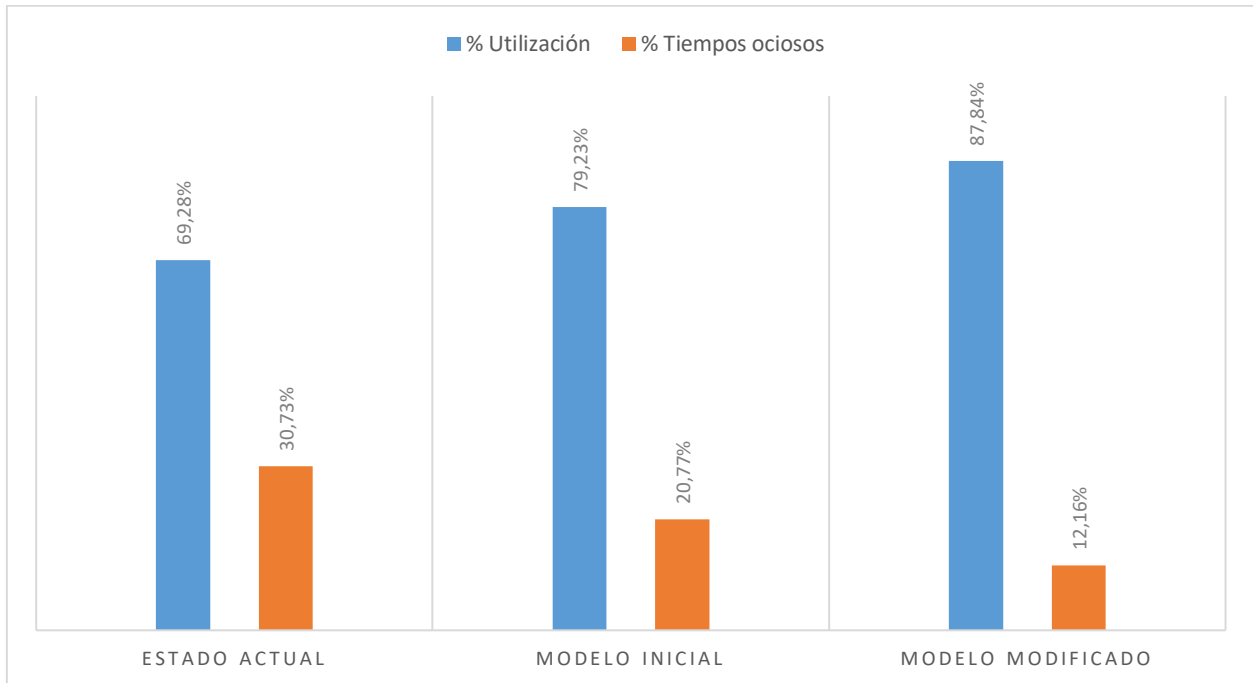


Figura 16 Comparativo de indicadores de eficiencia

Fuente: Elaboración propia.

La figura 16 permite evidenciar que, al minimizar el tiempo de procesamiento de la última operación de cada uno de los productos, se presenta una configuración de programación de operaciones que mejora en gran medida la utilización de los recursos y por lo tanto también disminuyen los tiempos ociosos, presentando así resultados mejores resultados que el modelo inicial.

Estas mejoras se ven reflejadas en disminución de costos de producción, dado que, al aumentar la productividad y eficiencia, se están elaborando la misma cantidad de productos en un menor tiempo y haciendo uso de los mismos insumos y en algunos casos menos. También representa mayor facilidad de cumplimiento de los tiempos de entrega de sus productos generando de esta forma valor para sus clientes.

A pesar de que ambos modelos presentan la misma mejora en términos de productividad y disminución de tiempos de procesamiento, se recomienda la implementación de la segunda propuesta, dado que esta presenta mejores resultados en términos de eficiencia, mejorando la disponibilidad de las máquinas para ser utilizadas en la elaboración de otros proyectos.

De acuerdo a estos resultados, se puede concluir que el modelo es adecuado para ser aplicado en la empresa caso de estudio, puesto que presenta una configuración de las actividades necesarias para la elaboración de un equipo de bombeo estacionario que mejoran el estado actual del área de producción en términos de productividad y eficiencia.

Cabe aclarar que en el presente documento solo se modela la situación de un equipo de bombeo estacionario, sin embargo, el modelo cuenta con la capacidad de optimizar más de un solo proyecto a la vez. Un equipo de bombeo estacionario, se puede interpretar como el conjunto de 7 productos diferentes, los cuales están siendo modelados simultáneamente, si se tiene la necesidad de agregar mas productos, basta con agregar estos en los conjuntos y parámetros del modelo, por ejemplo, si se requiere modelar dos bombas, se deben agregar los 7 productos de esta bomba, con sus respectivos datos de precedencia y tiempos de procesamiento.

En las figuras 17, 18 y 19, se presenta la programación de operaciones para una modelación con tres equipos de bombeo estacionario.

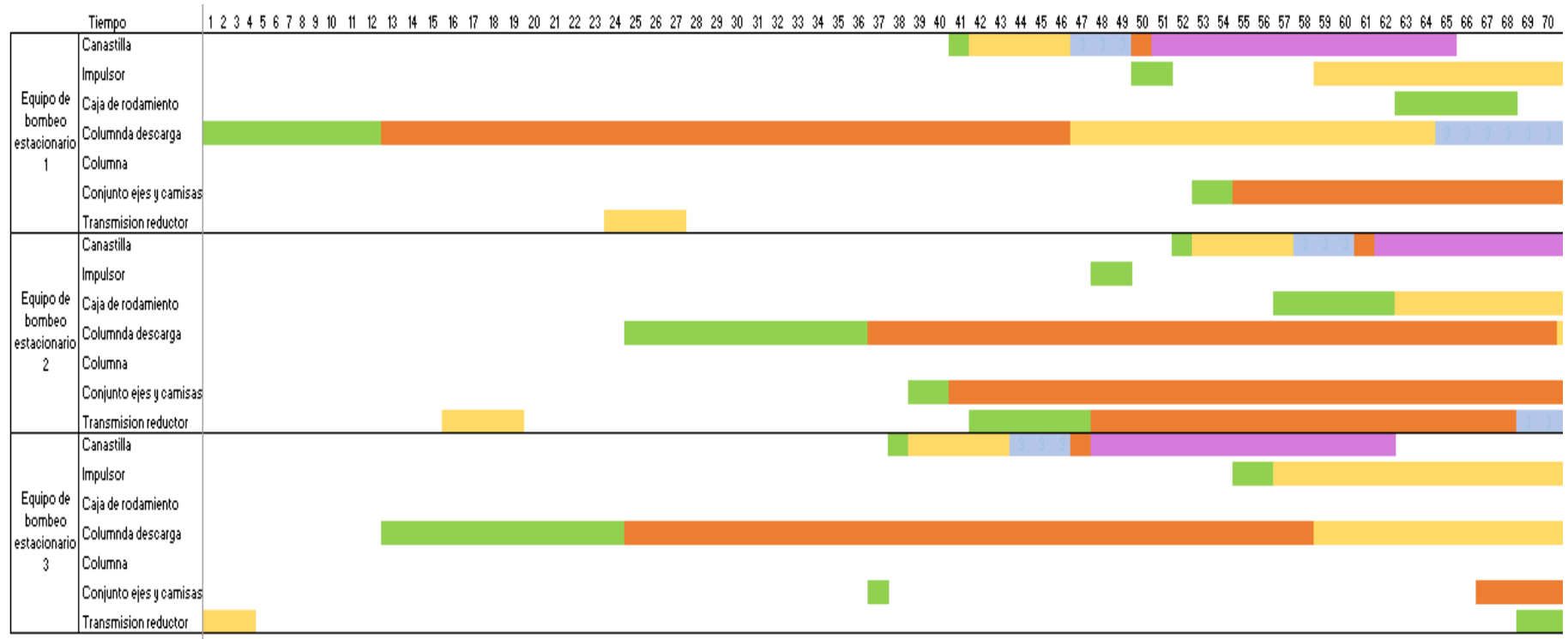


Figura 17 Diagrama de Gantt 1 de modelo para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 1)

Fuente: Elaboración propia.

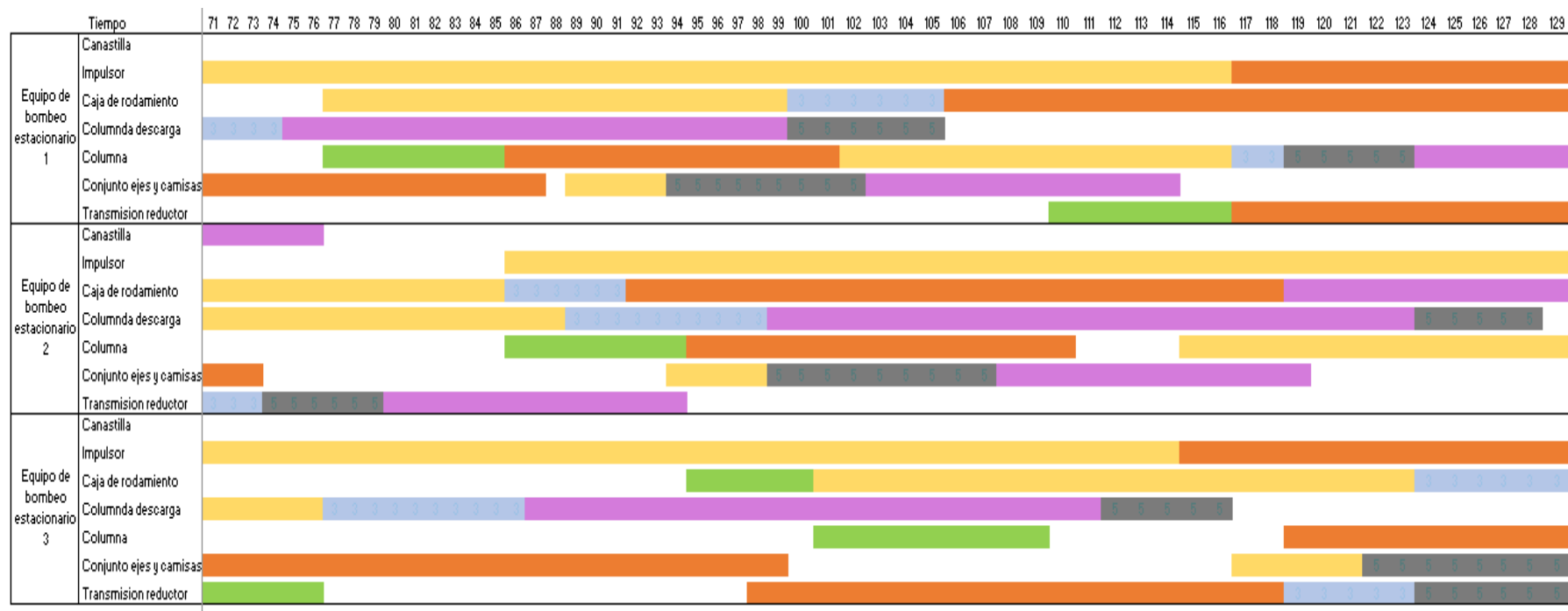


Figura 18 Diagrama de Gantt modelo para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 2)

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 19, la última operación del proceso de manufactura de tres equipos de bombeo estacionario, tiene como tiempo de terminación 182 unidades de tiempo, dado que cada unidad de tiempo es equivalente a 3 horas, el tiempo real de procesamiento de estas tres bombas son 546 horas, lo cual es equivalente a 68,25 días. Dado que no se cuenta con información específica para un proceso de manufactura de tres equipos de bombeo estacionario, se procede a representar un escenario supuesto de programación de operaciones basándose en el criterio de programación que maneja actualmente la empresa con el fin de comparar el desempeño del modelo propuesto. Esta programación se puede observar en las figuras 20, 21, y 22.

En la figura 22, se observa que el primer equipo de bombeo estacionario finaliza su proceso de elaboración en la unidad de tiempo 175, mientras que el modelo propuesto este termina en el instante de tiempo 164, al realizar la conversión a las horas equivalentes se presenta una disminución de 33 horas para la elaboración de un equipo de bombeo estacionario con el modelo matemático propuesto. Mientras que el proceso de elaboración de tres equipos de bombeo estacionarios presenta una disminución de 15 horas.

En cuanto a indicadores de eficiencia, se puede evidenciar en la tabla 12, como se aprovecha en su totalidad el tiempo disponible para los procesos de corte, armado, maquinado y ensamble, mientras que los procesos de soldadura y pintura, presentan tan solo la utilización del 63% de su tiempo disponible, esto se debe a que la función objetivo del modelo da prioridad a la minimización del tiempo de terminación y en segunda medida a la agrupación de las actividades para la eliminación de tiempos ociosos. Si el modelo eliminara estas brechas para los procesos que presentan tiempos ociosos, el tiempo de terminación sería mayor, dado que algunas actividades que cuentan con mayor limitación de máquinas tendrían trabajos en espera por mayor tiempo.

Por otra parte, en la tabla 13 se presentan los resultados para los indicadores de eficiencia para el escenario supuesto de acuerdo al criterio de programación actual. Se puede evidenciar que algunos procesos mejoran la utilización del tiempo con respecto al modelo, como lo es el proceso de pintura, sin embargo, los procesos de armado, maquinado y ensamble presentan disminución en la utilización del tiempo disponible. Esto se debe a que el criterio actual da prioridad a la programación de la ruta crítica y organiza las actividades restantes alrededor de esta, por lo cual se tienen que sacrificar la utilización del tiempo disponible de algunos procesos para evitar crear brechas en las rutas críticas.

A pesar de que el modelo propuesto cuenta con tiempos ociosos para los procesos de pintura y soldadura, este sigue siendo el que presenta mejores resultados, con una utilización promedio de los recursos del 88% y tiempos ociosos promedio del 12%, y una programación de operaciones que presenta menor tiempo de procesamiento total en todos los escenarios presentados en este documento. Por lo cual, se puede concluir que el modelo es apto para ser aplicado en la empresa caso de estudio, y en cualquier otra empresa con características de manufactura similares.

Tabla 12. Indicadores de eficiencia para tres equipos de bombeo estacionario con modelo matemático

Indicadores de eficiencia para tres equipos de bombeo estacionario con modelo						
Operaciones	Tiempo Inicio operaciones	Tiempo Fin operaciones	Tiempo disponible	Tiempo utilizado	%TU	% TO
Corte	1	117	116	116	100%	0%
Armado	38	150	112	112	100%	0%
Soldadura	44	163	119	75	63%	37%
Maquinado	13	161	148	148	100%	0%
Pintura	74	177	103	65	63%	37%
Ensamble	48	182	134	134	100%	0%

Tabla 13 Indicadores de eficiencia para tres equipos de bombeo estacionario con supuesto

Indicadores de eficiencia para tres equipos de bombeo estacionario con supuesto						
Operaciones	Tiempo Inicio operaciones	Tiempo Fin operaciones	Tiempo disponible	Tiempo utilizado	%TU	% TO
Corte	1	117	116	116	100%	0%
Armado	38	135	97	94	97%	3%
Soldadura	43	154	111	70	63%	37%
Maquinado	13	160	147	144	98%	2%
Pintura	100	187	87	65	75%	25%
Ensamble	47	180	133	122	92%	8%

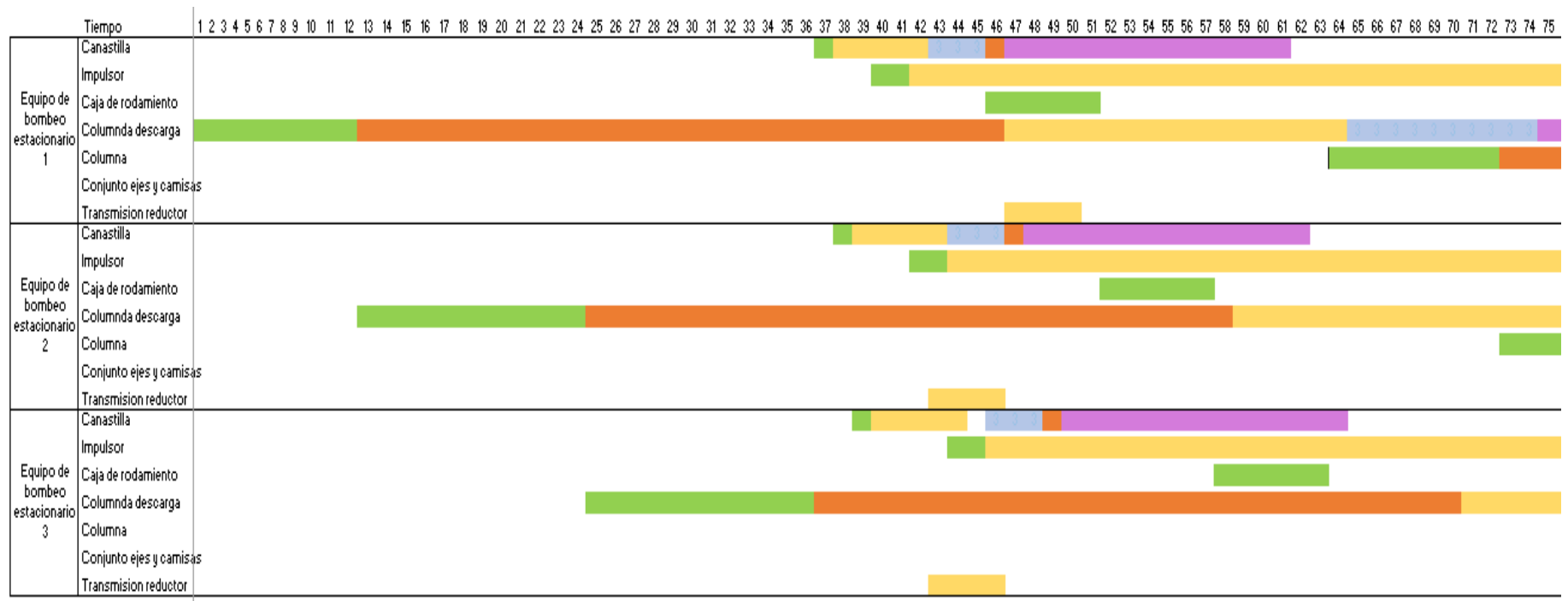


Figura 20 Diagrama de Gantt para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 1)

Fuente: Elaboración propia.

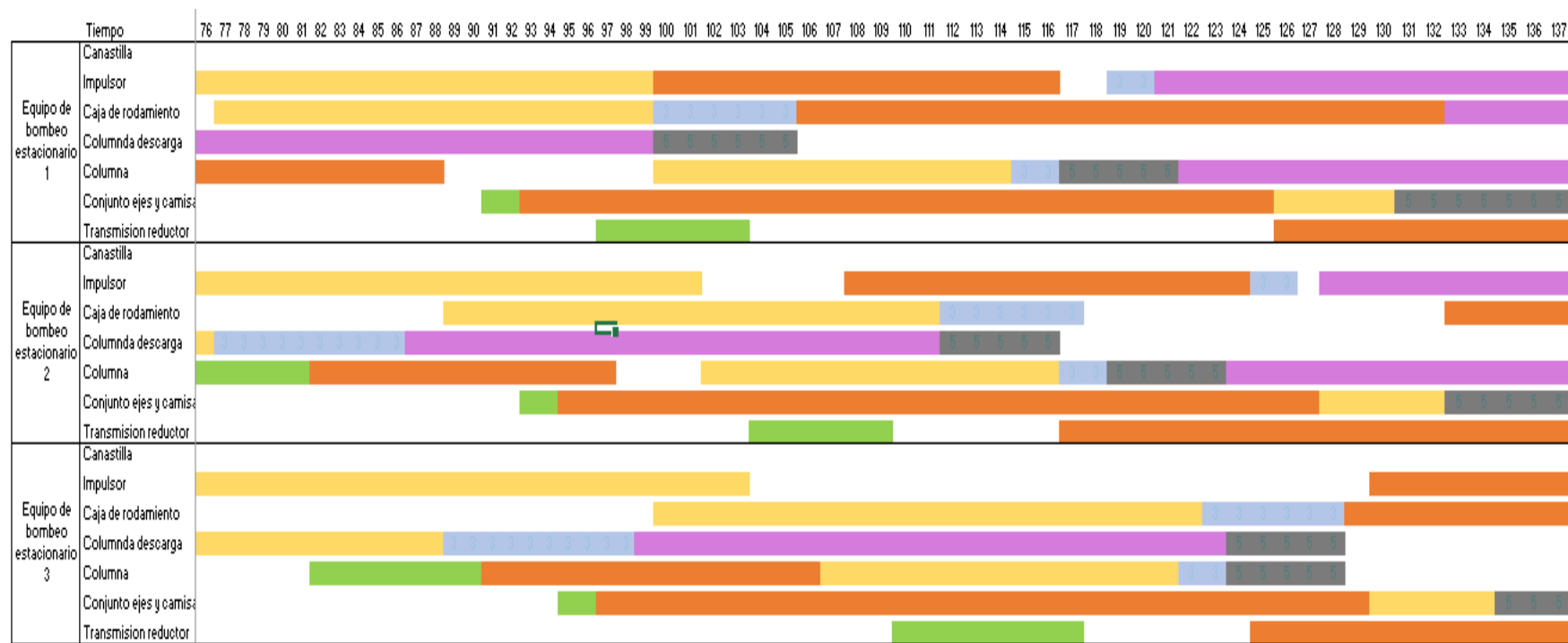


Figura 21 Diagrama de Gantt para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 2)

Fuente: Elaboración propia.

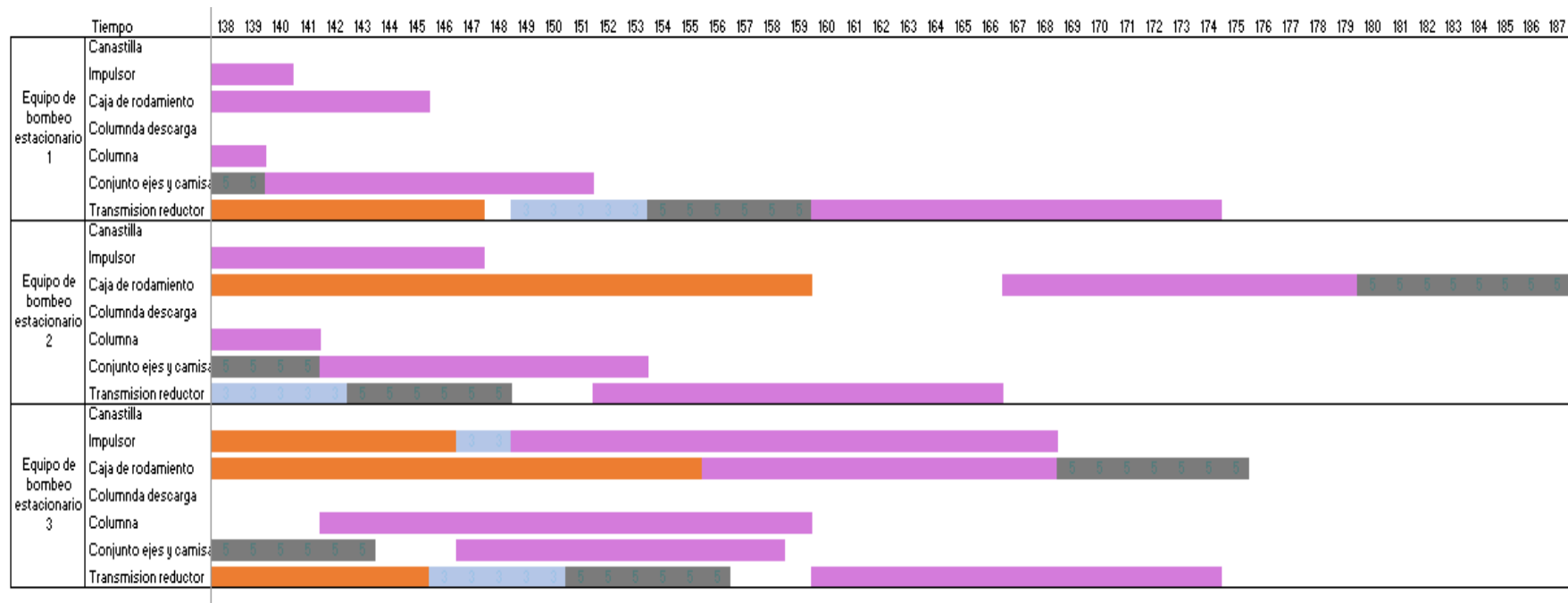


Figura 22 Diagrama de Gantt para tres equipos de bombeo estacionario (Parte 3)

Fuente: Elaboración propia.

12. CONCLUSIONES

- La aplicación de modelos de optimización para abordar el problema del jobshop flexible resulta ser adecuado puesto que presenta resultados que minimizan el tiempo de procesamiento total, mediante la óptima asignación de recursos y secuenciación de operaciones. Sin embargo, para dar solución a problemas de gran complejidad, como lo es la aplicación a casos de estudio reales, se requiere de gran capacidad computacional.
- En la revisión de la literatura, se evidencia poca investigación que aborde el problema de la programación de las operaciones en ambientes jobshop flexibles mediante la optimización, en lugar de esto, se opta por la utilización de heurísticas y meta heurísticas, dado que si necesidad de capacidad computacional es mucho menor y se ofrecen resultados aproximados a un óptimo.
- Por otra parte, las investigaciones que indagan en dar solución al problema mediante la optimización realizan su aplicación en casos de estudio planteados por el autor y en ocasiones no representan la realidad de las empresas.
- El diagnóstico de la empresa permitió conocer de manera suficiente los procesos operativos y la forma en que los recursos impactan el desarrollo de cada uno. Así mismo, fue la base para la construcción del modelo de optimización y para la selección de aquellas actividades críticas a incluir. Se evidencia la importancia de desarrollar esta actividad, previo a la elaboración de cualquier modelación.
- La implementación del modelo de optimización resulta ser apropiado para la empresa caso de estudio, puesto que representa mejoras significativas en los siguientes aspectos, un incremento del porcentaje de utilización de los recursos del 26,80%, disminución de tiempos ociosos en 60,42%, aumento de la productividad del área de producción en 20,78%, y finalmente, disminución del 17,69% del tiempo necesario para fabricar un equipo de bombeo estacionario, es decir, 8,63 días menos. Lo cual, para la empresa, significa un incremento de su nivel de competitividad, debido a la disminución de costos de producción y mayor satisfacción del cliente dado al cumplimiento de los tiempos de entrega.
- Mediante la realización de un análisis de sensibilidad para estudiar el comportamiento del modelo en diferentes escenarios, se pudo identificar falencias de la función objetivo inicial, la cual tiene como fin minimizar la última operación de todo el conjunto

de productos. Al replantear la función objetivo de tal forma que se minimice la última operación de cada producto se evidencian mejores resultados en términos de eficiencia de los recursos.

- El modelo matemático propuesto en este documento es adecuado para ser aplicado en la empresa caso de estudio, o cualquier otra empresa de la industria manufacturera que enfrente el problema de programación de operaciones en ambientes jobshop flexibles.

13.LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Con el fin de dar continuidad al tema, se proponen para futuros estudios tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Posibilidad de ingreso de nuevos proyectos durante el proceso de fabricación.
- Considerar los tiempos de alistamiento y tiempos de transporte no considerados entre áreas de producción.
- Posibilidad de interrumpir operaciones y continuarlas en otros recursos.
- Considerar restricciones de materias primas.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Alomia, C. A., & Lozano, S. (2013). *Programación de la producción en ambiente job shop bajo pedido, basado en el enfoque de proyectos con restricciones de recursos*. Obtenido de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8048/1/CB-0494515.pdf>
- Arreola, A., & DeCroix, G. (1996). Make-to-order versus make-to-stock in a production±inventory system with general production times. *IIE Transactions*, 705 - 713.
- Barnes, J., & Chambers, J. (1996). Flexible job shop scheduling by tabu search. *Graduate program in operations research and industrial engineering*.
- Brandimarte, P. (1993). Routing and scheduling in a flexible job shop by taboo. *Annals of Operations Research*, 157 - 183.
- Brucker, P., & Schlie, R. (1990). Job-shop scheduling with multi-purpose machines. *Computing* 45.
- Castro, C., Velez, M., & Castro, J. (2011). Clasificación ABC multicriterio: Tipos de criterios y efectos en la asignación de pesos. *ITECKNE*.
- Castro, e. a. (2012). *Algoritmo de búsqueda aleatoria para la programación de la producción en un taller de fabricación*. Universidad EAFIT.
- Chase, R., Jacobs, R., & Aquilano, N. (2009). *Administración de operaciones*. McGraw Hill.
- Chen, H., Ihlow, J., & Lehmann, C. (1999). A Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling. *International Conference on Robotics & Automation*, 1120 - 1125.
- Chu, P., & Beasley, J. (1997). A genetic algorithm for the generalised assignment. *ELSEVIER*, 17-23.
- Chung, D., Lee, K., Shin, K., & Park, J. (2005). A new approach to jobshop scheduling problems with due date constraints considering operation subcontracts. *ELSEVIER*, 239.
- Cortes, R., Garcia, J., Pastor, R., & Andrés, C. (2005). Programación de trabajos en maquinas paralelas con velocidad dependiente de la asignación de recursos limitados. *IX Congreso de ingeniería de organización*.
- Coulson, J. M., Richardson, J. F., Backhurst, J. R., & Harker, J. H. (2003). *Ingeniería Química, Operaciones Básicas*. Reverté.
- Dauzere, P., & Paulli, J. (1997). An integrated approach for modeling and solving the general multiprocessor job-shop scheduling problem using tabu search. *Annals of Operations Research*, 281 - 306.
- Defersha, F., & Movahed, S. (2018). Linear programming assisted (not embedded) genetic algorithm for flexible jobshop scheduling with lot streaming. *Computers & Industrial Engineering*, 319 - 335.
- Fattahi, P., Mehrabad, M., & Jolai, F. (2007). Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 331 - 342.
- Gao, J., Sun, L., & Gen, M. (2008). A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. *Computers and operations research*, 2892 - 2907.
- Garey, M., Johnson, R., & Sethi, R. (1976). The complexity of flow shop and job shop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 117 - 129.

- Himmiche, S., Aubry, A., Marangé, P., & Péltin, J.-F. (2017). Modeling flexible workshops scheduling problems - evaluating a timed automata based approach vs MILP. *IFAC Conference paper archive*, 1225 - 1230.
- Hurink, E., Jurisch, B., & Thole, M. (1994). Tabu search for the job shop scheduling problem with multi-purpose machine. *Operations Research Spektrum*, 205 - 215.
- Krajewski, L., Malhotra, M., & Ritzman, L. (2008). *Administración de operaciones*. Pearson.
- Mastrolilli, M., & Gambardella, L. (2000). Effective neighborhood functions for the flexible job shop problem. *Journal of Scheduling*, 3 - 20.
- Mokate, K. (1999). Eficacia, eficiencia, equidad y sostenibilidad.
- Morton, T. E., & Pentico, D. W. (1995). Heuristic scheduling system. *The Journal of the Operational Research Society*, 543 - 545.
- Morton, T., & Pentico, D. (1993). Heuristic Scheduling System. With Application to Production System and Project Management. *New York: Wiley*, 695.
- Osorio, J., Castrillon, O., Toro, J., & Orejuela, J. (2008). Modelo de programación jerarquica de la producción en un job shop flexible con interrupciones y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. *Ingenieria e investigación vol 28*, 72-79.
- Pastor, R. T. (2011). Planificación y programación de operaciones. *Perspectivas*, 33-37.
- Pérez, R., Jöns, S., & Hernández, A. (2015). Solución de un problema de secuenciamiento en configuración jobshop flexible utilizando un Algoritmo de Estimación de Distribuciones. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 49-57.
- Pezzella, F., Morganti, G., & Ciaschetti, G. (2008). A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 3202 - 3212.
- Pública, D. A. (2015). Guía para la construcción y análisis.
- Salazar, H., & Medina, S. (2010). Minimización del makespan en maquinas paralelas identicas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia utilizando un algoritmo genetico. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 44.
- Salazar Horning, E., & Sanchez Pinto, O. (2013). Minimización del makespan en máquinas paralelas idénticas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia utilizando un algoritmo genético. *Ingeniería, investigación y tecnología*.
- Salazar, F. C. (2013). Seleccíon de equipo de bombeo para un sistema de suministro de agua.
- Sinha, S. M. (2006). *Mathematical Programming*. Elsevier.
- Sipper, D., & Bulfin, R. (1998). *Planeación y control de la producción*. McGrawHill.
- Toro Alvarez, F. (1990). Desempeño y Productividad. 257.
- Watanabe, M., Ida, K., & Gen, M. (2005). A genetic algorithm with modified crossover operator and search area adaptation for the job-shop scheduling problem. *Computers and industrial engineering*, 743 - 752.
- Xia, W., & Wu, Z. (2005). An effective hybrid optimization approach for multiobjective flexible job-shop scheduling problem. *Computers and industrial engineering*, 409 - 425.
- Xing, L.-N., Chen, Y.-w., & Yang, K.-W. (2009). Simulation Model of Ant Colony Optimization for the FJSSP. *Encyclopedia of Information Science and Technology*, 7.
- Yazdani, M., Amiri, M., & Zandieh, M. (2010). Flexible JobShop Scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm. *ELSEVIER*, 678 - 687.
- Zhang, H., & Gen, M. (2005). Multistage-based genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problem. *Journal of Complexity International*, 223 - 232.

- Zhang, L., & Wong, T. (2016). Solving integrated process planning and scheduling problem with constructive meta-heuristics. *Information Sciences*, 340-341.
- Zhang, L., Tang, Q., Wu, Z., & Wang, F. (2017). Mathematical modeling and evolutionary generation of rule sets for energy-efficient flexible job shops. *Energy*, 210-227.

15. APÉNDICE

#Archivo .mod

#Como se explica en el documento, este modelo fue probado en "Neos Server" haciendo uso del solver "FilMINT" el cual permite dar solución a problemas no lineales enteros mixtos.

#Nota: Al replicar el modelo (Copiar y pegar) desde el archivo PDF se debe garantizar que no se altere la forma del modelo presentado en este documento, de lo contrario pueden presentarse inconsistencias, se debe evitar copiar los pies de página al intentar realizar la réplica. La réplica fue verificada con la herramienta de lector de PDF's de Microsoft Edge.

Conjuntos

set Productos; #Conjunto de productos $\{1 \dots I\}$, contiene el subíndice I

set Maquinas; #Conjunto de máquinas $\{1 \dots M\}$, contiene el subíndice M

set Tiempo ordered; #Conjunto de ordenado de unidades de tiempo sobre los cuales se simularán las operaciones $\{1 \dots T\}$, contiene el subíndice T

set Operaciones; #Conjunto de operaciones $\{1 \dots J\}$, contiene el subíndice J

set Precedencia {Productos} ordered within Operaciones; #Conjunto ordenado de operaciones J para cada producto I $\{1 \dots I\}$, contiene el subíndice I.

Parametros

param TP {Operaciones, Productos} ≥ 0 ; #Tiempo de procesamiento de la operación J del producto I

param CAP {Operaciones} ≥ 0 ; # Numero de maquinas por operación

Variables de decisión

var X {j in Operaciones, i in Productos} ≥ 0 ; # Momento de inicio de procesamiento del producto I en la operacion j

var Y {j in Operaciones, i in Productos} ≥ 0 ; # Momento de finalización de procesamiento del producto I en la operacion j

var Z {j in Operaciones, i in Productos, t in Tiempo} binary; #Variable binaria, si se esta procesando o no la operaciones J del producto I en el instante de tiempo T

var W {j in Operaciones, m in Maquinas, i in Productos} binary; #Variable binaria, si se esta procesando o no la operaciones J del producto I en la maquina M

Función objetivo

minimize TiempoTerminacion {i in Productos}: Y[7,i]; #Minimizar cada operación j con mayor tiempo de finalización para cada proucto i.

Retricciones

subject to inicio {i in Productos, j in Precedencia[i]: ord(j)=1}: X[j,i]>=1;

subject to ejecucion {j in Operaciones, i in Productos}: X[j,i] + TP[j,i]= Y[j,i];

subject to pred {i in Productos, j in Precedencia[i]: ord(j)<>1}: Y[prev(j),i] <= X[j,i];

subject to uso_minimo_maq {j in Operaciones, i in Productos}: sum {m in Maquinas}(W[j,m,i]) >= 1;

subject to asig_maq {j in Operaciones, m in Maquinas}: sum {i in Productos}(W[j,m,i]) <= 1;

subject to secuenciacion {i in Productos, t in Tiempo}: sum {j in Operaciones}(Z[j,i,t]) <= 1;

subject to capacidad {j in Operaciones, t in Tiempo}: sum {i in Productos}(Z[j,i,t]) <= CAP[j];

subject to ejec_consecutiva {i in Productos, j in Operaciones, m in Maquinas}: sum {t in Tiempo}(Z[j,i,t]) = TP[j,i];

subject to ocupacion1 {j in Operaciones, i in Productos, t in Tiempo}: t*(Z[j,i,t]) <= Y[j,i] - 1;

subject to ocupacion2 {j in Operaciones, i in Productos, t in Tiempo}: (-5000)*(1-(Z[j,i,t])) + X[j,i] <= t*(Z[j,i,t]);

subject to rutacritica {j in Operaciones, i in Productos}: $Y[7,i] \leq 107$; #Restricción de ruta critica, utilizar solo si se requiere disminuir la necesidad de capacidad computacional

subject to agrupar {j in Operaciones}: $\max\{i \text{ in Productos}\} (Y[j,i]) - \min\{i \text{ in Productos}\} (X[j,i]) \leq \sum\{i \text{ in Productos}\} (TP[j,i]) + 10$;

#Archivo .dat

Asignación de valores para los conjuntos

set Operaciones:= 1 2 3 4 5 6 7; # 7 Operaciones

set Productos:= 1 2 3 4 5 6 7; # 7 Productos

set Maquinas:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23;
23 Maquinas en total

set Tiempo:=

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170
171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200; #200 horas

(Unidades de tiempo)

set Precedencia[1]:= 1 2 3 4 6 5 7; #Precedencia para el producto 1

set Precedencia[2]:= 1 2 4 3 6 5 7; #Precedencia para el producto 2

set Precedencia[3]:= 1 2 3 4 6 5 7; #Precedencia para el producto 3

set Precedencia[4]:= 1 4 2 3 6 5 7; #Precedencia para el producto 4

set Precedencia[5]:= 1 4 2 3 5 6 7; #Precedencia para el producto 5

set Precedencia[6]:= 1 4 2 5 6 3 7; #Precedencia para el producto 6

set Precedencia[7]:= 2 1 4 3 5 6 7; #Precedencia para el producto 7

Asignación de valores para los parametros

param TP: #Tiempos de procesamiento de cada producto en cada operación

	1	2	3	4	5	6	7	:=
1	1	2	6	12	9	2	6	
2	5	58	23	18	15	5	4	
3	3	2	6	10	2	0	5	
4	1	17	27	34	16	33	21	
5	0	0	8	5	5	9	6	
6	15	20	13	25	18	12	15	
7	0	0	0	0	0	0	0;	

param CAP:= #Capacidad de maquinas por operación

1	1
2	5
3	2
4	6
5	3
6	5

7 7;

#Archivo Comandos.run

#DISPLAY THE PROBLEM FORMULATION

expand TiempoTerminacion;

#SOLVE

solve;

#SHOW RESULTS

display X, Y, TiempoTerminacion;