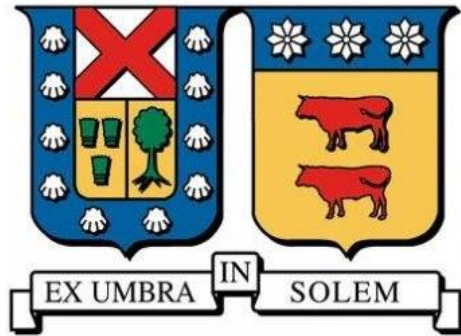




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**PROPUESTA DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE
POLINES PARA LA EMPRESA MAF**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

CATALINA CONCHA SUÁREZ

PROFESOR GUÍA

FREDY KRISTJANPOLLER

SANTIAGO, 31 DE JULIO DEL 2023

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia por su inquebrantable comprensión y apoyo a lo largo de toda mi vida. Gracias por respaldarme en cada decisión que tomé y por guiarme y entregarme información que me ayuda en mis tomas de decisiones que afecten mi vida a futuro.

No puedo dejar de agradecer a Joaquín, quien fue fundamental durante los momentos más complicados de mi carrera. Su presencia incondicional me ha ayudado a superar obstáculos y alcanzar mis metas de manera significativa. Gracias a su aliento y confianza en mí me han ayudado para seguir adelante y crecer en cada paso del camino.

Por último, quiero dar las gracias a mis queridas amigas y amigos por escuchar mis innumerables quejas a lo largo de estos años y por compartir momentos felices durante esta etapa universitaria, lo cual hizo que el camino fuera mucho más divertido y enriquecedor.

Contenido

Capítulo 1.....	5
1.1 Problema de investigación.....	5
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
Capítulo 2.....	7
2.1 Administración de la Producción.....	7
2.2 Minería en Chile	9
2.3 Proceso de Extracción de Cobre en Chile.....	10
2.4 Industria Metalúrgica y Metalmecánica en Chile	10
2.5 Taller Metalmecánico.....	12
2.6 Sector Industrial	13
2.7 Maschinenfabrik (MAF)	15
2.8 Programación de la producción	16
2.9 Problema de Asignación.....	16
2.10. Programación Job-Shop.....	18
2.11. Python.....	20
Capítulo 3.....	21
3.1 Metodología	21
3.2 Empresa en estudio.....	23
Capítulo 4.....	26
4.1 Proceso general	26
4.2 Área de Producción	27
4.3. Productos	32
4.4. Producción	35
4.5. Insumos y Materia Prima	41
Capítulo 5.....	50
5.1 Parámetros	50
5.2 Variables.....	52
5.3 Formulación del modelo de optimización.....	53
5.3.1. Supuestos	53
5.3.2. Conjuntos	53
5.3.3. Función Objetivo	54
5.3.4. Restricciones	54
Capítulo 6.....	56
Conclusiones	64

Anexo.....	66
Referencias.....	74

Capítulo 1

1.1 Problema de investigación

La industria minera en Chile contribuye a un 14,6% en el año 2021 estando además dentro de las principales fuentes de ingreso del país junto con la manufactura y la agricultura. Según lo publicado por (Minería, 2022) se puede segmentar los recursos minerales en Los Recursos Minerales Metálicos (RMM), los cuales constituyen el pilar de la minería chilena correspondiendo a metales como cobre, molibdeno, oro, plata, hierro, plomo, zinc y manganeso, siendo el principal productos de cobre en el mundo, por otro lado se puede encontrar la sección de las Rocas y Minerales Industriales (RMI), estas son relevantes para las actividades del sector químico-industrial, construcción, minero-metalúrgico, agroindustrial, y en la preservación ambiental, en estos destacan los nitratos, yodo, sal común, sales de litio y potasio, boratos, áridos, arcillas, calizas, yeso, cuarzo, baritina, caolín, feldespato, talco, diatomita, bentonita, dolomita, guano, apatita, zeolitas y perlita.

Dado que el fuerte de producción en Chile corresponde al cobre y minerales pesados, las maquinarias que se deben utilizar deben ser tales que puedan resistir las características de estos minerales pesados. Una de las actividades que se ejecutan diariamente en la minería es la transportación de los minerales a sus diferentes estaciones de proceso, para lo cual se utilizan correas transportadoras, es acá donde se encuentra la empresa MAF, la cual busca entregar a las diferentes mineras sus productos de calidad.

Dentro de los productos que se ofrecen se encuentran las estaciones, rodillos y polines (estaciones con rodillos), si bien son solo tres productos los que se ofrecen cada minera tiene requisitos diferentes dependiendo de las condiciones físicas del sector en el cual se encuentra, por lo que ningún pedido es exactamente igual al anterior, ya que, cambian las dimensiones y algunos componentes, por ende, varían algunos procesos.

Considerando la diversidad que se puede encontrar en la producción es que la planificación se considera como un proceso complicado de programar, ya que, se van considerando diferentes criterios de producción generando atrasos en la entrega de los pedidos. Dada la variabilidad en la producción es que el proceso de producción corresponde a un job-shop.

En función a la problemática identificada en la empresa, se plantean las siguientes preguntas ¿Existe alguna forma de planificar la producción de los rodillos y estaciones de tal forma que no se genere insatisfacción por parte del cliente a causa de los atrasos?, ¿Cuáles son los procesos de producción para este tipo de producto?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Proponer a la empresa MAF un modelo de programación de la producción, con el fin de entregar una herramienta que sirva como guía al momento de decidir que trabajo producir.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar la bibliografía de los problemas asociados a la asignación de trabajos y a la programación tipo Job-Shop, esto con la finalidad de entender en mayor profundidad el comportamiento de estos problemas y su posible aplicación en la empresa en estudio.
- Realizar un diagnóstico de la empresa, con la finalidad de conocer los procesos de producción de la empresa MAF.
- Elaborar un modelo de optimización que permita la planificación de la producción en la empresa en estudio.

Capítulo 2

Con la idea de organizar los conceptos y temas a tratar en el desarrollo de la problemática identificada anteriormente es que se presenta el marco teórico, siendo este un elemento esencial para cualquier estudio de investigación, ya que proporciona una base para comprender el problema de investigación.

2.1 Administración de la Producción

La administración de la producción y las operaciones en una empresa que produce bienes y/o servicios es un área de la industria muy estudiada, puesto que aquí es donde se percibe más empíricamente la relación entre las distintas áreas de la organización. El término administración de las operaciones refleja un aspecto bastante amplio, en el cual se observa el proceso de dirigir personas y recursos para crear un producto o servicio; en donde las finanzas, el marketing y la producción son las tres áreas funcionales de una organización (Nahmias et al., 2007).

La administración de la producción refleja un aspecto bastante amplio que abarca el proceso de dirigir personas y recursos para crear un producto o servicio, así como se mencionó anteriormente esto abarca las áreas como finanzas, en donde se encargan de proveer el capital necesario para financiar la producción, por otro lado, el marketing se enfoca en identificar las necesidades de los clientes y la promoción de los productos y/o servicios que ofrezca la empresa y finalmente la producción se focaliza en transformar la materia prima en productos listos para el uso, con enfoque en la eficiencia de sus procesos otorgando calidad en sus productos finales.

Dentro de la administración de la producción, existen diferentes enfoques y técnicas que se utilizan para optimizar los procesos productivos. Algunos de los conceptos y herramientas más relevantes identificados en Heyzer (2007) son:

1. **Planificación de la producción:** Se establecen los objetivos y metas de la producción, así mismo se determinan los recursos necesarios, tanto materia prima, como insumos y mano de obra, además de diseñar el plan de producción tanto a corto como largo plazo. Con base en lo anterior es que se debe tomar decisiones como la capacidad de la producción, asignación de recursos y la secuencia de las actividades.
2. **Gestión de inventarios:** Corresponde a la administración y control de los niveles de inventario tanto de la materia prima, como los productos en proceso y terminados, teniendo por objetivo la mantención del equilibrio entre la disponibilidad de producto y la demanda que se debe satisfacer, estando de la mano con la minimización de los costos asociados a almacenamiento y manejo de inventarios.

3. **Gestión de la calidad:** Se implementan estrategias que garantizan que los productos o servicios que se ofrecen cumplan con los estándares de calidad establecidos por la empresa. Esto implica el uso de herramientas de control estadístico de procesos, normas de calidad y mejora continua.
4. **Mejora de procesos:** Como continuación de la planificación de la producción, se identifica y eliminan actividades que no agregan valor en los procesos productivos, para lo cual se utilizan herramientas como Lean Manufacturing y el Six Sigma para identificar y eliminar desperdicios, reducir tiempos de espera y optimizar la eficiencia de los procesos.
5. **Gestión de la cadena de suministro:** Se combina la coordinación y la optimización de todas las actividades que se relacionan con la adquisición de materia prima, la producción y la distribución de los productos terminados. Lo anterior implica que se debe establecer una relación de tipo colaborativa con los proveedores, con el objetivo de gestionar la logística y garantizar la disponibilidad de los recursos necesarios para la producción en el momento adecuado.

Ahora según Bowman (1967) los problemas más importantes que se pueden encontrar dentro de la administración de la producción son:

- 1) Inventarios.
- 2) Control y programación de la producción.
- 3) Selección y reemplazo de equipo.
- 4) Mantenimiento.
- 5) Tamaño y ubicación de plantas.
- 6) Estructura y disposición de la planta.
- 7) Inspección y control de calidad.
- 8) Manejo del tráfico y de los materiales.
- 9) Métodos.

La administración de la producción en una empresa es fundamental para garantizar el éxito en el mercado y mejorar la eficiencia de la empresa. Algunas de las razones por las cuales es de suma importancia llevar una correcta administración es, mejora en la productividad, puesto que una buena gestión de la producción permite una mejor utilización de los recursos disponibles, así mismo se genera una reducción

en los costos, por otro lado disminuye el riesgo de pérdida asociada a los materiales que no han sido utilizados o por obsolescencia y finalmente, existe una mejora en la satisfacción del cliente, puesto que se termina ofreciendo productos y/o servicios de mejor calidad.

A lo largo del tiempo, el enfoque de la administración de la producción ha ido cambiando, pasando de una perspectiva centrada en la eficiencia y la reducción de costos a una visión más amplia, la cual considera aspectos como la calidad, innovación, flexibilidad y sostenibilidad. Hoy en día el objetivo principal no es solo aumentar la producción, es sino también hacerlo de manera más sostenible y alineado con las expectativas y necesidades de los clientes.

Se considera que la administración de la producción es clave para optimizar los procesos productivos y mejorar la competitividad de una empresa. A través de la planificación, organización y control de los recursos y actividades relacionados con la producción, se busca maximizar la eficiencia, la calidad y la rentabilidad, al tiempo que se busca satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes.

Ahora aterrizando los conceptos mencionados, en Chile las tres industrias más importantes son la minería, la agrícola, acuícola y pesquera, por lo cual es importante el estudio de la planificación de la producción en estas áreas, es por esto se estudian actualmente sus formas de producción, se realizan análisis de proveedores tanto de materia prima como de maquinarias además de analizar la demanda, la competencia, entre otras características de la industria que se encuentren pertinentes para mejorar y ser más competitivos con el resto del mundo.

2.2 Minería en Chile

Según lo mencionado en Minería (2022) se reconoce mundialmente a Chile como un país minero, esto debido a que su territorio es rico en yacimientos y depósitos metalíferos, además de rocas y minerales industriales. La minería de acuerdo con lo planteado por Department (2022) corresponde a una participación del 12,5% del PIB nacional durante el año 2020, de lo cual un 11,2% corresponde a la producción del cobre.

En SERNAGEOMIN (2020) se menciona que la producción nacional en el año 2020, debido a la pandemia causada por el COVID-19 ha afectado en forma dramática y en particular en Chile afectó a la minería, la cual corresponde a uno de los principales pilares económicos del país, los minerales como el cobre y el oro han disminuido su producción en relación al 2019, en un 0,8% y 11,9% respectivamente, por otro lado aumentaron su producción principalmente el zinc en un 410%, la plata un 20,4%, el hierro 17,4% y el molibdeno un 10.8%.

Dado que la minería, en específico el cobre corresponden a uno de los pilares económicos de Chile, es importante conocer el proceso de extracción de estos, para de esta forma poder optimizar de mejor

manera los procesos y así determinar las maquinarias necesarias para la producción.

2.3 Proceso de Extracción de Cobre en Chile

El cobre se define como un metal de color cobrizo se caracteriza como uno de los mejores conductores, tanto de electricidad como de temperatura, además se caracteriza por ser maleable. Algunos de los usos que tiene el cobre se encuentran principalmente en las industrias manufacturera, eléctrica, electrónica y química, además en la fabricación de maquinarias, automóviles y como material bactericida, además este se puede encontrar en joyería, muebles, instrumentos musicales, utensilios de cocina, entre muchos otros productos de uso cotidiano.

SERNAGEOMIN (2020) menciona que la producción del cobre en Chile se lleva a cabo principalmente en las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, las cuales se llevan un poco menos del 40% de las reservas del planeta, la producción de cobre y otros minerales es ejecutado por empresas estatales y privadas.

Ahora el proceso de extracción según lo ilustrado por Codelco (2018) consta de 4 pasos, perforación, la cual consiste en hacer hendiduras en la tierra en las que más adelante se instalarán explosivos, luego se tiene las tornaduras, esta etapa corresponde a la detonación de los explosivos instalados en los hoyos, una vez se logra fragmentar el macizo rocoso se procede al carguío, donde mediante palas y equipos de gran tonelaje se cargan los camiones que llevarán el material recolectado a las plantas de procesamiento, para finalmente encontrarse con el transporte, en donde se encuentran camiones, trenes o correas transportadoras (especializadas según la mina), llevando las rocas a su lugar de destino y así continuar con su proceso productivo.

Como se puede ver según lo mencionado anteriormente, uno de los procesos que se llevan a cabo para la extracción del cobre, es el transporte, proceso en el cual se ven involucradas las correas transportadoras, las cuales son fabricadas según la característica de la mina, por lo que es un producto personalizado, que considera diferentes factores para su fabricación. Dada la complejidad en su fabricación es que no se compran las maquinarias a cualquier proveedor, y tampoco se encuentra en el mercado un producto estándar, es por esto que se recurren a los talleres metalmecánicos que se especializan en este tipo de productos especializados.

2.4 Industria Metalúrgica y Metalmecánica en Chile

Como se mencionó en el punto anterior la industria Metalúrgica y la Metalmecánica, se adaptan según el tipo de industria a la que la empresa que decida contratar sus servicios, puesto a que estas se adaptan según los requerimientos de esta.

La Industria Metalúrgica y Metalmecánica en Chile (Industria M-M), se caracteriza por ser heterogénea en su oferta, así como por la gran variedad de empresas que la componen según lo planteado en S.A (2015). Acá se pueden encontrar pequeñas, medianas y grandes empresas que se distribuyen entre la etapa primaria y secundaria según en lo que estas se especialicen.

Las actividades desarrolladas en la Industria M-M se puede dividir en dos sectores, uno corresponde a las Metálicas Básicas o también se podrá encontrar como Construcción, en las cuales sus actividades se centran en la fabricación de metales y productos elaborados de metal, mientras que el segundo sector corresponde al Metalmecánico el cual también se puede encontrar como Productos metálicos, maquinaria, equipo y resto, en donde se encuentran las actividades relacionadas con la fabricación de maquinarias y equipos de cualquier tipo, donde estos además se pueden subdividir en otros sectores, dependiendo de su especialización, como por ejemplo automotriz y minería.

Por otra parte, de acuerdo a lo presentado en Metalmecánicas (2022) se tiene que el PIB Nacional del año 2022 entre los meses de enero y septiembre es de US\$ 224.854 millones, del cual la Industria M-M aporta un total de US\$ 16.912 millones siendo un 8% del PIB Nacional, donde un 20% corresponde al sector de Metálicas Básicas y el 80% es del sector Metalmecánico, ahora en cuanto al sector Manufacturero, este aportó un total de US\$ 21.683 millones correspondiendo a un 9,6% del PIB Nacional, de este monto al compararlo con la Industria M-M, esta pertenece al 78% del sector Manufacturero. Lo anterior mencionado se puede observar en la tabla 1.

Sectores	US\$ Millones	% del PIB nacional
Minería	31,189	13.9%
Industria Manufacturera	21,683	9.6%
Metálicas Básicas	3,458	1.5%
Metalmecánicos	13,454	6.0%
PIB Nacional	224,854	

Tabla 1: Producto interno bruto a precios corrientes (millones de pesos) observado promedio del periodo. (Fuente: Metalmecánicas (2022)).

Dado que el sector Metalmecánico tiene un aporte del 6%, se ve que su importancia en el PIB Nacional es mayor que el sector de Metálicas Básicas, además es fundamental notar que la Metalmecánica tiene una fuerte relación con el sector minero en cuanto a sus proveedores de maquinaria, puesto que cada equipo que una minera necesite en específico debe ser este realizado a medida según las características del sector en el que se encuentra la minera y según los requisitos que esto requieran, es por esto que se verá a continuación cómo funciona un taller Metalmecánico.

2.5 Taller Metalmecánico

El área de la metalmecánica abarca los sectores que comprenden las maquinarias industriales y las herramientas proveedoras a las demás industrias mecánicas, por otro lado, se puede definir como una industria dinámica, la cual se encarga de entregar maquinaria, herramientas y bienes de consumo, los cuales están principalmente fabricados con metales, a los demás eslabones de una cadena productiva, permitiendo que los talleres metalmecánicos abarquen una gran cantidad de rubros industriales, esto es según lo planteado en S.L.U (2020).

En cuanto al proceso de producción que se lleva a cabo dentro de un taller metalmecánico, según lo mencionado anteriormente, se toma la materia prima a la cual se le altera su forma para lograr formas intermedias y finales. Acá se encuentran dos fases fundamentales según lo planteado en Ambiente (2001) siendo estas la primaria y secundaria. La etapa primaria consiste en tomar el metal como materia prima y realizarle una serie de procesos que lo lleven a una forma más fácil de trabajar, como por ejemplo láminas, barras, alambres, entre otros; ahora para la etapa secundaria, esta consiste en tomar lo obtenido en la etapa primaria y alterar su forma, buscando llegar a la forma final; los procesos que comúnmente se desarrollan en ambas etapas se muestran a continuación:

Etapa Primaria	Etapa Secundaria
Maquinado abrasivo a chorro	Estampado
Moldeo	Trefilado
Revestimiento	Corte y forma
Estirado	Molienda o maquinado
Maquinado con flujo eléctrico	Torno
Deformación por impacto	Escariar
Deformación por presión	Pulir
Corte térmico	Perforar
Maquinado con descarga eléctrica	Roscar
Extrusión	Cepillar
Maquinado con flujo laser	
Enrollamiento	
Maquinado ultrasónico	
Maquinado electroquímico	
Forjado	
Maquinado por arco de plasma	
Chorro de arena	

Tabla 2: Datos obtenidos de Ambiente (2001) Fuente: Elaboración propia.

Uno de los sectores que más recurren a los talleres Metalmecánicos es la minería, dado que las maquinarias que se requieren para la extracción de los minerales deben ser tales, que logren soportar la

carga y que se adecúen al sector en el cual se encuentra la minera en cuestión, es por esto que es importante comprender como es la minería en Chile, y así mismo es importante conocer el sector industrial de talleres Metalmecánicos que existe en Chile, para seleccionar el que mejor cumpla con los requerimientos que se están solicitando para la construcción de las maquinarias que se utilizarán en la minera.

2.6 Sector Industrial

Para la selección del proveedor al cual se decidirá contratar para proveer de las maquinarias necesarias para el funcionamiento de la minera, se debe conocer a que tipo de industria se debe investigar y así comparar los diferentes proveedores.

La minería se caracteriza por sus constantes avances tecnológicos, por lo que las correas transportadoras no son la excepción acá se busca prevenir períodos de inactividad a causa de posibles desperfectos, puesto que un apartada del sistema de transporte del mineral significa grandes pérdidas financieras para las firmas del rubro.

En Revista Nueva Minería y Energía (2019) se menciona que las correas transportadoras representan un eslabón fundamental en las operaciones de la industria minera, es por esa razón que sus proveedores están buscando nuevas formas para extender no sólo su vida útil, sino también su confiabilidad.

Por lo anterior es que existe la necesidad de contar con equipos que aseguren una operación continua en el rubro minero, por lo que, tanto el diseño como los materiales de las correas transportadoras se han adecuado a las necesidades de cada faena.

En los últimos años se han incorporado varias mejoras a través de la instalación de sensores electrónicos en vez de mecánicos, los cuales son capaces de detectar fallas y disminuir los tiempos de mantención, ya que las alertas se realizan de manera precoz, también se destaca el aumento de la velocidad de estos equipos y su diseño más eficiente, para que el viaje de los minerales sea óptimo. A lo anterior se le agrega que uno de los cambios más notorios es su capacidad de transporte de minerales de grandes volúmenes, a lo cual la industria proveedora ha modificado los estándares y generando nuevos modelos con capacidades superiores, este salto tecnológico que han sufrido las correas transportadoras ha sido apreciado por las diferentes mineras, destacando su eficiencia y sus diferentes avances de confiabilidad y mantenibilidad.

Por su parte en Revista Nueva Minería y Energía (2019), Sergio Zamorano, vicepresidente global de proyectos y desarrollo de productos de la firma de origen indio oriental Rubber Industries, sostiene que la eficiencia energética es una tendencia fuertemente presente respecto de los nuevos desarrollos de correas

transportadoras, además se están incorporando nuevos componentes, los cuales son más resistentes a la abrasión y ataques químicos, entre otros o con propiedades antiadherentes.

Además de sus ventajas prácticas, los polines también ofrecen ventajas de seguridad. Es menos probable que se rompan bajo cargas pesadas, lo que reduce el riesgo de accidentes y lesiones. Además, están equipadas con frenos de seguridad que se activan automáticamente en caso de rotura o aflojamiento de la línea, lo que supone un nivel adicional de protección para los mineros. En general, los polines desempeñan un papel crucial en la industria minera chilena, ya que permiten una extracción eficaz y segura de los minerales.

Ahora es importante conocer los efectos causados por la llegada de la crisis sanitaria causada por el Covid-19, la cual trajo consigo una fuerte recesión sin precedentes en la historia, donde la minería no estuvo ajena a este fenómeno, siendo afectada por la paralización y retraso de nuevos proyectos mineros.

Revista Nueva Minería y Energía (2019) se dice que el efecto del cobre también ha sido un factor preocupante, ya que ha bajado más de lo proyectado por el gobierno, acercándose a unas cifras que superan levemente al costo de la operación.

Pese a lo anterior mencionado, las mineras no pueden parar de producir, por lo que actualmente se busca optimizar la producción, ya que se debe procesar más mineral dado que las metas de producción se mantienen o aumentan. Esto afecta directamente a las correas transportadoras, dado que se deben repotenciar para transportar un mayor flujo y en algunos casos, incluso cambiar el ancho a uno mayor de las correas.

Ahora ¿Qué le espera entonces al mercado de las correas transportadoras en medio de la crisis sanitaria del Covid-19 y el incierto panorama económico que deriva de ello?, en opinión de Sergio Zamorano “es muy probable que disminuya la demanda por nuevos proyectos, pero la demanda por apoyo a las operaciones debería mantenerse, incluyendo nuevos requerimientos para adaptarse a la situación cambiante de la economía”. Por otro lado, una visión más optimista del experto Fernando Kanacri, espera que tanto China como Estados Unidos analicen paquetes de estimulación de comercio, lo cual beneficiará a nuevos proyectos en Chile que involucren a las correas transportadoras.

Para conocer mejor sobre el sector industrial al que nos estamos enfocando, es que se presenta a continuación a la empresa Maschinenfabrik (MAF).

2.7 Machinenfabrik (MAF)

Machinenfabrik (MAF) es una empresa chilena con una larga y rica historia en la industria manufacturera. La empresa se fundó a principios del siglo XX y, a lo largo de los años, ha crecido hasta convertirse en un proveedor de equipos y maquinaria industrial en Chile y en toda Sudamérica.

Los orígenes de la empresa se remontan a cuando un grupo de ingenieros y técnicos alemanes llegó a Chile para establecer una fábrica de fabricación de maquinaria y equipos, generando una alianza chileno-alemán bajo la licencia de fabricación FAM, reconocido proveedor alemán de equipos para la gran minería mundial. A lo largo del siglo XX, Machinenfabrik continuó creciendo y expandiendo sus operaciones, convirtiéndose en un gran proveedor de equipos industriales y maquinaria para diversas industrias, incluyendo la minería, la agricultura y la construcción. El compromiso de la empresa con la innovación y su interés por satisfacer las necesidades de sus clientes le ayudaron a forjarse una sólida reputación en el mercado.

A finales del siglo XX, Machinenfabrik tuvo que hacer frente a la creciente competencia de empresas internacionales que entraban en el mercado chileno. Sin embargo, la empresa fue capaz de adaptarse y seguir siendo competitiva invirtiendo en investigación y desarrollo y ampliando su oferta de productos para incluir tecnología y equipos de última generación.

Machinenfabrik (2021) en la actualidad, Machinenfabrik, se dedica principalmente a la fabricación de componentes para las correas transportadoras utilizadas en la industria minera, más en específico se dedican a la construcción de estaciones y rodillos de los polines. Sus instalaciones se encuentran en Santiago y Antofagasta. Dentro de las empresas a las cuales les ofrece sus productos y servicios se encuentra BHP, Codelco, y de Antofagasta Minerals se puede encontrar a Zaldívar, Centinela, Antucoya y Los Pelambres.

El presente informe busca establecer una conexión entre la empresa objeto de estudio y la administración de la producción, con el propósito de proponer un modelo de optimización matemática. Mediante el uso de técnicas avanzadas, algoritmos y métodos cuantitativos, se busca mejorar la eficiencia y rentabilidad de la producción, a través de la toma de decisiones informadas basadas en datos. Antes de comenzar con el planteamiento del modelo se debe conocer cómo es que se realiza una programación de la producción.

2.8 Programación de la producción

La programación de la producción es fundamental, puesto que se enfoca en la mantención de los abastecimientos de los productos y materias primas, además de la identificación de los cuellos de botella en la producción, ayuda también a realizar ajustes de la producción en base a la demanda determinada y la mantención de los puestos de trabajo.

La programación se utiliza principalmente en las empresas para determinar cuándo producir y la cantidad, con el objetivo de satisfacer a tiempo las necesidades de los clientes, esto es teniendo en consideración además la capacidad de la planta y la demanda determinada que se desea satisfacer según los objetivos de la empresa en un horizonte de tiempo definido (Xia. W. et al., 2005) Explica que la mayoría de los problemas de programación son complejos problemas de optimización, donde se encuentra la combinatoria, haciendo que su resolución sea compleja. Dentro de los problemas de optimización se encuentran los tipos taller o también conocidos como Job-Shop (JSP), siendo este uno de los más complicados de resolver debido a la variedad de productos que se pueden producir y por tanto la combinatoria de las máquinas necesarias para su producción.

(Xia. W. et al., 2005) también dice que el JSP clásico se basa en programar un conjunto de trabajos en un conjunto de máquinas buscando la minimización de un objetivo determinado, pudiendo este ser los costos, inventario, makespan, entre otros; esta función objetivo está sujeto a la restricción de que cada trabajo tiene un orden de procesamiento específico a través de todas las máquinas, este tipo de problema es conocido como NP-hard, lo que está asociado a la complejidad computacional del problema que se desea resolver, por lo que no se puede garantizar la optimalidad del problema.

El foco principal de este tipo de problema es la asignación de un trabajo a una máquina, según el tipo de operación que se deba llevar a cabo para la obtención del producto final, resolviendo las preguntas “como” y “cuando” producir.

2.9 Problema de Asignación

Los problemas de asignación consisten en encontrar la forma más eficiente de asignar los diferentes recursos disponibles, esto puede incluir materia prima, mano de obra, máquinas, entre otros, teniendo como objetivo de minimizar los costos, minimizar el tiempo de ejecución, maximizar utilidades, entre otros objetivos según sea lo que se esté buscando, para esto se pueden tomar diversas suposiciones, como por ejemplo que cada tarea tiene asociados ciertos recursos.

Lo anterior se puede explicar de la siguiente forma según lo planteado por Sinha (2006), supongamos que se tienen “n” trabajos por realizar y “n” personas, donde cada una puede realizar los trabajos, pero con una eficiencia distinta entre sí, donde a través de pruebas de rendimiento se puede estimar el costo de asignar la i-ésima persona al j-ésimo trabajo, donde este parámetro se denota como c_{ij} , pudiendo este ser tiempo, dinero, o cualquier elemento que permita medir la eficiencia ante la asignación de un trabajo “j” a una persona “i”. Se desea asignar un solo trabajo a cada persona buscando que el costo de asignar sea el mínimo. Este tipo de problema trae consigo la permutación, es decir para poder asignar una persona i-ésima se le asigna un trabajo P_i , el problema es encontrar la permutación $(P_1, P_2, \dots, P_n)$ de un conjunto de $n!$ permutaciones, de tal forma que el costo total de la asignación sea mínimo.

$$Z = \sum_{i=1}^n c_{ij}$$

Dada la naturaleza del problema el número de posibilidades crece rápidamente, este proceso enumerativo lleva mucho tiempo, por lo que no es práctico, de forma alternativa se puede expresar el problema como:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la persona "i" es asignada al trabajo "j"} \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases}$$

La función objetivo sería:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} X_{ij}$$

Dado que la función por sí sola no entrega resultados factibles, es que se definen ciertas restricciones con el objetivo de garantizar el cumplimiento de todos los trabajos:

- (1) La primera restricción tiene como objetivo garantizar que cada trabajo se le asigna a una sola persona, buscando la optimización del tiempo o costos.

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

- (2) La segunda restricción corresponde al cumplimiento de todos los trabajos, por lo que cada persona sea asignada a un solo trabajo.

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

- (3) Naturaleza de las variables.

$$X_{ij} \in \{0, 1\}$$

Este tipo de problema corresponde a uno de tipo programación lineal entera, por lo que dada la naturaleza de las variables es más complicado de resolver, pero al relajar las restricciones le entrega mayor

flexibilidad al problema.

Es un problema de programación lineal en que las variables están siendo restringidas a números enteros, lo que hace que el problema sea difícil de resolver, sin embargo, si se sustituye la restricción (3) Naturaleza de las variables, por la condición de que $X_{ij} > 0$, se reduce a un problema de transporte con cada $a_i = b_j = 1$, con esto se sabe que la solución de un problema de transporte será no negativa enteros cuando a_i y b_j son enteros y, por tanto en este caso, la solución se satisface automáticamente la restricción (3) de la naturaleza de las variables. Por lo tanto, el problema de asignación es un caso especial del problema de transporte, sin embargo, la estructura del problema es tal que cada solución básica factible es degenerada, ya que exactamente n variables básicas deben tener el valor unidad y las $(n - 1)$ variables básicas deben ser todas iguales a 0. Por lo tanto, el problema es altamente degenerado y resolver un problema de asignación mediante la técnica de transporte puede ser muy frustrante.

El problema de asignación consiste en encontrar la asignación más eficiente de recursos disponibles, como materia prima, mano de obra y máquinas, con el objetivo de minimizar costos, tiempos de ejecución o maximizar utilidades. Este problema puede abordarse mediante la programación lineal entera, donde se busca asignar un trabajo a cada persona de manera óptima. Sin embargo, debido a la naturaleza del problema, la enumeración de todas las posibilidades se vuelve impráctica, por lo que se plantea una formulación alternativa utilizando variables binarias. Se establecen restricciones para garantizar la asignación única de cada trabajo y cada persona, y se busca minimizar el costo total de asignación. Este problema se relaciona con la programación job-shop, que será abordada en el siguiente punto.

2.10. Programación Job-Shop

Para la planificación de la producción se debe tener en consideración los diferentes componentes que tienen como fin convertir insumos en productos, por lo cual existe la clasificación de procesos productivos que permiten ordenar el análisis que se debe llevar a cabo según la característica del proceso y las prioridades que tenga la empresa. Una de las clasificaciones corresponde a los procesos productivos tipo taller o también conocidos como Job-Shop.

De acuerdo con Gómez (2019) los problemas de programación tipo job shop es un problema clásico que trata de modelar de forma genérica aquellas situaciones en las que hay que planificar la ejecución de una serie de operaciones sobre un conjunto finito de recursos, a continuación, se muestra una forma de representar de forma esquemática un proceso tipo taller con rutas alternativas.

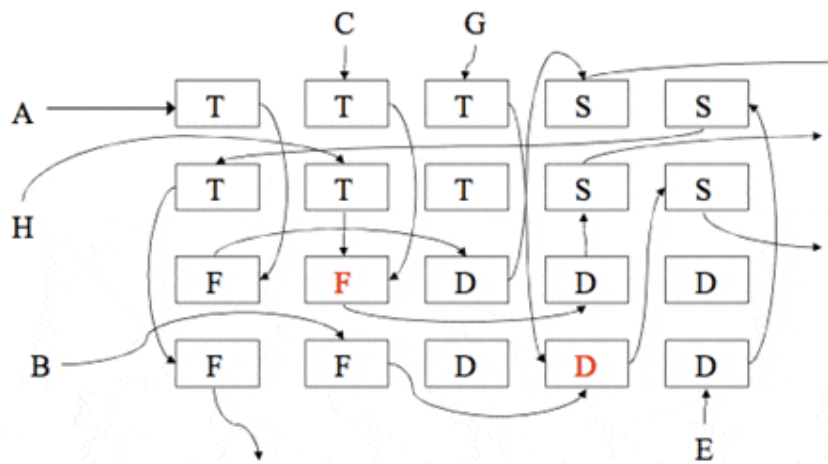


Figura 1: Esquema de un proceso de producción tipo taller. (Fuente: Operaciones (2016)).

Lo que caracteriza a este tipo de programación es su alta flexibilidad de la producción, permitiéndole adaptarse a las distintas necesidades de los clientes, por lo mismo este tipo de empresa trabaja con volúmenes bajos dado que se enfrenta a requerimientos heterogéneos y por tanto no trabajan con inventarios a diferencia de un proceso tipo Flow Shop. La forma en la cual se genera una orden de producción es cada vez que un cliente realiza un pedido, es decir es tipo Make to Order, en donde los productos solicitados se procesan cuando se ha planteado el requerimiento según lo solicitado por el cliente, de esta forma se ofrece un producto personalizado.

Ahora en cuanto a las maquinarias necesarias para los procesos estas usualmente tienen propósitos generales, es decir que se puede utilizar para la realización de diferentes trabajos, como por ejemplo soldadoras, tornos, fresadoras, entre otros. En cuanto a las capacidades que deben tener los trabajadores estas deben estar ampliamente capacitados, de modo que puedan abordar las distintas necesidades de la producción.

En cuanto a los costos asociados a este tipo de producción son altos, debido al alto precio de los insumos necesarios para la producción, esto viene dado a que no se aprovechan los descuentos generados por las compras al por mayor y por tanto el costo del inventario de un producto en proceso (WIP) también es elevado en relación al producto final. Finalmente, la programación de la producción de un proceso tipo Job-Shop es bastante complejo dada la cantidad de combinaciones posibles que pueden existir para la realización de los productos solicitados, lo que hace que el problema sea del tipo NP-Hard.

Para la resolución de los problemas de optimización, tanto para la producción, como de cualquier otro tipo, existe una gran variedad de herramientas disponibles para ejecutar el modelo propuesto y obtener algún resultado, algunos de estos programas se pueden encontrar AMPL, Python, Solver de Excel, Matlab entre otras.

2.11. Python

Python (Foundation, 2023) es un lenguaje de programación potente y fácil de aprender, este trabaja con estructura de datos de alto nivel y con un sistema de programación orientado a objetos. Este es conocido por su sintaxis clara y legible, lo que hace fácil de aprender y utilizar para principiantes y desarrolladores experimentados por igual, además corresponde a un código abierto, por lo que su código fuente está disponible al público.

Python cuenta con una amplia biblioteca y paquetes de terceros que se pueden ir instalando a medida que se vayan requiriendo, lo que facilita la implementación de funciones avanzadas, esto lo hace bastante versátil, por lo que puede ser utilizado en una amplia variedad de áreas, como el desarrollo web, análisis de datos, inteligencia artificial, aprendizaje automático, desarrollo de juegos, automatización, entre otros. Por esto es por lo que, es fuertemente utilizado para la optimización de modelos matemáticos, ya que cuenta además con diferentes solvers de optimización los cuales depende según la naturaleza del modelo que se desea trabajar, es por lo mencionado que Python corresponde a un programa que está siendo fuertemente utilizado en distintas industrias.

Capítulo 3

A continuación, se presentará la metodología seguida para la obtención de los datos necesarios para la realización del diagnóstico a la empresa MAF, el cual estará enfocado en el área de producción. En base a la información obtenida se presentarán los principales productos que la empresa ofrece con sus respectivos procesos, maquinarias e insumos necesarios para su producción, con esto se busca conocer el actual funcionamiento de la empresa e identificar los puntos críticos de su producción.

3.1 Metodología

En primer lugar, es menester mencionar que en el presente trabajo corresponde a la evaluación del proceso que se lleva a cabo en la producción de polines de la empresa MAF, con el objetivo de realizar un diagnóstico y proponer un modelo de optimización de la producción. Para llevar a cabo el diagnóstico de la empresa primero se recopiló la información sobre los procesos que se llevan a cabo para la producción de sus productos, además de conocer cuáles son los principales artículos que se fabrican en la empresa, para esto la metodología que se utilizó para la recopilación de la información fue principalmente cualitativa, es decir se basó en entrevistas a los operadores y encargados del área de producción y operaciones.

Como alcance para este trabajo, se busca proponer un modelo de optimización de la producción de los polines con sus respectivas partes, siendo estas el rodillo y las estaciones, dejando de lado cualquier otro producto que estos puedan llegar a fabricar, esto debido a que más del 90% de la producción de la empresa se basa en estos productos, por lo que el principal enfoque es en los polines. Ahora en cuanto a los datos necesarios para el diagnóstico de la empresa se plantea a continuación la lógica de la investigación a desarrollar:

Lo primero será la recolección de los datos de las órdenes de compra que se desean programar, estas corresponden a ordenes realizadas a inicios y mediados del año 2022, las cuales se ordenan y separan según el tipo de producto que se esté requiriendo, ya sea un rodillo, estación o polín, si el tipo de orden corresponde a un polín este se desagregará en sus componentes principales (estación y rodillo).

Una vez obtenidos los datos de las órdenes de compra se procede a la realización de las “recetas”, es decir se realiza una lista con los insumos necesarios para cada uno de los pedidos realizados, para así ir determinando las componentes principales de cada uno de los productos. A la par de la obtención de las recetas, se fue recopilando e la información de los diferentes procesos que se deben llevar a cabo en la producción, para esto se estimaron los tiempos cada proceso y las características de las máquinas. En base a lo anterior se realizó un diagrama de cada uno de los procesos de producción, es decir un diagrama para las estaciones y una para los rodillos, con esto se busca identificar la ruta crítica de cada uno.

Con los datos obtenidos se lleva a cabo la programación de la producción de forma manual a través de Excel para analizar su comportamiento e identificar posibles restricciones del modelo, a fin de distinguir que tipo de algoritmos se deberá de implementar. Con los datos obtenidos a través de la información recopilada de los procesos se plantea un modelo de optimización que se adecúe a la naturaleza del problema identificado, para finalmente programar el modelo en Python aplicando Pyomo.

A continuación, se presenta un diagrama con las temáticas que se desarrollarán en el presente trabajo:

Marco Teórico

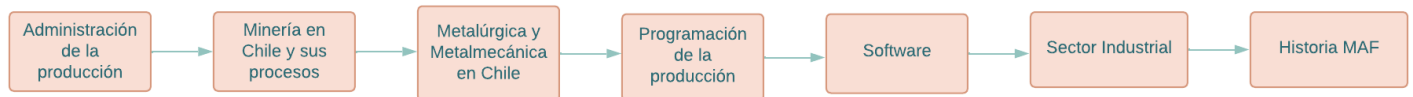


Figura 2: Temas a tratar en el marco teórico. (Fuente: Elaboración propia.)

En cuanto al desarrollo propiamente tal para el planteamiento del modelo, se divide el proceso en dos grandes grupos, primero el Diagnóstico y luego la Propuesta. En el Diagnóstico se presentan los pasos a seguir para determinar finalmente los productos con los que se trabajarán, sus procesos y los datos que serán necesarios considerar en el modelo. Ahora en la Propuesta se ilustran los pasos a seguir para definir finalmente el modelo de optimización y analizar sus resultados finales.

Caso de Estudio

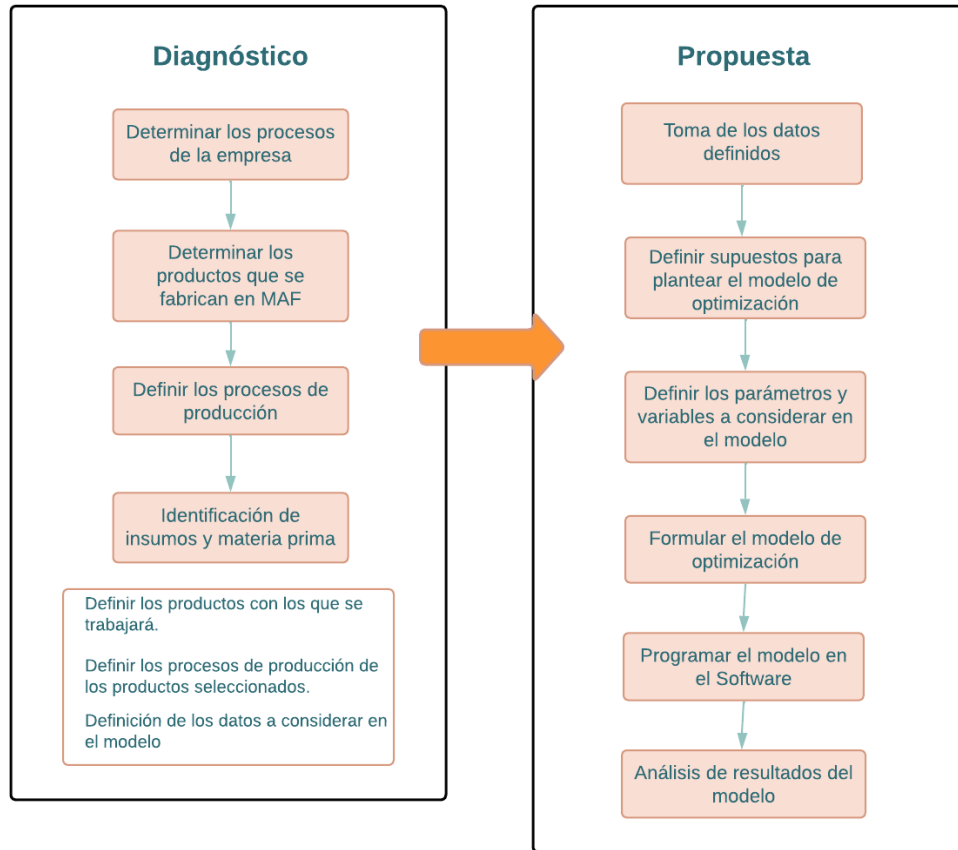


Figura 3: Temas a tratar dentro de los capítulos que se desarrollarán a continuación. (Fuente: Elaboración propia.)

3.2 Empresa en estudio

Antes de comenzar con el diagnóstico, se presentará la empresa MAF. Maschinenfabrik (MAF) es una destacada empresa chilena en la industria manufacturera, reconocida por su larga trayectoria y experiencia. Fundada en el siglo XX, MAF se ha convertido en un proveedor líder de equipos y maquinaria industrial en Chile y Sudamérica. Iniciada por un grupo de ingenieros y técnicos alemanes, la empresa estableció una alianza chileno-alemán bajo la licencia de fabricación FAM, reconocida a nivel mundial. A lo largo del tiempo, MAF ha expandido sus operaciones, atendiendo a diversas industrias como la minería, la agricultura y la construcción. En la actualidad, se enfocan principalmente en la fabricación de componentes para correas transportadoras en la industria minera, con instalaciones en Santiago y Antofagasta. Sus productos y servicios son utilizados por importantes empresas mineras como BHP, Codelco y Antofagasta Minerals, incluyendo Zaldívar, Centinela, Antucoya y Los Pelambres.

Esta empresa se constituye principalmente por 6 áreas, las cuales corresponden a recursos humanos, finanzas, operaciones, comercial, ingeniería y producción. A continuación, se presenta el organigrama de la organización.

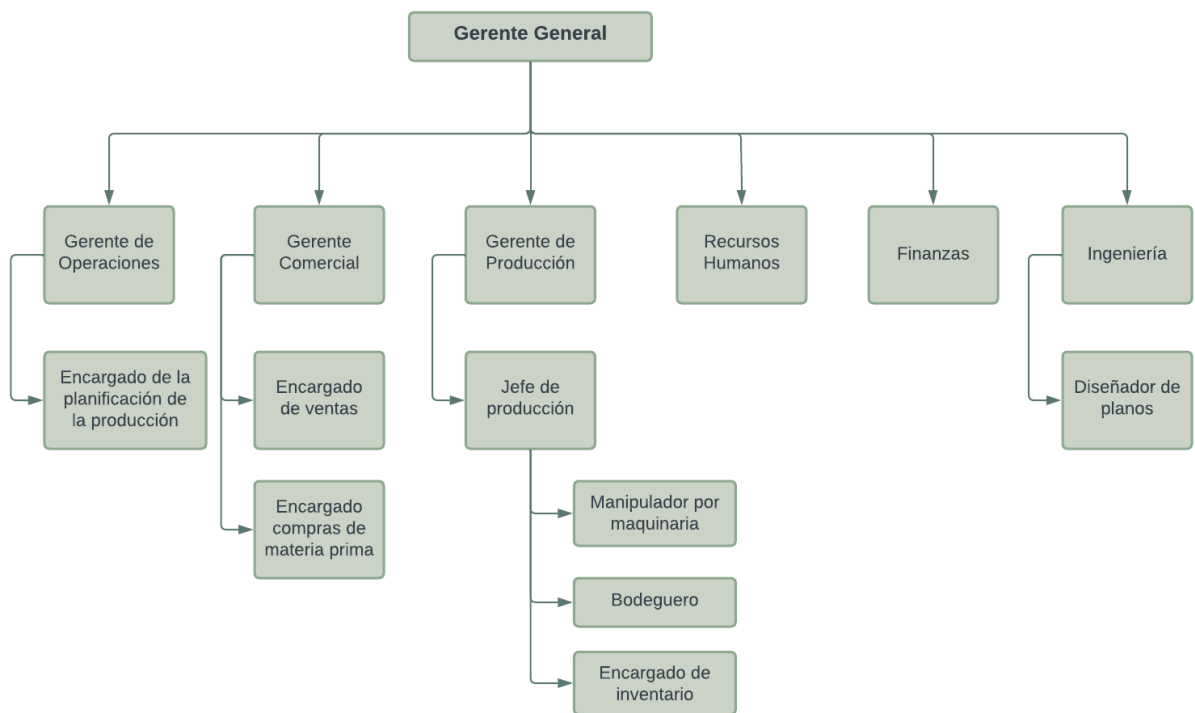


Figura 4: Organigrama de la empresa MAF. (Fuente: Elaboración propia.)

Para comprender mejor el diagrama, se describirá el diagrama a continuación:

- 1) **Gerente de Operaciones:** Responsable de supervisar y coordinar todas las actividades operativas de la empresa. Esto implica gestionar los recursos, optimizar procesos, y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad. Trabaja en conjunto a las otras áreas, con el objetivo de asegurar la eficiencia.
- 2) **Gerente Comercial:** Es el encargado de liderar y desarrollar estrategias comerciales, con la meta de maximizar las ventas y el crecimiento de la empresa. Dentro de sus actividades se incluye identificar oportunidades de mercado, establecer relaciones con los clientes, negociar contratos y supervisar al encargado de ventas.
- 3) **Gerente de Producción:** Se encarga de supervisar y dirigir todas las actividades relacionadas con la producción en la empresa. Sus actividades implican planificar y programar la producción, además de la gestión de la cadena de suministro, control de calidad y

optimización de los procesos de fabricación.

- 4) **Recursos Humanos:** Encargado de gestionar y desarrollar el talento humano de la empresa, lo cual incluye la contratación y selección de personal, el desarrollo y la capacitación de los empleados, la gestión de la compensación y beneficios, la administración de las relaciones laborales y la promoción de un buen clima laboral.
- 5) **Finanzas:** Gestiona las actividades financieras de la empresa, lo cual incluye la elaboración y seguimiento del presupuesto, la gestión de la contabilidad y los estados financieros, análisis de costos y rentabilidad, la administración de los flujos de efectivo y finalmente la planificación financiera a largo plazo.
- 6) **Ingeniería:** Se encargan principalmente del desarrollo y mejora de los productos de la empresa. Esto implica tanto la investigación como el desarrollo de nuevas tecnologías, el diseño y la ingeniería de productos, considerando la mejora continua de los procesos de fabricación y la implementación de soluciones técnicas.

Para adentrarse más en lo que sería el diagnóstico y posterior propuesta de mejora, fue importante presentar a grandes rasgos a la empresa en estudio, ahora a continuación en el Capítulo 4 se presentaran los procesos que se llevan a cabo en la empresa con su respectivo diagrama de proceso y explicación.

Capítulo 4

La producción en una empresa metalúrgica es una actividad que involucra la transformación de materia prima, principalmente metales en productos requeridos por el mercado en el que se desenvuelve la empresa. Esta área se enfoca en la fabricación de una amplia variedad de productos, puesto que su funcionamiento es tipo taller, por lo que la producción en esta empresa requiere de un equipo capacitado en el manejo de maquinarias y herramientas especializadas. Por lo anteriormente mencionado es que en este capítulo se describirán los productos que fabrica la empresa, los procesos que se llevan a cabo y las herramientas necesarias para su elaboración.

4.1 Proceso general

La empresa MAF opera bajo un sistema de producción denominado “Make to order”, esto implica que no se trabaja con inventario de producto terminado, dado que se va produciendo a medida que van llegando las órdenes de producción. El proceso inicia cuando el área de ventas es contactada por un cliente, esto ya sea a través de llamada, correo o de manera presencial, una vez generado el contacto se busca generar el enlace con el área de ingeniería la cual está encargada de realizar los planos de la orden de compra (OC). Para la generación de los planos de la OC se realizan visitas a terreno para recopilar la información necesaria para tener en consideración a la hora de generar los planos del producto solicitado por el cliente, es importante destacar que un cliente puede querer más de un producto, es decir, puede solicitar un polín y un rodillo diferente, por lo que se generan planos diferentes, los cuales son identificados por la posición (POS), por ejemplo, el polín puede ser la OC número 2273 y la POS número 10, mientras que el rodillo corresponde a la OC 2273 y a la POS 20.

Una vez el plano de la orden de compra es aceptado, el área de ventas genera la cotización, y luego entrega el visto bueno para su fabricación, en donde los planos OC se transforman a planos de la orden de producción (OP) en donde el jefe del área de producción realiza las acotaciones necesarias para luego entregar los planos a producción e iniciar con su fabricación. Ahora en cuanto al proceso de fabricación el orden no es necesariamente tipo FIFO (First in First out), en la empresa no tienen un criterio definido para la determinación del orden de fabricación, principalmente es en base a la urgencia percibida del cliente, según lo solicitado por el gerente o según lo indicado por el área de operaciones, por lo que este es uno de los factores que participan en los atrasos con las entregas de los pedidos.

El área de operaciones una vez que es aceptada la propuesta de los planos OC realiza una propuesta de planificación de la producción para 3 semanas con los pedidos existentes hasta el momento, esto en base a la materia prima disponible y la que llegará en el futuro, cabe destacar que debido a que la empresa no es de gran envergadura en comparación con la competencia, sus pedidos no son la prioridad

de sus proveedores, por lo que es común que llegue menor cantidad de los materiales solicitados, por lo que muchas veces para la realización de un pedido se deben utilizar los materiales que estaban destinados para la fabricación de otros, este es otro factor que aporta en los atrasos en las entregas.

Una vez se decide que OP y POS fabricar, estas se llevan a cabo y una vez estas se encuentran listas el área de producción determina su fecha de despacho según la disponibilidad de la empresa que ha sido contratada para la realización del despacho, la cual puede realizar despachos todos los días, por lo que el limitante principal es el espacio disponible en el transporte. A continuación, se muestra un bosquejo del proceso anteriormente mencionado.

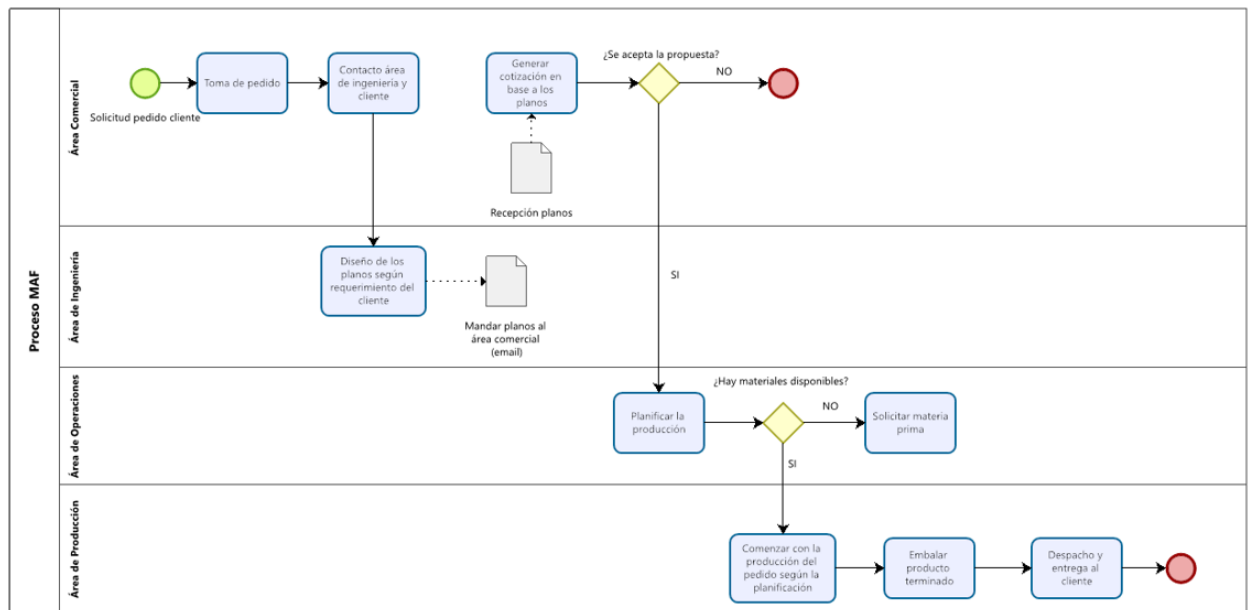


Figura 5: Diagrama de flujo del sistema productivo de MAF. (Fuente: Elaboración propia.)

4.2 Área de Producción

En el área de producción se preocupan de la fabricación de los productos solicitados por el área de ingeniería, además de la mantención de las maquinarias y actualización del inventario de materia prima y de los trabajos en proceso. La planta consta de 17 máquinas totales utilizadas para la fabricación de sus diferentes productos, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Máquina	Cantidad	Cantidad de trabajadores por estación
Corte Sierra Cinta	3	3
Corte por Plasma	1	1
Torno CNC	3	2
Prensa Vertical	1	1
Prensa Horizontal	2	1

Prensa Plegadora	1	1
Fresadora	1	1
Soldadura	2	2
Taladro Radial	1	1
Macho	1	1
Pintura Electroestática	1	1
Horno	1	1
Pintura cabezal	2	2
Granallado	1	Proceso tercerizado
TOTAL	21	16

Tabla 3: Máquinas utilizadas en la empresa MAF, con la cantidad de trabajadores necesarios para su operación. (Fuente: Elaboración propia).

Cabe destacar que una estación de trabajo corresponde al conjunto de las mismas máquinas, es decir, las tres máquinas de corte sierra cinta equivalen a una estación, por otro lado, el proceso de granallado es un proceso que se terceriza, aun así existe un tiempo de “procesamiento” el cual corresponde al tiempo en que se envían las piezas a granallar, por lo que se debe considerar para este proceso la cantidad de estaciones y rodillos que se pueden enviar para su procesamiento como la capacidad.

Es importante considerar que estas máquinas no se encuentran en constante funcionamiento, dependen de la planificación entregada, por ejemplo, existen ocasiones en las que 2 tornos están siendo utilizados para la fabricación de una pieza en particular como por ejemplo el cabezal, mientras que el tercero es utilizado para la fabricación de otra pieza como lo puede ser el eje de un rodillo en particular, por otro lado, en el caso del corte sierra cinta debido a la cantidad de trabajadores disponibles en la planta por lo general está funcionando solo una.

Ahora en cuanto a la disponibilidad de personal, se tienen las siguientes condiciones de operación:

	Lunes a jueves	Viernes	Sábado	Turno noche lunes a jueves
Diaria [hr/turno]	9.5	7	4	11
Semanal [días/semana]	4	1	1	4
Mensual [semana/mes]	4	4	4	4
Turnos	1	1	1	1

Tabla 4: Turnos de trabajo en la empresa MAF para el área de producción. (Fuente: Elaboración propia.)

Cabe señalar que los horarios de trabajo de lunes a jueves que se muestran en la tabla 4 se les deben

descontar el horario de colación el cual corresponde a media hora diaria, esto también se aplica a los turnos de noche, finalmente, se tiene la siguiente disponibilidad de horas de trabajo:

Día	Horas disponibles
LUNES	19.5
MARTES	19.5
MIÉRCOLES	19.5
JUEVES	19.5
VIERNES	6.5
SÁBADO	4
DOMINGO	0
Total horas semanales	88.5

Tabla 5: Cantidad de horas en que trabajan los colaboradores descontando el horario de colación.
(Fuente: Elaboración propia.)

Según la información presentada en la tabla 5 la cantidad de horas que se tendrían disponibles para la producción de un producto, considerando como supuesto en el que apenas inicia el turno los colaboradores ya se encuentran listos para iniciar con la producción, siendo esto un total de 88.5 horas. Es importante destacar que esta cantidad de horas disponibles no es decusatamente igual a la cantidad de horas que se pueden utilizar para la producción. La utilización efectiva de estas horas depende de varios factores, como lo son la velocidad de las máquinas, la eficiencia de los trabajadores, los tiempos en los que se deben realizar cambios de herramientas y de programación en los casos del torno CNC o la máquina de corte por plasma, también se deberían considerar los tiempos de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo en caso de existir, entre otros factores que puedan afectar la eficiencia de la producción.

Una vez conocidas las condiciones en las que se encuentra la empresa, considerando aquí el tiempo disponible para la producción y la cantidad de máquinas a disposición para ser utilizadas, es importante conocer los procesos que se llevan a cabo en la planta de producción, los cuales se describen a continuación:

Proceso de corte: Para el proceso de corte, esto ya sea para las estaciones o los rodillos se debe primeramente preparar el material, es decir, seleccionar el material a utilizar y generar el molde, el cual es generado a través de un programa digital y es cargado a la máquina correspondiente, una vez obtenida la pieza terminada se debe asegurar que esta cumpla con las dimensiones requeridas. En este proceso se cuentan principalmente con dos tipos de máquinas, las cuales corresponden al corte por plasma y corte sierra cinta, donde la primera se encarga de los cortes asociados a las estaciones, es decir, realiza cortes para los distintos soportes y refuerzos, mientras que el corte sierra cinta se encarga

primeramente de los cortes asociados a los mantos y ejes de los rodillos y perfiles de las estaciones.

Cabe destacar que los procesos de corte varían según el tipo de material que se esté utilizando y su grosor; dado que el tipo de funcionamiento de la empresa es tipo taller, no todos los procesos tomarán el mismo periodo de tiempo en su proceso de corte.

Proceso de torneado: El proceso de torneado se utiliza para el mecanizado de los cabezales y los ejes de los rodillos. Para la realización de este proceso primeramente se debe seleccionar el material que se utilizará, además de programar la máquina según las medidas requeridas según la OP, debido a que la máquina utilizada corresponde a un torno CNC. Para este proceso se cuenta con 3 máquinas como se mencionó anteriormente donde generalmente dos son utilizadas para el mecanizado de los cabezales y una para los ejes, esto debido al tiempo que toma este proceso.

Proceso de fresado: La máquina fresadora está diseñada para realizar trabajos de mecanizado por arranque de viruta mediante el movimiento rotativo de varios filos de corte, este proceso es principalmente para la realización de los ajustes de los ejes de los rodillos para que estos calcen en los espacios determinados.

Proceso de taladrado radial y aplicación del Macho: Para iniciar estos procesos se debe contar con las placas cortadas previamente con las dimensiones solicitadas, para que posteriormente se proceda al taladrarlas y generar orificios que permitan el posterior ensamble. Para esto el taladro posee una herramienta de corte en forma de broca que gira y se utiliza para hacer el agujero, esta herramienta se debe ajustar tanto en altura como en el ángulo, además de seleccionar el diámetro y la profundidad del agujero. Una vez obtenido el orificio se debe aplicar el macho para la generación de la rosca, esto para poder ensamblar las piezas a través de un tornillo, para lo cual se debe seleccionar el macho de las dimensiones adecuadas para que el tornillo que se deba introducir calce perfectamente.

Proceso de Plegado: Una vez cortadas las piezas de los soportes con sus respectivos orificios, se procede a los que es el plegado. Para este proceso es importante tener en consideración que las placas metálicas no pueden ser plegadas en cualquier dirección, estas deben ser a favor de las fibras del metal, para que así cuando este sea doblado el material no se quiebre, así el tipo de plegado corresponde a una deformación plástica. Ahora el proceso que se lleva a cabo inicia con la programación de la máquina, determinando la presión que se deberá de aplicar según el material con el que se esté trabajando, además se deberá contar con el molde que se desea que tome la pieza, para finalizar con un control de calidad, es decir, se aseguran de que las piezas cumplan con las especificaciones requeridas en ángulos, calidad del borde de plegado y la uniformidad de la pieza.

Proceso de soldado: El tipo de soldadura que utilizan corresponde a una soldadura por arco, este proceso se lleva a cabo una vez estén finalizadas todas las piezas necesarias, es preciso señalar que este proceso se le aplica principalmente a las estaciones, en la unión de los soportes con los perfiles. Para esta ejecución se divide el proceso en tres partes, la primera consta de hacer el molde del ensamble, es decir se cuenta con una estructura metálica en la cual se afirman las piezas según las distancias y ángulos que se requieran, para posteriormente realizar los “pinchazos”, en otras palabras, es marcar puntos con la soldadura para fijar las piezas y ver si están bien posicionadas, caso contrario se le realizan correcciones; una vez determinada las posiciones exactas de las piezas se procese a soldar las piezas.

Proceso de ensamble: Para iniciar este proceso se debe contar con las piezas terminadas de los rodillos, como lo son el cabezal, el manto y el eje, agregando lo que son los seguros. El ensamble de un rodillo a diferencia de las estaciones funciona a presión, por lo que se cuenta con una prensa vertical y horizontal. Estas máquinas deben ser ajustadas según el tamaño del rodillo para su correcto ensamble, cabe señalar que existen ciertos rodillos que cuentan con anillos de goma en su exterior, por lo que estos también deben ser ensamblados a presión.

Proceso de granallado: El proceso de granallado se le aplica solamente a las estaciones y a los rodillos que no cuenten con anillos de goma en el exterior. El granallado es ejecutado por una empresa externa, por lo que la principal actividad que debe realizar MAF es reunir las estructuras y enviarlas a través de un camión a la empresa de granallado. Ahora en cuanto al granallado se trata de una técnica de tratamiento de limpieza superficial por impacto, haciendo que el metal quede con porosidades y por ende queda expuesto a las condiciones del medio ambiente, este proceso permite una mejor adhesión de la pintura electroestática que se aplicará posteriormente, otorgando una mayor protección al metal. El proceso de granallado toma un total de 2 días, esto incluyendo el traslado de la planta al centro en el cual se realizará el proceso de granallado y luego de vuelta a la planta, además cabe destacar que una vez llegan las piezas de vuelta a la planta estas tienen un máximo de 2 días para ser pintadas, ya que, el metal se encuentra expuesto y por tanto es más propenso a sufrir daños.

Proceso de pintura: Las piezas que se ven involucradas en el proceso de pintado son principalmente las estaciones y los rodillos sin anillos de goma en su exterior, es importante señalar que el tipo de pintura que se aplica en estas piezas corresponde a pintura electroestática, la cual se adhiere a la superficie solo después de haber sido sometida a grandes temperaturas, por lo que antes de ese proceso se debe tener cuidado con las piezas recién pintadas, puesto que se puede salir la pintura. Por otro lado, se pintan también los cabezales de los rodillos antes de que realizar el ensamble, para

esto se utiliza una pintura para metales.

Proceso de horneado: El proceso de horneado es para las piezas que fueron pintadas con pintura electroestática, ya que este tipo de pintura solo se adhiere una vez se le aplica calor a la pieza, es importante destacar que del proceso de pintado al horneado no puede transcurrir más de un día, esto debido a la característica de la pintura empleada.

4.3. Productos

Como se ha mencionado anteriormente los productos que principalmente produce MAF son las Estaciones y Rodillos, si bien las órdenes son en nombre lo mismo, cada una de estas tiene características diferentes, pudiendo variar las medidas, como por ejemplo las del manto del rodillo, el largo de la estación, entre otras. Ahora además de las variaciones en tamaño, también existen variabilidades funcionales como por ejemplo en rodillos se pueden encontrar algunos que contengan anillos de goma, pudiendo estas ser de doble paso o simple y otros que no llevan anillos, por otro lado, las estaciones son más variadas, en estas se encuentran las de tipo Picking, Autocentrante, Estación de carga, Estación con retorno en V con cañería. y la Estación transición ajustable, son una de las más comunes, los productos mencionados se mostrarán a continuación para tener una mejor idea de los productos que fabrica la empresa MAF.

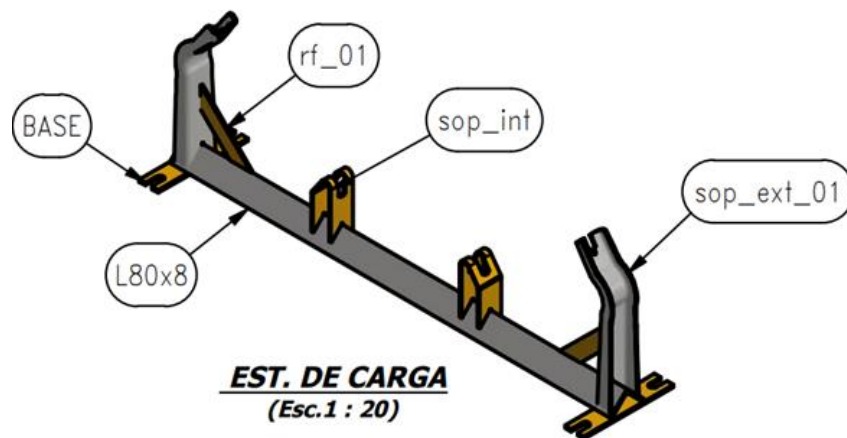


Figura 6: Estación de carga. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

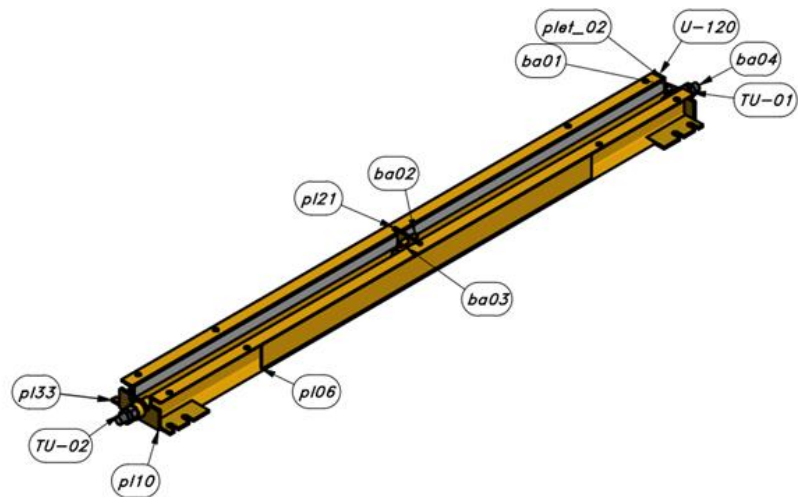


Figura 7: Estación Picking. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

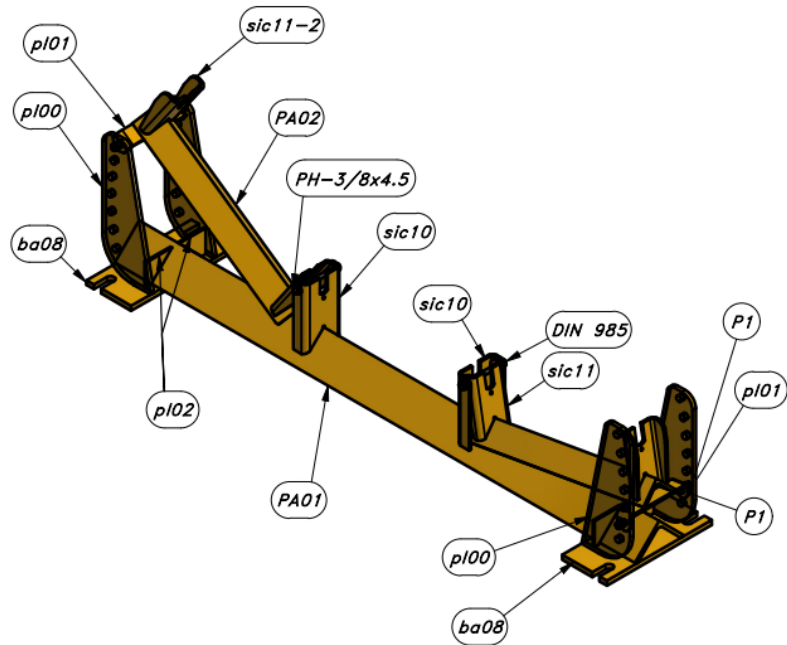


Figura 8: Estación transición ajustable. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

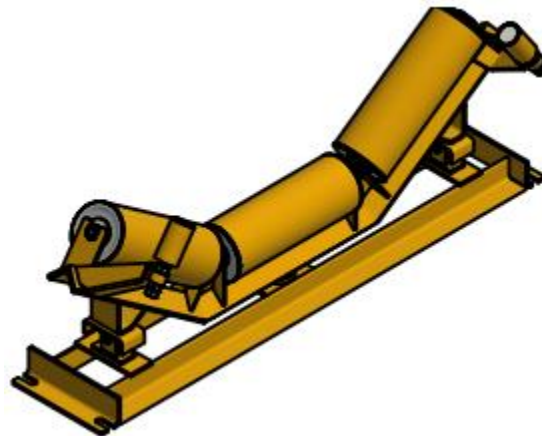


Figura 9: Estación Autocentrante. Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

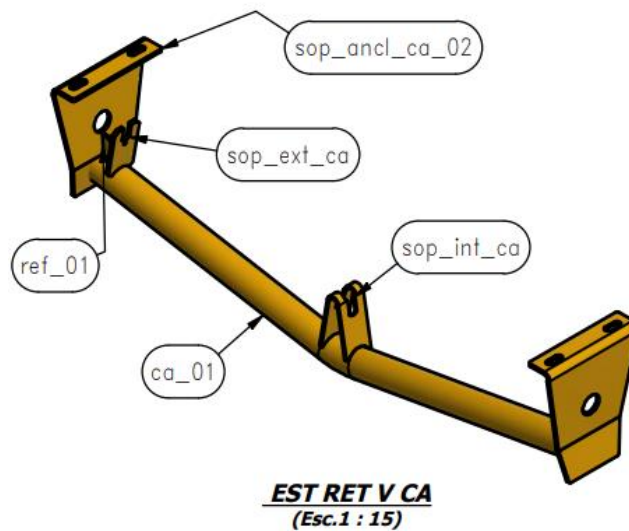


Figura 10: Estación con retorno en V con cañería. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

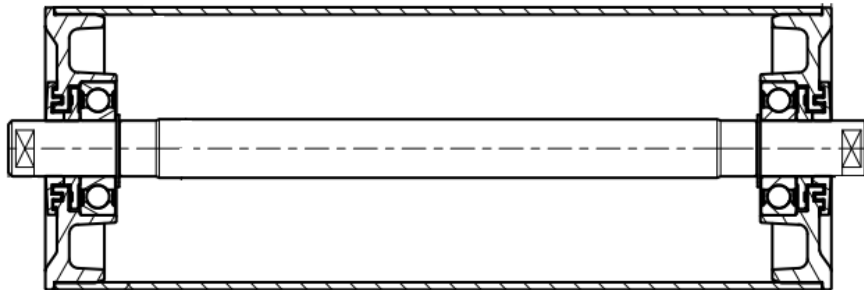


Figura 11: Rodillo pintado sin anillo de goma. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

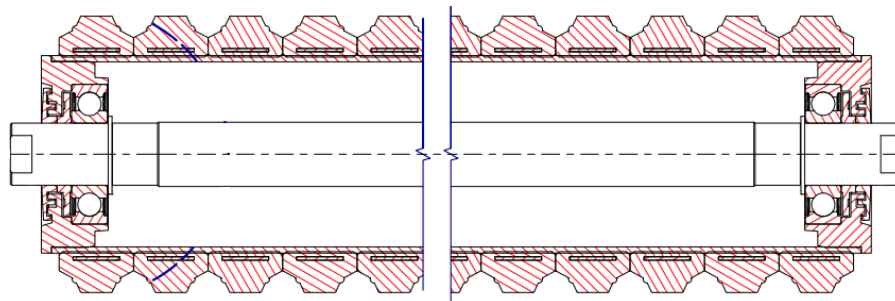


Figura 12: Rodillo con anillo de goma. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

Si bien la variedad de productos que ofrecen no es muy alta, la complejidad en su producción radica en las variaciones que estos mismos productos puedan presentar dependiendo de la OP que se esté produciendo, algunas de estas variaciones se pueden encontrar en las dimensiones, como, por ejemplo, el diámetro de los rodillos o la altura de las estaciones, por lo que la complejidad radica en los tiempos de producción, incluyendo los tiempos de preparación de las máquinas y el proceso mismo. Es por lo anterior que en el siguiente punto se presentará el proceso de producción de las estaciones y los rodillos con y sin anillos de goma de forma genérica.

4.4. Producción

El proceso de producción que se lleva a cabo tiene características de tipo taller, o también conocido como job-shop, es decir, debe enfrentar una mezcla diversificada de pedidos de relativamente bajo volumen y ser capaz de responder a cambios en el diseño del producto. Los tipos y calidad de los insumos pueden variar considerablemente, y la compañía tiene poco control sobre los proveedores Nahmias (2007).

4.3.1. Diagramas de los procesos de producción

Para comprender los diagramas que se presentarán a continuación, es importante conocer el significado de cada uno de los procesos que se presentan en el diagrama y que se llevan a cabo para la fabricación de los productos mencionados:

Corte por Plasma: Esta máquina utiliza un arco eléctrico para cortar metales conductores de electricidad, como el acero inoxidable, aluminio y el cobre. El proceso de corte se basa en la capacidad del gas ionizado a alta temperatura para derretir y expulsar el material de la pieza de trabajo.

Alguna de las ventajas que se adquieren a través de la utilización de este tipo de máquina es su velocidad de corte, lo cual implica una disminución en los tiempos de producción a diferencia de otro mecanismo de corte convencional, por otro lado, se encuentra su versatilidad en los tipos de materiales que esta máquina pueda cortar, así mismo es flexible, puesto que es fácil de usar en diversos entornos de trabajo.

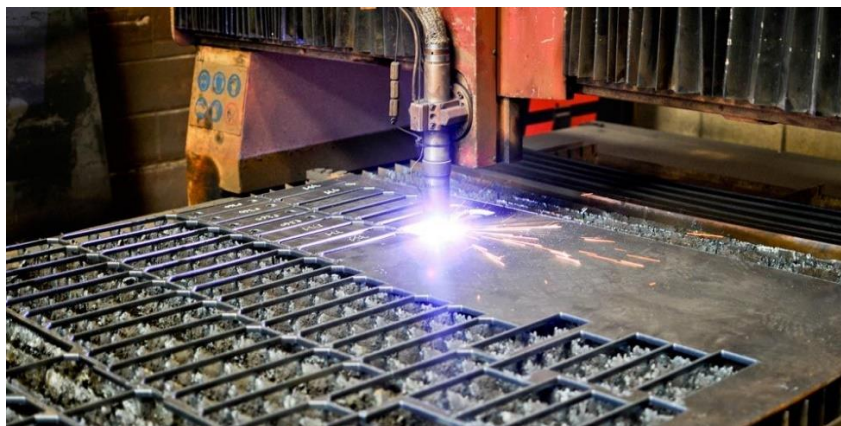


Figura 13: Imagen de referencia de la máquina Corte Plasma. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

Taladro Radial: Son máquinas que se utilizan para la perforación en piezas metálicas, donde su diseño permite que la herramienta de corte se pueda mover en diferentes direcciones, lo que las hace

muy útil para trabajar con piezas de diferentes formas y tamaños. Su principal utilización es el mecanizado de agujeros mediante sus mecanismos de arranque de virutas para las estaciones.



Figura 14: Foto del Taladro Radial de la empresa en estudio. (Fuente: Elaboración propia)

Macho: Esta es una herramienta de corte utilizada en la fabricación de roscas en piezas de metal, lo cual implica el uso de una herramienta de corte con dientes angulares que se enrosca en la pieza para crear una rosca en espiral.

Prensa Plegadora: Esta es una máquina que se utiliza para la realización de los plegados y conformado de láminas y placas de metal. Para su funcionamiento se cuenta con una matriz inferior y una herramienta superior que se mueve hacia abajo para doblar la pieza. Esta es principalmente utilizada para el plegado de las partes y piezas de las estaciones, como por ejemplo los soportes exteriores.



Figura 15: Foto de la Prensa Plegadora de la empresa en estudio. (Fuente: Elaboración propia).

Soldadura: Proceso de fijación de las piezas para el ensamble, para este proceso se utiliza un material de aporte (metal), el cual se funde formando un charco de metal entre las piezas que se desean soldar, la cual al enfriarse se genera una unión fija denominada cordón. Este proceso se aplica principalmente para el ensamble de las estaciones.

Granallar: Método que se utiliza para pulir las piezas de metal, permitiendo una mejor adherencia de la pintura electrostática y una mejor calidad en la protección del metal. Este proceso se le aplica a todas las piezas que van pintadas posteriormente con la pintura electrostática, es decir, se aplica para las estaciones y los mantos de los rodillos.

Pintura electrostática: Es un tipo de recubrimiento que se aplica como un fluido de polvo seco, que suele ser utilizado para crear un acabado duro que es más resistente que la pintura convencional. Esta se aplica en los mantos de los rodillos y en las estaciones una vez estas estén soldadas.

Horno: Dado que el tipo de pintura que se utiliza para las estaciones y rodillos corresponde a una pintura electrostática, el proceso de pintado se fija solo al aplicar calor directamente sobre la pieza, por lo que estas son ingresadas a un horno para asegurar la fijación de la pintura.

Corte Sierra: Es una máquina que corta por medio de unas cuchillas de metal que giran a gran velocidad gracias al motor que posee. Esta máquina se utiliza en la empresa para el corte de los mantos, ejes de los rodillos y perfiles de las estaciones



Figura 16: Imagen de referencia de la máquina Corte Sierra Cinta que se encuentra en la empresa estudio. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

Trono CNC: Máquina del tipo torno que se utiliza para mecanizar piezas de revolución mediante un software de computadora. Es utilizada para el mecanizado de los cabezales y ejes, que corresponden a partes de un rodillo.



Figura 17: Imagen de referencia de la máquina Torno CNC que se encuentra en la empresa en estudio.
(Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

Fresado: Máquina diseñada para realizar trabajos de mecanizado por arranque de viruta, mediante el movimiento rotativo de varios filos de corte. Su función principal es para la realización de ajustes a los ejes de los rodillos.



Figura 18: Imagen de referencia de una Fresadora que se encuentra en la planta de producción de la empresa en estudio. (Fuente: Maschinenfabrik (2022).)

Prensa Vertical y Horizontal: Máquina del tipo compactadora que se utiliza para el ensamble de varias piezas, como los seguros, cabezales, anillos de goma, entre otros; esta puede ser tanto de forma Horizontal como Vertical.



Figura 19: Foto de la Prensa Horizontal de la empresa en estudio. (Fuente: Elaboración propia).

Pintura Cabezal: Una vez los cabezales han sido mecanizados estos se proceden a pintar con una pintura especial para metal, procurando así prolongar su vida útil.

Una vez ya conocidas las máquinas y los procesos que se llevan a cabo en la planta de producción, se mostrará a continuación la secuencia de procesos que se deberán de realizar para la fabricación tanto de las estaciones como los rodillos.

Para la producción de una estación se pueden identificar dos grandes grupos, se tiene el grupo del tratamiento de las placas para ser transformadas en los soportes y refuerzos, y por otro lado se tiene el proceso de los perfiles, donde este último solo cuenta con un proceso de corte con sierra. El mayor tiempo de procesamiento de las estaciones viene dado principalmente por el camino de tratamiento de las placas, para la generación de soportes, refuerzos, entre otros, por lo que la ruta crítica de las estaciones corresponde al corte por plasma, taladro radial, macho, prensa plegadora, soldadura, granallado, pintura electrostática y el proceso de horneado, esto se puede visualizar en la Figura 9 que se muestra a continuación.

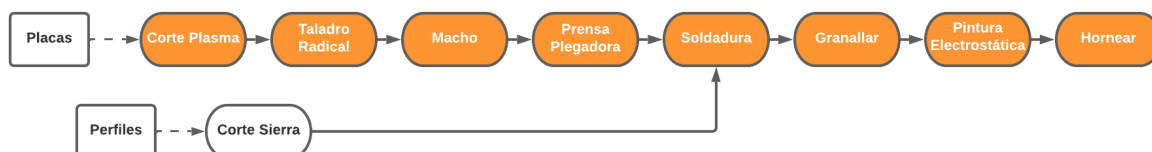


Figura 20: Diagrama del proceso de producción de una estación, en naranja se muestra la ruta crítica, mientras que las cajas muestran la materia prima. (Fuente: Elaboración propia).

Por otro lado, el proceso de producción de un rodillo sin anillo de goma se divide en 3 grandes procesos, uno consta en la elaboración de los mantos, estos contienen como materia prima tubos de diferentes diámetros, luego se tiene el proceso para el eje teniendo como materia prima barras de acero, finalmente se tienen los cabezales, donde su materia prima son los mismos cabezales, pero sin terminar, es decir, se deben

mecanizar, el cual es un proceso en que se ajusta los diámetros de la pieza según los requerimientos; ya en la prensa vertical se instalan los sellos interiores y rodamientos que van al interior de los cabezales, para finalmente proceder al ensamble, el cual se lleva a cabo en la prensa horizontal agregando además del manto, eje y cabezal los sellos exteriores y seguros seeger. La ruta crítica corresponde a los procesos de corte sierra, granallado, pintura manto, hornear y prensa horizontal, esto debido principalmente por el proceso de granallado, puesto que es el proceso que mayor tiempo lleva, correspondiendo a 2 días de proceso, este proceso se puede visualizar en la Figura 10 que se muestra a continuación.

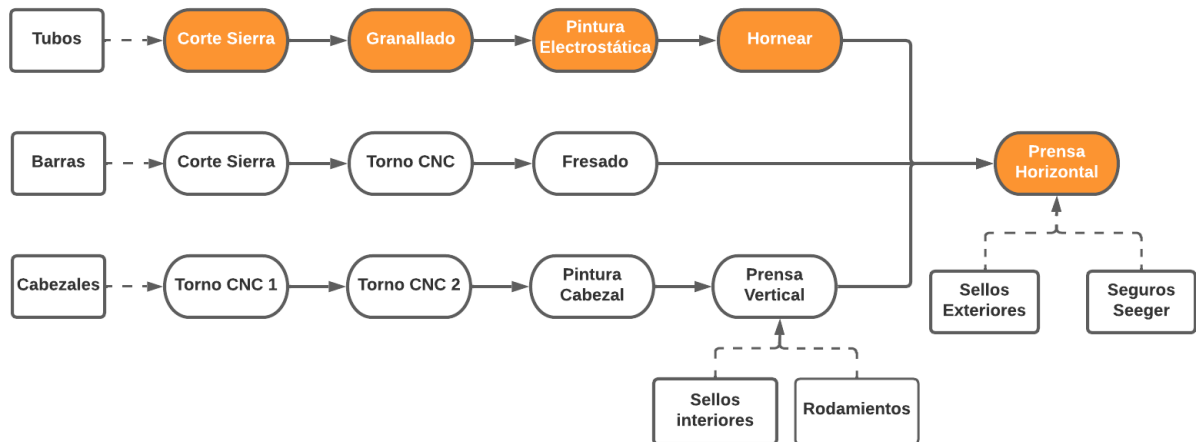


Figura 21: Diagrama del proceso de producción de un rodillo sin anillo de goma, en naranja se muestra la ruta crítica, mientras que las cajas muestran la materia prima. (Fuente: Elaboración propia)

El proceso de producción de los Rodillos con anillo de goma al igual que el proceso del rodillo sin anillo de goma, este se divide en 3 procesos, donde uno corresponde al proceso de los tubos para ser transformados en los mantos, luego las barras de acero para pasar a ser los ejes del rodillo y finalmente los cabezales que deben ser mecanizados según las especificaciones, al momento de llegar a la prensa vertical se le ingresa el sello interior y los rodamientos, para ya en el proceso final en la prensa horizontal realizar el ensamble agregando los sellos exteriores y seguros seeger. La ruta crítica de este proceso corresponde al corte sierra, torno CNC, fresado y prensa horizontal, es decir, el proceso para generar el eje del rodillo, donde el proceso que mayor tiempo toma corresponde al torno CNC, este proceso se presenta a continuación en la Figura 21

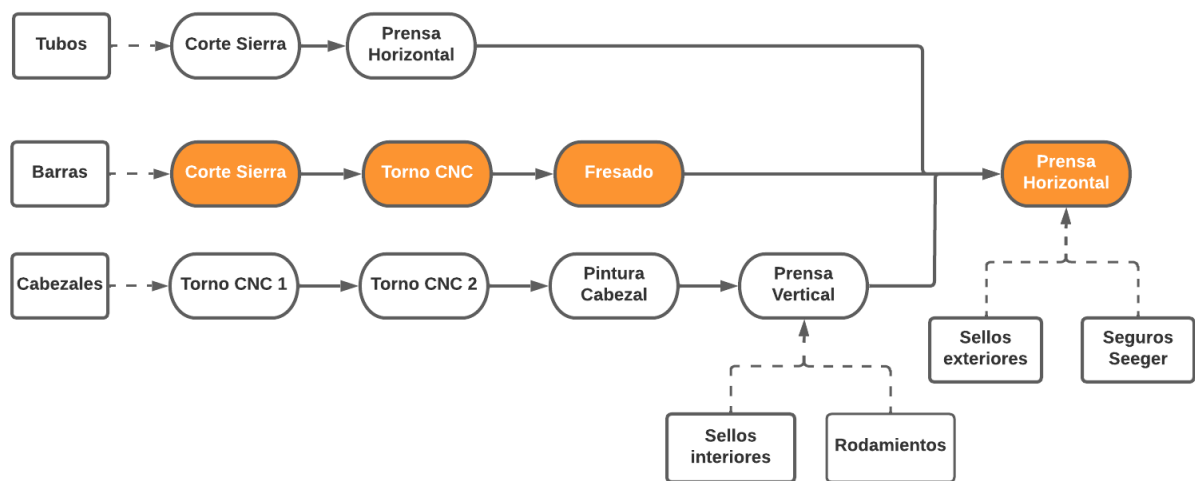


Figura 22: Diagrama del proceso de producción de un rodillo con anillo de goma, en naranja se muestra la ruta crítica, mientras que las cajas muestran la materia prima.
(Fuente: Elaboración propia).

4.5. Insumos y Materia Prima

Como bien se sabe, la planificación de la producción no es solo la determinación de las fechas de inicio y de término de la producción de cierto tipo de producto, esto incluye la planificación de la compra de los materiales necesarios para su elaboración, incluyendo la materia prima, la cual corresponde a los recursos naturales a partir de los cuales se obtienen los materiales que se emplean en la actividad técnica, también se puede definir como cualquier bien que se transforma a través de un proceso de producción con el propósito de obtener un bien de consumo. Por otro lado, los insumos son bienes, productos, y materias primas utilizadas para la creación de otro elemento, el cual corresponderá al producto final y por tanto es el que será vendido a los clientes.

En cuanto a la materia prima, lo que se necesita a grandes rasgos para la fabricación de una estación son:

- 1) **Placas de acero:** Corresponde al elemento que más se utilizan para la fabricación de una estación, ya que, cada una de las partes y piezas que se mostraron en las figuras de las estaciones son hechas de placas de acero, las cuales son plegadas por las prensas para generar la forma deseada para la estación, como lo son los soportes internos, externos y refuerzos de forma general, pudiendo estos mismos tener diferentes dimensiones y espesores. Ahora detalladamente cada una de las estaciones tiene partes diferentes, por ejemplo, en la estación de tipo autocentrante, se utilizan las placas además para la fabricación del sistema autocentrante y del soporte del rodillo guía.

- 2) **Pletina laminada:** Este material se utiliza también para la fabricación de algunos refuerzos, es parte de algunos perfiles de base y forma parte en la fabricación del rodillo centrador de la estación autocentrante.
- 3) **Perfiles:** Aquí se encuentran diferentes tipos de perfiles, según el requerimiento solicitado, algunos de estos corresponden a perfiles en ángulos, perfiles cuadrados, rectangulares y perfiles UPN, estos además pueden ser de diferentes medidas y grosores.
- 4) **Pintura electrostática:** Una vez ya terminada la estación, con sus partes y piezas en orden, se procede a pintar, este tipo de pintura entregando una mejor resistencia físico-química muy superior a las pinturas convencionales de metales.
- 5) **Autocentrante:** Ahora en cuanto al sistema autocentrante, el cual corresponde a la estación más compleja de fabricar debido al sistema autocentrante y el brazo centrador, se encuentran partes y piezas como rodamientos, tuercas, seguros seeger, barras y tubos.

La materia prima presentada en los puntos 1, 2, 3 y 4 se utilizan en todas las estaciones, mientras que como ya se mencionó anteriormente la estación autocentrante requiere de más materiales, los cuales se presentaron en el punto 5. Finalmente es importante contar también con los elementos utilizados para el ensamble de las piezas, acá se encuentran tuercas, pernos y golillas, pudiendo ser de diferentes medidas.

Por otro lado, la materia prima necesaria para la fabricación de los rodillos se clasifica en:

- 1) **Manto:** Esta sección corresponde al recubrimiento del eje, para su fabricación se cuenta con un tubo el cual varía su diámetro según los requerimientos, además se le pueden agregar anillos de goma de paso simple o de paso doble en el exterior.
- 2) **Eje:** Para la fabricación del eje se requiere de una barra de acero, la cual al igual que el manto esta puede variar de diámetro, según las características solicitadas.
- 3) **Tapa:** Esta pieza se encuentra en los extremos del manto para cerrarlo, el cual se constituye de un cabezal de un diámetro similar al del manto, ya que este debe encajar a presión en los extremos del manto sin soldadura.
- 4) **Sistema de giro:** Ahora para que gire el rodillo se debe contar con un rodamiento, el cual se instala a los extremos del eje, por otro lado, también se debe contar con diferentes sellos que impidan el paso de impurezas que provengan del exterior al interior de los rodillos provocando problemas al sistema, para esto se usan anillos seeger, sello laberinto y un sello interior en los extremos del eje,

al igual que los rodamientos.

Finalmente, en cuanto a los insumos, estos vienen principalmente dados según la máquina que se esté usando, a continuación, se presentarán los insumos necesarios que requiere según cada máquina:

- **Corte Sierra Cinta:** Una sierra de cinta es un tipo de sierra que utiliza una hoja larga y continua para cortar materiales. Para que una sierra de cinta funcione eficazmente, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:
 - 1) **Hojas de sierra de cinta:** El consumible más importante de una sierra de cinta es la propia hoja. Estas hojas están disponibles en distintos tamaños y materiales para adaptarse a diferentes aplicaciones de corte.
 - 2) **Lubricantes:** Las hojas de sierra de cinta generan una cantidad significativa de calor al cortar, lo que puede provocar su desgaste. Para reducir la fricción y proteger la hoja, debe utilizarse un lubricante adecuado durante el funcionamiento.
 - 3) **Refrigerantes:** Los refrigerantes se utilizan para disipar el calor de la hoja, ayudando a prolongar su vida útil y mejorar el rendimiento de corte.
 - 4) **Bloques guía:** Los bloques guía se utilizan para apoyar y guiar la cuchilla, asegurando un corte recto y preciso. Estos bloques pueden desgastarse con el tiempo y necesitan ser reemplazados.
 - 5) **Correas de transmisión:** Las correas de transmisión se utilizan para accionar la hoja de sierra de cinta, y pueden necesitar ser reemplazadas si se desgastan o dañan.
 - 6) **Muelles de tensión:** Los resortes de tensión se utilizan para mantener la hoja bajo tensión, asegurando que se mantenga apretada y en la alineación correcta durante el corte. Estos resortes pueden necesitar ser reemplazados si se desgastan o pierden su tensión.
 - 7) **Poleas de transmisión:** Las poleas motrices se utilizan para transferir la potencia del motor a la cuchilla, y puede ser necesario sustituirlas si se desgastan o dañan.
- **Corte por plasma:** Una máquina de corte por plasma es un tipo de máquina de corte que

utiliza un arco de plasma de alta temperatura para realizar cortes en materiales metálicos. Con el fin de operar una máquina de corte por plasma con eficacia, se necesitan varios consumibles, incluyendo:

- 1) **Consumibles de la antorcha de plasma:** La antorcha de plasma es la principal herramienta de corte en una máquina de corte por plasma, y requiere el reemplazo regular de sus consumibles, tales como puntas de electrodo, boquillas y anillos de remolino.
 - 2) **Copas de protección:** Las copas de protección protegen la antorcha de plasma de la oxidación y otros tipos de contaminación, y también ayudan a enfocar el chorro de plasma para obtener cortes más precisos. Deben sustituirse periódicamente para garantizar un rendimiento de corte óptimo.
 - 3) **Refrigerante:** El refrigerante se utiliza para disipar el calor de la antorcha de plasma, ayudando a prolongar su vida útil y mejorar el rendimiento de corte.
 - 4) **Aire comprimido:** El aire comprimido se utiliza para alimentar la antorcha de plasma y crear la corriente de plasma, y un suministro limpio y fiable de aire es necesario para el proceso de corte por plasma.
- **Taladro radial:** Una taladradora radial es un tipo de taladradora que se utiliza para hacer agujeros en piezas grandes. Para que una taladradora radial funcione con eficacia, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:
 - 1) **Brocas:** Las brocas son la herramienta principal utilizada en una máquina de taladrado radial, y necesitan ser reemplazadas con frecuencia para asegurar un rendimiento óptimo de corte.
 - 2) **Fluidos de corte:** Los fluidos de corte se utilizan para refrigerar y lubricar la broca, lo que ayuda a prolongar su vida útil y mejorar el rendimiento de corte.
 - 3) **Sistemas de refrigeración:** Los sistemas de refrigeración se utilizan para eliminar el calor de la broca y la pieza de trabajo, ayudando a prevenir daños y mejorar la eficiencia de corte.

- 4) **Portabrocas:** Los portabrocas se utilizan para sujetar la broca en su sitio, y puede ser necesario sustituirlos si se dañan o desgastan.
 - 5) **Piezas de repuesto:** Otras piezas de repuesto, como rodamientos, engranajes y husillos, también pueden ser necesarias para mantener la taladradora radial en buenas condiciones de funcionamiento.
- **Prensa plegadora:** Una plegadora es un tipo de máquina metalúrgica que se utiliza para doblar y dar forma a las placas metálicas. Para que una prensa plegadora funcione con eficacia, se necesitan varios consumibles, entre ellos
 - 1) **Juegos de punzones y matrices:** Los juegos de punzones y matrices son las principales herramientas de corte en una máquina plegadora, y se utilizan para formar las láminas de metal. Deben sustituirse cuando se desgastan o dañan.
 - 2) **Lubricantes:** Los lubricantes se utilizan para reducir la fricción entre los juegos de punzones y matrices y las chapas metálicas, mejorando el rendimiento de corte y prolongando la vida útil de los juegos de punzones y matrices.
 - 3) **Fluidos de máquina:** Los fluidos de máquina, como el fluido hidráulico, se utilizan para alimentar la máquina plegadora y son necesarios para su funcionamiento.
 - 4) **Sellos y juntas:** Los sellos y juntas se utilizan para evitar fugas en el sistema hidráulico, y es necesario reemplazarlos si se dañan o desgastan.
 - 5) **Componentes eléctricos:** Los componentes eléctricos, como sensores e interruptores, se utilizan para controlar el funcionamiento de la máquina plegadora, y puede ser necesario sustituirlos si se dañan o fallan.
 - **Soldadura:** La soldadura es un proceso de fabricación que consiste en unir dos o más piezas metálicas aplicando calor y presión. Para que una máquina de soldar funcione eficazmente, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:
 - 1) **Electrodos de soldadura:** Los electrodos de soldadura son la principal herramienta

de soldadura y se utilizan para crear el arco eléctrico que funde las piezas metálicas y las une. Deben sustituirse con frecuencia para garantizar un rendimiento óptimo de la soldadura.

- 2) **Alambre de soldadura:** El hilo de soldadura se utiliza en los procesos de soldadura con hilo, como la soldadura MIG y TIG, y debe reponerse a medida que se consume durante el proceso de soldadura.
 - 3) **Bombonas de gas:** Las botellas de gas, como las de oxígeno, nitrógeno y argón, se utilizan como gas de protección en los procesos de soldadura para proteger la soldadura de la oxidación y la contaminación.
 - 4) **Blindaje de soldadura:** El blindaje de soldadura, como cortinas y pantallas de soldadura, se utiliza para proteger al operario y el entorno circundante de las chispas y la radiación UV durante el proceso de soldadura.
- **Pintura electrostática:** La pintura electrostática es un proceso de pintura que implica la aplicación de pintura a una pieza de trabajo utilizando una carga electrostática. Para que un sistema de pintura electrostática funcione eficazmente, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:
 - 1) **Pintura:** La pintura es el principal consumible utilizado en la pintura electrostática, y debe reponerse a medida que se utiliza.
 - 2) **Pistolas electrostáticas:** Las pistolas electrostáticas se utilizan para aplicar la pintura a la pieza mediante una carga electrostática. Puede ser necesario sustituirlas si se dañan o desgastan.
 - 3) **Filtros de pintura:** Los filtros de pintura se utilizan para eliminar las impurezas de la pintura antes de aplicarla a la pieza de trabajo, mejorando la calidad del acabado de la pintura.
 - 4) **Mangueras y boquillas:** Las mangueras y boquillas se utilizan para transportar la pintura desde el suministro de pintura hasta la pistola electrostática, y puede ser necesario sustituirlas si están dañadas u obstruidas.
 - 5) **Diluyentes y limpiadores de pintura:** Los disolventes y limpiadores de pintura se

utilizan para ajustar la consistencia de la pintura y para limpiar la pistola electrostática y otros equipos entre usos.

- **Hornos:** Un horno de pintura industrial es un tipo de equipo de calentamiento utilizado en el proceso de acabado de pintura de piezas de trabajo. Para que un horno industrial de pintura funcione eficazmente, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:

- 1) **Aislamiento:** El aislamiento se utiliza para reducir la pérdida de calor y mejorar la eficiencia energética del horno de pintura, y debe sustituirse si se daña o desgasta.
- 2) **Elementos calefactores:** Los elementos calefactores se utilizan para generar calor en el horno de pintura y deben sustituirse si fallan o dejan de funcionar.
- 3) **Termopares y termómetros:** Los termopares y termómetros se utilizan para medir y controlar la temperatura en el horno de pintura, y necesitan ser reemplazados si se dañan o son inexactos.
- 4) **Paneles de control e interruptores:** Los paneles de control y los interruptores se utilizan para controlar el funcionamiento del horno de pintura, y puede ser necesario sustituirlos si se dañan o fallan.
- 5) **Sellos y juntas de la puerta:** Los sellos y juntas de la puerta se utilizan para evitar la pérdida de calor y mejorar la eficiencia energética, y es necesario sustituirlos si se dañan o desgastan.

- **Torno CNC:** Un torno CNC (control numérico por ordenador) es un tipo de máquina herramienta utilizada para producir piezas cilíndricas con gran precisión. Para utilizar un torno CNC de forma eficaz, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:

- 1) **Herramientas de corte:** Las herramientas de corte, como las plaquitas de torneado y los portaherramientas, se utilizan para eliminar material de la pieza de trabajo y producir la forma final de la pieza. Deben sustituirse con frecuencia para garantizar un rendimiento de corte óptimo.
- 2) **Refrigerante:** El refrigerante se utiliza para lubricar la herramienta de corte y la pieza de trabajo, y para eliminar virutas y residuos de la zona de corte. Debe reponerse a

medida que se consume durante el proceso de corte.

- 3) **Dispositivos de sujeción:** Los dispositivos de sujeción, como mandriles y pinzas, se utilizan para mantener la pieza en su sitio mientras se mecaniza. Puede ser necesario sustituirlos si se dañan o desgastan.
 - 4) **Fluidos de corte:** Los fluidos de corte, como el aceite de corte y la emulsión, se utilizan para mejorar el rendimiento de corte y prolongar la vida útil de las herramientas de corte. Deben reponerse a medida que se consumen durante el proceso de corte.
 - 5) **Preajustadores de herramientas:** Los preajustadores de herramientas se utilizan para ajustar y verificar la altura y orientación de la herramienta de corte, y puede ser necesario sustituirlos si se dañan o son imprecisos.
- **Fresadora:** Una fresadora es un tipo de máquina herramienta utilizada para producir formas planas y complejas en metal u otros materiales. Para que una fresadora funcione con eficacia, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:
 - 1) **Herramientas de corte:** Las herramientas de corte, como las fresas y las fresas frontales, se utilizan para eliminar material de la pieza de trabajo y producir la forma final de la pieza. Deben sustituirse con frecuencia para garantizar un rendimiento de corte óptimo.
 - 2) **Refrigerante:** El refrigerante se utiliza para lubricar la herramienta de corte y la pieza de trabajo, y para eliminar virutas y residuos de la zona de corte. Debe reponerse a medida que se consume durante el proceso de corte.
 - 3) **Dispositivos de sujeción:** Los dispositivos de sujeción, como tornillos de banco y abrazaderas, se utilizan para mantener la pieza en su sitio mientras se mecaniza. Puede ser necesario sustituirlos si se dañan o desgastan.
 - 4) **Fluidos de corte:** Los fluidos de corte, como el aceite de corte y la emulsión, se utilizan para mejorar el rendimiento de corte y prolongar la vida útil de las herramientas de corte. Deben reponerse a medida que se consumen durante el proceso de corte.

- 5) **Preajustadores de herramientas:** Los preajustadores de herramientas se utilizan para ajustar y verificar la altura y orientación de la herramienta de corte, y puede ser necesario sustituirlos si se dañan o son imprecisos.
- **Prensa vertical y horizontal:** Una prensa vertical y horizontal es un tipo de máquina que se utiliza para diversas operaciones, como estampado, punzonado, forjado y conformado. Para que una prensa vertical funcione con eficacia, se necesitan varios consumibles, entre los que se incluyen:
 - 1) **Matrices:** Los troqueles son las herramientas utilizadas para dar a la pieza la forma deseada. Deben sustituirse con frecuencia para garantizar un rendimiento óptimo y producir piezas precisas.
 - 2) **Lubricantes:** Los lubricantes, como el aceite o la grasa, se utilizan para reducir la fricción entre la pieza de trabajo y la matriz, y para prolongar la vida útil de la matriz. Deben reponerse a medida que se consumen durante el proceso de prensado.
 - 3) **Mordazas:** Las abrazaderas se utilizan para sujetar la pieza durante el proceso de conformado. Puede ser necesario sustituirlas si se dañan o desgastan.
 - 4) **Pasadores guía y casquillos:** Los pasadores guía y los bujes se utilizan para alinear la pieza de trabajo y la matriz y para evitar que la pieza de trabajo se mueva durante el proceso de prensado. Puede ser necesario sustituirlos si se dañan o desgastan.
 - 5) **Contrapesos:** Los pesos de contrapeso se utilizan para equilibrar la prensa y reducir la tensión en la máquina. Es posible que deban sustituirse si se dañan o desgastan.

Capítulo 5

La formulación del modelo es una etapa clave en el proceso de resolver problemas de optimización, ya que permite traducir las características y requisitos del problema en un lenguaje matemático formal. En esta etapa, se definen las variables de decisión y los parámetros que describen las restricciones y características del problema.

Antes de comenzar con la formulación del modelo para la empresa MAF y sus productos de rodillos y estaciones, es importante identificar las variables clave y los parámetros que afectan al proceso productivo. Esto se basa en la información proporcionada en el Capítulo 4. Además, se deben tener en cuenta los requisitos y objetivos de la empresa para establecer el orden de producción. Se utiliza un ponderador de importancia para cada trabajo, y el objetivo principal es minimizar el Makespan y determinar el orden de producción.

En este capítulo, se presentará la formulación completa del modelo de optimización matemática, considerando las variables y parámetros. También se abordarán las restricciones específicas del problema, basadas en la información del Capítulo 4. Además, se presentarán los supuestos realizados en la formulación del modelo. Estos supuestos son simplificaciones o aproximaciones que se hacen para facilitar la resolución del problema, asumiendo ciertas condiciones ideales o simplificaciones matemáticas.

5.1 Parámetros

Los parámetros corresponden a los valores constantes y conocidos, que se encargan de caracterizar el sistema que se está estudiando y que además influyen en las variables de decisión y en las restricciones del modelo de optimización. En el contexto de la empresa MAF se cuentan con los siguientes parámetros.

- (1) Tiempo de procesamiento(t_{jm}):** Cada trabajo “j” que se lleva a cabo en una máquina “m” tiene asociado un tiempo de procesamiento específico. Por lo tanto, los tiempos de procesamiento de cada uno de los trabajos varía. Cabe destacar que este tiempo de procesamiento incluye el tiempo en que la máquina procesa el trabajo “j” y el tiempo que le toma al operador instalar la pieza para que esta sea procesada. A continuación, se presentan los tiempos de procesamiento tanto para los distintos tipos de estaciones, como los rodillos con y sin anillos.

Tiempo de procesamiento [hr]					
Proceso	Estación de Carga	Estación Autocentrante	Estación con Retorno en V	Estación transición Ajustable	Estación Picking
Corte por plasma (CP)	0.75	1.20	0.53	1.20	1.88
Taladro (Ta)	0.32	0.80	0.16	0.32	0.32
Macho (M)	0.53	1.33	0.27	0.53	0.53
Plegado (P)	0.97	1.55	0.68	1.55	2.42
Corte con sierra (CS ₁)	0.27	5.07	0.80	0.27	5.07
Soldar (S)	0.50	0.50	0.50	0.50	40.00
Granallado (G ₁)	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00
Horneado (H ₁)	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
Pintura (PE ₁)	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58

Tabla 6.: Tiempos de procesamiento que le toma a cada una de las máquinas en horas para producir una estación. (Fuente: Elaboración Propia)

Proceso	Rodillo sin Anillos [hr]	Rodillo con Anillos [hr]
Corte con sierra (CS ₂)	0.18	0.18
Torno (T ₁)	0.07	0.07
Torno (T ₂)	0.07	0.07
Pintura cabezal (PC)	0.07	0.07
Corte con sierra (CS ₃)	0.18	0.18
Torno (T ₃)	0.20	0.20
Fresado (F)	0.10	0.10
Granallado (G ₂)	48.00	0
Pintura electrostática (PE ₂)	0.30	0
Horno (H ₂)	0.58	0
Prensa horizontal (PH ₁)	0	0.01
Prensa horizontal (PH ₂)	0.23	0.23
Prensa Vertical (PV)	0.23	0.23

Tabla 7: Tiempos de procesamiento de los rodillos, tanto sin anillo como con anillo, donde para este último el tiempo de procesamiento de la Prensa Horizontal (PH₁) se multiplica posteriormente por la cantidad de anillos que se le deban instalar a cada rodillo. (Fuente: Elaboración Propia).

- (2) **Cantidad demandada(d_j):** Cantidad demandada por cada trabajo “j”, por ejemplo, del trabajo 1 corresponden a rodillos con anillos, de los cuales se deben producir un total de 20 para el final del horizonte de planificación.
- (3) **Ponderador de importancia(b_j):** Factor de cada trabajo “j” que le otorga su grado de importancia al momento de comenzar con su producción, determinando de esta manera el orden en el que se

producirán todos los trabajos. Este factor se obtuvo a través de la utilidad que el trabajo “j” aporta al total, es decir corresponde a un porcentaje de la utilidad total generada, estos valores se muestran en Anexo 1.

5.2 Variables

Son elementos que representan las decisiones a tomar, donde sus valores pueden variar según un rango definido y que por ende afecta al resultado final del problema que se está resolviendo. Para la determinación de las variables se debe conocer el objetivo que se está buscando, acá se puede encontrar la minimización o la maximización de alguna función objetivo, la cual se encuentra sujeta a ciertas restricciones.

Las variables pueden tener diferentes naturalezas, acá se encuentran las variables continuas, discretas y binarias. En base al contexto de la empresa MAF se definirán las variables de decisión del modelo, considerando que el objetivo principal del modelo es la minimización del Makespan.

- (1) Inicio del trabajo (X_{jm}):** Variable real no-negativa que se encarga de determinar el momento en que se inicia el proceso de fabricación del trabajo “j” en la máquina “m”.

$X_{jm} \geq 0$: Momento en que se inicia la fabricación del trabajo “j” en la máquina “m”.

- (2) Precedencia (Z_{jkm}):** Variable binaria que indica la precedencia del trabajo “j” sobre “k” en la máquina “m”. Esta variable ayuda a determinar el orden en el que se procesaran los trabajos en cada máquina. Donde tomará el valor de 1 cuando “j” preceda a “k” y 0 en cualquier otro caso.

$$Z_{jkm} \begin{cases} 1; & \text{Cuando el trabajo "j" precede el trabajo "k" en la máquina "m".} \\ 0; & \text{otro caso.} \end{cases}$$

- (3) Makespan (C) :** Intervalo de tiempo que pasa entre el inicio del procesamiento del primer trabajo y la finalización del último trabajo, considerando que el tiempo de inicio es 0. Esta corresponde a la variable que posteriormente será minimizada en la función objetivo.

- (4) Término del trabajo (W_{jm}):** Tiempo en que el trabajo “j” termina de ser procesado por la máquina “m”.

$W_{jm} \geq 0$: Momento en que se finaliza la fabricación del trabajo “j” en la máquina “m”.

5.3 Formulación del modelo de optimización

A continuación, se presentarán los conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y restricciones que modelarán la problemática que se está buscando resolver.

5.3.1. Supuestos

Dada la complejidad inherente en la formulación de un modelo matemático de optimización para un entorno Job Shop, se hará necesario establecer una serie de supuestos que permitirán simplificar dicho planteamiento. Los supuestos considerados son los siguientes:

- Los procesos de producción no serán interrumpidos una vez iniciados.
- Se conocen los trabajos a procesar, es decir la demanda es conocida y no se considera la entrada de nuevos trabajos.
- Se encuentra disponible la materia prima, insumos y la mano de obra necesaria para la ejecución de cada uno de los trabajos.
- Todas las máquinas se encuentran disponibles en el tiempo 0.
- Aunque los procesos de producción de las estaciones y rodillos involucran trabajos en paralelo, con el fin de simplificar el modelo, se asumirá que dichos procesos se llevarán a cabo en serie. La consideración de trabajos en paralelo se pospondrá para investigaciones futuras, centrándonos en este momento en la formulación del modelo de optimización para la secuencia de procesos en serie.
- En el planteamiento del modelo, se tomará en cuenta que cuando se toma la decisión de producir un trabajo "j", se fabricará la totalidad de ellos para satisfacer completamente la demanda de dicho trabajo. Esto implica que no se permitirá una producción parcial del trabajo, sino que se completará en su totalidad para cumplir con todas las exigencias de la demanda correspondiente.

5.3.2. Conjuntos

Los conjuntos permiten estructurar y organizar la información de un modelo, facilitando así su comprensión, resolución y posterior análisis, por lo que cada conjunto posee un propósito específico y que por tanto su definición depende del problema que se esté abordando. A continuación de esto, se presentarán los conjuntos considerados para el modelo:

- **Trabajos (J):** Conjunto de trabajos $\{1, 2, 3, \dots, j\}$, contiene el subíndice "j".
- **Máquinas (M):** Conjunto de máquinas $\{1, 2, 3, \dots, m\}$. contiene el subíndice "m".
- **Operaciones (Op):** Cada trabajo "j" debe seguir ciertos procesos en un orden específico para ser

producido $\{\sigma_1^j, \sigma_2^j, \dots, \sigma^j\}$, en donde cada operación corresponde a un conjunto de dos dimensiones compuesta por el trabajo y la máquina correspondiente (j, m).

5.3.3. Función Objetivo

El problema que se desea abordar corresponde a la minimización del tiempo total de procesamiento de cada uno de los trabajos, esto es también conocido como Makespan (C). El Makespan es una medida de rendimiento crucial en la programación tipo job-shop, puesto que hace referencia al tiempo total necesario para completar todos los trabajos de un programa determinado, es por esto que se busca principalmente su minimización:

$$\text{Minimizar } C$$

Al minimizar el tiempo de ciclo, pretendemos optimizar el proceso de programación y mejorar la eficiencia operativa del sistema, además de encontrar la disposición óptima de las horas de inicio de los trabajos en diferentes máquinas. Permite una mejor planificación, asignación de recursos y satisfacción de las demandas de los clientes en el menor tiempo posible.

5.3.4. Restricciones

- (1) Restricción de procesamiento. Esta restricción garantiza que la hora de inicio del trabajo "j" en la máquina "m" se produce después de la finalización del trabajo anterior. Se puede formular de la siguiente manera:

$$X_{j,o} + t_{j,o} * d_j \leq X_{j,m} - t_{j,m} * d_j \quad \forall j \in J, \forall o \in Op$$

El lado izquierdo de la restricción representa el tiempo de finalización del trabajo "j" en la máquina "o" (la operación anterior), teniendo en cuenta el tiempo de procesamiento y la cantidad demandada. El lado derecho representa la hora de inicio del trabajo "j" en la máquina "m" después de considerar el tiempo de preparación.

- (2) Precedencia entre trabajos. Esta restricción impone la relación de precedencia entre los trabajos "j" y "k" en la máquina "m". Garantiza que, si el trabajo "j" precede al trabajo "k", haya un intervalo de tiempo entre sus horas de inicio. Se puede expresar como:

$$X_{j,m} + t_{j,m} * d_j \leq X_{k,m} + N (1 - Z_{j,k,m}) \quad \forall j, k \in J, j \neq k, \forall m \in M$$

El lado izquierdo representa el tiempo de finalización del trabajo "j" en la máquina "m", y el lado derecho representa el tiempo de inicio del trabajo "k" en la máquina "m" más una constante "N", la cual es un número muy grande (big M) multiplicada por el complemento de

la variable de precedencia. Esta restricción garantiza que si $Z_{j,k,m} = 1$ (indica que el trabajo “j” precede al trabajo “k”), la hora de finalización del trabajo “j” va antes que la hora de inicio del trabajo “k”.

- (3) Precedencia de las máquinas. Esta restricción garantiza que solo exista una relación de precedencia entre cualquier par de trabajos en la misma máquina, es decir, se asegura que exista una relación de coherencia entre los trabajos. Esta restricción se formula como:

$$Z_{j,k,m} + Z_{k,j,m} = 1 \quad \forall j, k \in J, j \neq k$$

En esta restricción implica que, si el trabajo "j" precede al trabajo "k" en la máquina "m", entonces el trabajo "k" no puede preceder al trabajo "j" en la misma máquina.

- (4) Makespan. Esta restricción limita el Makespan en función del tiempo de finalización de la última operación de cada trabajo, se representa como:

$$\left(X_{j,\sigma_{|M|}^j} + t_{j,\sigma_{|M|}^j} * d_j \right) \left(1/b_j \right) \leq C \quad \forall j \in J$$

El lado izquierdo representa el tiempo de finalización de la última operación del trabajo "j", considerando el tiempo de procesamiento y la cantidad demandada. El lado derecho representa el Makespan "C". Al dividir el tiempo de ejecución por el peso de importancia b_j esta restricción se asegura de que el tiempo del Makespan sea mayor o igual al tiempo de finalización del trabajo más crítico.

- (5) Determinación de tiempo final. Esta restricción determina el tiempo de finalización $W_{j,m}$ de cada trabajo “j” en cada máquina “m” en función de su tiempo de inicio $X_{j,m}$ y su tiempo de procesamiento:

$$X_{j,m} + t_{j,m} * d_j = W_{j,m} \quad \forall j \in J, m \in M$$

Acá se garantiza que el tiempo de finalización de un trabajo en una máquina corresponde a la suma de su tiempo de inicio y su tiempo de procesamiento por la demanda total de ese trabajo (cumplimiento de la demanda).

- (6) Naturaleza de las variables:

$$Z_{j,k,m} \in \{0, 1\}; \quad j, k \in J, \quad j \neq k, \quad m \in M$$

$$X_{j,m} \geq 0; \quad \forall j \in J, \quad m \in M$$

$$W_{j,m} \geq 0; \quad \forall j \in J, \quad m \in M$$

Capítulo 6

En el presente capítulo se analizarán los resultados obtenidos del modelo. Cabe destacar que se programará el modelo utilizando Python aplicando Pyomo, el cual corresponde a una colección de paquetes de software de Python para formular modelos de optimización. Así mismo para su resolución se usará el solver GLPK – GNU Linear Programming Kit, el cual es un sistema de modelado algebraico con soporte para problemas de optimización sobre enteros y reales. El modelo que se propuso se caracteriza por ser una Programación Lineal Entera Mixta (MILP), lo que hace adecuada la utilización del solver GLPK.

3.1 Análisis de los resultados

Dado que la carga computacional de correr el modelo para todos los trabajos en un mismo instante, se decidió primeramente separar los datos por estaciones y rodillos, esto debido a que estos no comparten máquinas en sus procesos, por lo que se pueden ir produciendo en paralelo, esto considerando como supuesto que existe la mano de obra necesaria para la producción de ambos productos.

Aun así, la carga computacional era bastante grande, por lo que se tomó una menor cantidad de trabajos por producto para modelarlos. Tanto para las estaciones como rodillos se programaron 8 trabajos, puesto que esto era lo máximo que los recursos computacionales disponibles podían programar. Con los ajustes pertinentes al modelo, los resultados tanto de las estaciones como los rodillos se presentan en el Anexo 3 y 4 respectivamente. Se puede visualizar de mejor manera los resultados en el siguiente diagrama Gantt:

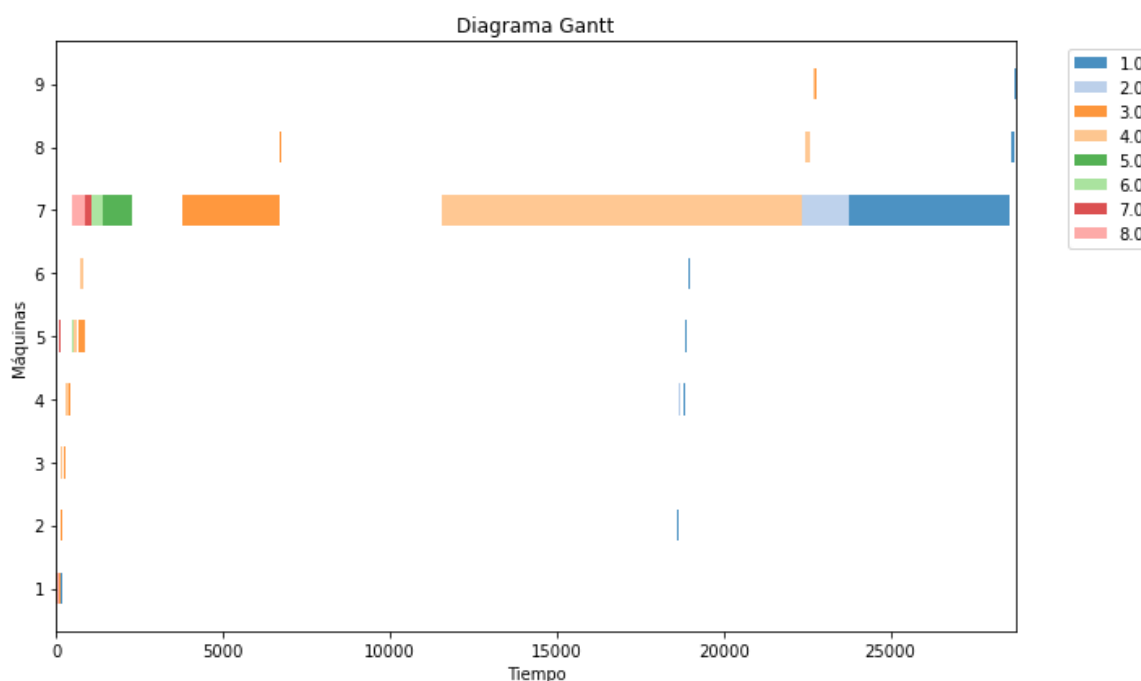


Figura 23: Diagrama Gantt del proceso productivo para las estaciones a través del modelo propuesto. Proceso completo. (Fuente: Elaboración Propia)

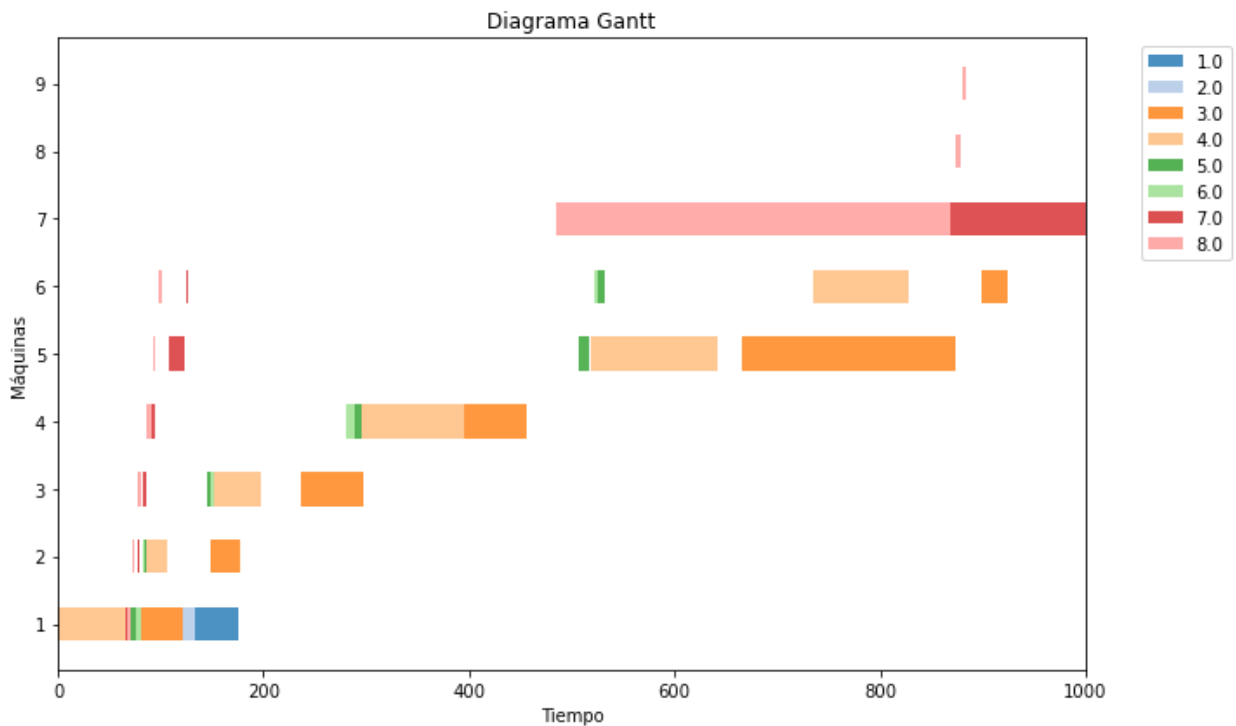


Figura 24: Diagrama Gantt del proceso productivo para las estaciones a través del modelo propuesto. Proceso hasta las 1000 hrs. (Fuente: Elaboración Propia)

El proceso propuesto se obtiene como resultado en la función objetivo de 6.694.392, donde este valor no corresponde al tiempo total que toma la producción completa, esto es debido a como se define el Makespan en la restricción (4), en donde se encuentra el ponderador de importancia, que hace que el resultado final aumente.

Ahora el tiempo total que le toma a la producción es de 28.755 horas, donde al considerar un total de 88,5 horas semanales laborales, este valor se traduce en 325 semanas de trabajo. Observando por otro lado ambos diagramas expuestos (figuras 23 y 24) mostrando el mismo proceso, pero se le realiza un acercamiento considerando un tiempo de 1000 horas, para poder visualizar de mejor manera la configuración de los trabajos.

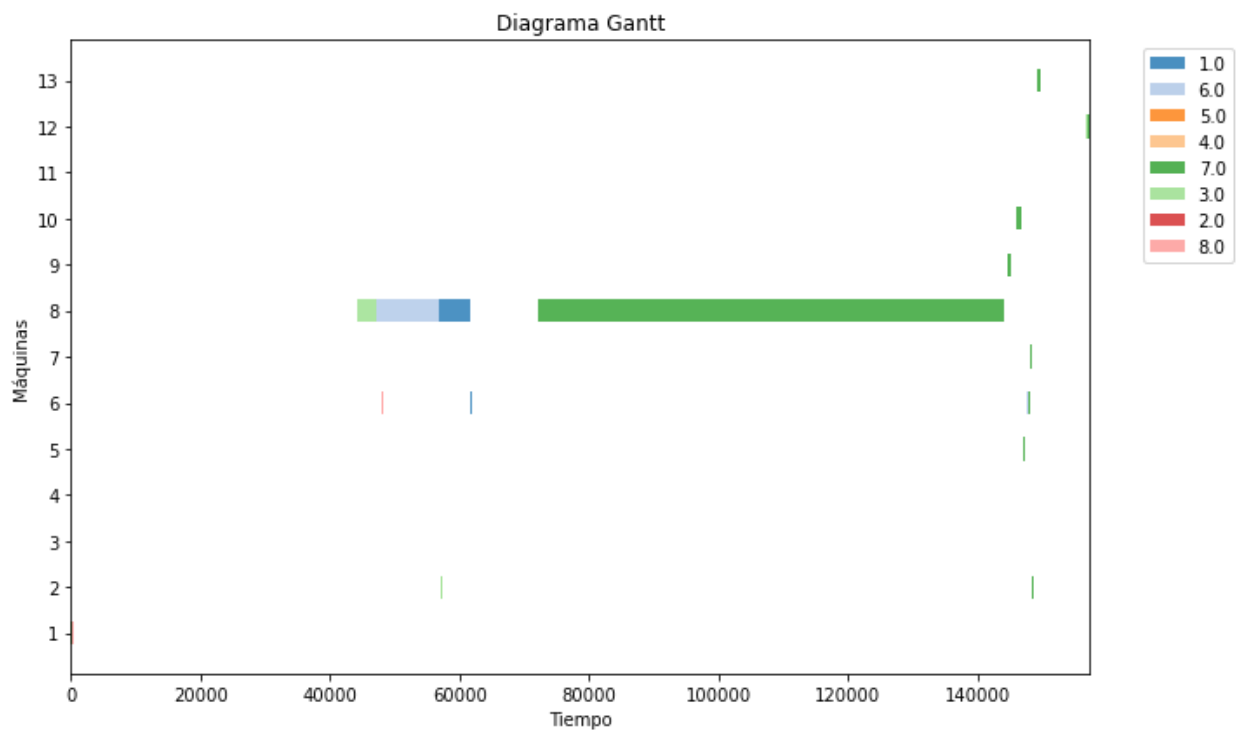


Figura 25: Diagrama Gantt del proceso productivo para los rodillos a través del modelo propuesto.
Proceso completo. (Fuente: Elaboración Propia)

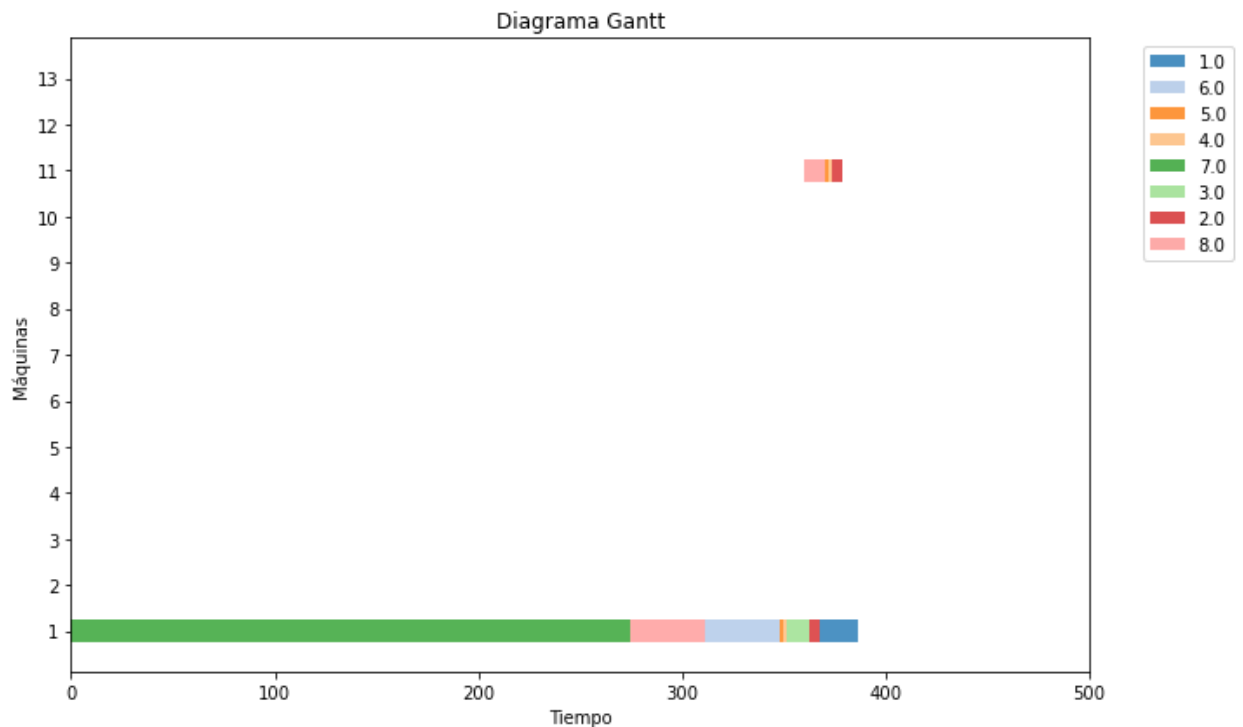


Figura 26: Diagrama Gantt del proceso productivo para los rodillos a través del modelo propuesto.
Proceso hasta las 500 hrs. (Fuente: Elaboración Propia)

Para los rodillos se debe tener las mismas consideraciones en mente que en las estaciones. Acá se

obtiene para la función objetivo un valor igual a 543.398.323 y el tiempo que le toma a la producción terminar todos los trabajos es 157.277 horas, considerando las 88,5 horas laborales semanales, se tiene que la producción tomaría un total de 1.777 semanas. De igual manera que las estaciones al observar las figuras 25 y 26 se realiza un acercamiento considerando un tiempo de 500 horas, para poder visualizar de mejor manera la configuración de los trabajos.

Como se puede observar, el tiempo que tomaría la producción de estos trabajos supera los 40 años de producción, lo que en la práctica no es así. Las razones por las que este valor es tan elevado es debido a las consideraciones que se tomaron al momento de plantear el modelo con el objetivo de simplificarlo. Uno de los puntos más importantes a evaluar de los supuestos es el proceso secuencial, puesto que al observar los diagramas de procesos de los productos en las figuras 23 y 25 se puede vislumbrar que existen actividades que pueden realizarse de forma paralela, por ejemplo, para los rodillos la producción del manto, el eje y el cabezal pueden realizarse de forma simultánea, lo que ahorraría una cantidad considerable de tiempo en la producción. Por otro lado, también se debe recordar que el proceso de granallado corresponde a una actividad tercerizada, en la cual se acumula una cierta cantidad de trabajos los cuales son llevados al centro de granallado, cabe destacar que este proceso de acumulación de trabajos no está representado en el modelo propuesto, lo que también contribuye a la sobre estimación del tiempo total de producción.

En cuanto a los tiempos totales de funcionamiento de cada una de las máquinas, a continuación, se presenta la tabla 8 que muestra el tiempo de uso de cada una de las máquinas, considerando que se evaluaron 8 trabajos de estaciones y 8 de rodillos.

Máquina	Tiempo de uso [hr]
1	175
2	80
3	170
4	267
5	383
6	188
7	21648
8	263
9	150
10	387
11	143
12	143
13	141
14	387
15	424
16	212
17	89280
18	560

19	1087
20	19
21	493
22	493

Tabla 8: Tiempo total de uso de cada máquina en horas, para la elaboración de 8 estaciones y 8 rodillo. (Fuente: Elaboración Propia)

A partir de lo presentado en la tabla 8 se puede observar que las máquinas 7 y 17 son las que más tiempo están en funcionamiento, puesto que estas corresponden al proceso de granallado y por tanto están sujetos a las condiciones anteriormente mencionadas. Por otro lado, la máquina que menos tiempo está en funcionamiento es la número 20, con 19 horas. Esta máquina corresponde a la prensa horizontal, que tiene como trabajo colocar los anillos de goma en los rodillos, esto se rectifica al observar su tiempo unitario en la tabla 7, siendo este el menor de todos cabe destacar que su tiempo se multiplica por la cantidad de anillos a instalar.

Para un análisis más profundo respecto del comportamiento del modelo, se compararán los resultados obtenidos al incluir o no el ponderador de importancia tanto para las estaciones como los rodillos.

Rodillo	Con Ponderador	Sin Ponderador
Tiempo total	93.752,53	93.752,53
Makespan	157.277,5	162.145
Función Objetivo	543.398.323,7	149.675

Tabla 9: Resumen de los datos obtenidos por el modelo al evaluar los rodillos, considerando el parámetro del ponderador de importancia y sin considerarlo. (Fuente: Elaboración Propia).

Estación	Con Ponderador	Sin Ponderador
Tiempo total	23.323,92	23.323,92
Makespan	28.755,76	22.806,43
Función Objetivo	6.694.392,03	22.593,76

Tabla 10: Resumen de los datos obtenidos por el modelo al evaluar las estaciones, considerando el parámetro del ponderador de importancia y sin considerarlo. (Fuente: Elaboración Propia).

Observando los resultados obtenidos en la tabla 9, se destaca que a pesar de quitar el ponderador, el tiempo total en que las maquinas están en funcionamiento es el mismo, variando principalmente el Makespan y el resultado de la Función Objetivo. La diferencia entre el Makespan y el tiempo total está dada por la configuración que el modelo decidió realizar, por lo que existen momentos en los que no todas las máquinas van a estar funcionando. Una posible solución a esto podría ser la incorporación de un conjunto que corresponda al horizonte de tiempo, ya que con esto se podría realizar una restricción en la que se especifique que en cada momento “t” al menos una máquina deberá estar funcionando.

Por otro lado, la diferencia entre ambas funciones objetivos viene dadas por la forma en la que se definió el Makespan en la restricción (4), puesto que al multiplicar la suma de los tiempos por $1/b_j$, considerando que b_j son valores entre 0 y hacen que el resultado final corresponda a un número mayor, es por esto, que al no considerar el ponderador el valor de la Función Objetivo es menor a que si se considerara.

Ahora al comparar ambos Makespan, se observa que para los rodillos el modelo con el ponderador le toma menos tiempo en procesar todos los trabajos a diferencia del modelo sin el ponderador, lo cual puede ser debido a como el modelo decidió configurar las tareas. Por otro lado, a pesar del parámetro de importancia, el orden de las tareas generado por el modelo no se ajusta necesariamente a la importancia, puesto que la restricción (4) también depende de la demanda, por lo que no solo el ponderador afecta a la decisión del orden de procesamiento de las tareas, sino que también la cantidad demandada de cada trabajo.

El orden de procesamiento para los rodillos es: 7, 8, 6, 5, 4, 3, 2, 1, ahora las cantidades demandadas por cada uno de los trabajos se muestran en la siguiente tabla:

Trabajo	Demanda	Ponderador
1	100	0.0040
2	30	0.0002
3	60	0.0049
4	8	0.0001
5	10	0.0049
6	200	0.0177
7	1,500	0.0836
8	200	0.0159

Tabla 11: Cantidad demandada de rodillos por trabajo. (Fuente: Elaboración Propia)

Gracias a la tabla 11 se puede comprender la selección del modelo en cuanto al orden de procesamiento, dado que prefiere producir primero los trabajos que tienen un menor número de demanda, puesto que esto implica un menor tiempo de procesamiento. Además, como se mencionó anteriormente el ponderador no logra compensar el peso que tiene la demanda sobre la elección del modelo al momento de programar.

Por otro lado, al observar los resultados de la tabla 10 que corresponde a las estaciones, el comportamiento de los resultados varía un poco. Al igual que en los rodillos el tiempo total con el ponderador y sin el ponderador, es constante, por lo que el tiempo en que estarán trabajando las máquinas será el mismo. Ahora en cuanto a la diferencia se genera entre el Makespan y el tiempo total tiene un comportamiento diferente si se considera o no el ponderador de importancia, cuando no se considera el Makespan es menor al tiempo total que estarían funcionando las máquinas, ahora la razón por la que esto puede suceder es que trabajan varias máquinas en paralelo, lo cual se puede observar en la figura 24, haciendo finalmente que el tiempo total de procesamiento sea menor, caso contrario al momento de

considerar el ponderador de importancia donde el Makespan es mayor al tiempo total, pudiendo ser que se existan más momentos en los que no se esté utilizando ninguna máquina.

Finalmente, las diferencias entre las Funciones Objetivo al igual que en el caso de los rodillos viene dado por la ecuación (4), puesto que, al multiplicar por el ponderador, se genera un sesgo, además de que se debe considerar el efecto de la demanda en el resultado final.

Trabajo	Demanda	Ponderador
1	100	0.0591
2	30	0.0508
3	60	0.0014
4	224	0.0034
5	18	0.0035
6	7	0.0014
7	4	0.0007
8	8	0.0011

Tabla 13: Cantidad demandada de estaciones por trabajo. (Fuente: Elaboración Propia)

Ahora se puede ver que técnicamente la Función objetivo debería ser igual al Makespan de las tablas 9 y 10 para los casos en los que no se considera el ponderador, ya que, la Función objetivo corresponde al Makespan, mientras que el Makespan de las tablas hace referencia al tiempo de finalización del último trabajo. Esta diferencia se puede modificar si se replanteara la Función objetivo, pudiendo replantearse como la minimización de una variable que represente el tiempo de finalización de cada trabajo.

Comparando los resultados de ambos productos, se encuentra una gran diferencia en sus tiempos de procesamiento, esto es principalmente generado por la cantidad de trabajos totales que se deben procesar, puesto que las estaciones corresponden a un total de 451 trabajos, mientras que para los rodillos son 2.108, además el proceso para producir rodillos implica la utilización de un mayor número de máquinas a diferencia de las estaciones.

Ahora cabe destacar que con el funcionamiento actual en la empresa se producen aproximadamente 20 estaciones diarias valor que cambia según el tipo de estación que se esté produciendo, por ejemplo las estaciones picking corresponden a las que mayor tiempo toma producirlas, por lo que se podrían fabricar unas 15 diarias, mientras que las estaciones de carga, pueden llegar a producirse 30 al día, por otro lado, se producen aproximadamente 30 rodillos diarios, acá la mayor diferencia es si estos tienen o no anillos de goma, puesto que si estos no los tienen se deben mandar a una empresa externa para el proceso de granallado, el cual corresponde al proceso que mayor tiempo toma en la producción.

El granallado en las estaciones corresponde a un 93% del total del tiempo que se necesita para el procesamiento de las 451 estaciones, en cuanto a los rodillos este proceso corresponde al 95% del tiempo

que toma la producción total de los 2.108 rodillos. Con el modelo propuesto se producen diariamente 0,4 estaciones y 0,4 rodillos, esto sin importar el tipo de rodillo y estación que se esté produciendo. Ahora si se separan los rodillos con y sin anillos, se tiene que diariamente se producen 14 rodillos con anillos y 0,4 rodillos sin anillos, esta diferencia viene dada por el proceso de granallado mencionado anteriormente, por lo que es importante considerar el impacto de este proceso en la producción total.

Dados los supuestos considerados al momento de plantear el modelo es que se genera esta gran diferencia en las cantidades producidas diariamente, en especial el supuesto de secuencia de la producción en línea y no de forma paralela en especial para los rodillos, por otro lado, se debe considerar que el proceso de granallado corresponde a un proceso tercerizado, por lo que se debe considerar otros aspectos como lo es la capacidad de la empresa proveedora para granallar la mayor cantidad de estaciones y rodillos en un mismo momento, buscando minimizar el tiempo que pasan en este proceso y maximizar la cantidad de trabajos que puedan ser mandados para procesarse en un mismo instante.

Ahora teniendo claras las restricciones y supuestos del modelo, si bien este no logra disminuir los tiempos de procesamiento debido a los puntos mencionados anteriormente, si se puede utilizar como una herramienta cuantitativa para decidir que trabajo producir primero, puesto que aun así el modelo intenta minimizar el tiempo total de procesamiento, y actualmente la empresa no cuenta con algún criterio de decisión sobre en qué orden producir, más bien se va produciendo según las necesidades del cliente o según lo que gerente general decida, provocando así atrasos en las entregas de hasta 200 días.

La implementación de este modelo requerirá la participación del encargado de planificación de la producción del área de operaciones, en colaboración con el jefe de producción. El encargado de planificación se encargará de coordinar las órdenes de compra de materia prima e insumos, mientras que el jefe de producción entregará las instrucciones diarias a los operadores en la planta de producción. El objetivo principal de esta colaboración es mejorar la comunicación y lograr una planificación más efectiva en la adquisición de materiales.

Al mejorar la comunicación entre ambas áreas, se facilitará la planificación de la compra de materiales. Esto garantizará que todos los materiales necesarios estén disponibles al momento de la producción, evitando retrasos causados por una planificación inadecuada en cuanto a la adquisición de los materiales. De esta manera, se aborda uno de los factores que contribuyen a los retrasos en la producción. Por otro lado, para la aplicación de esto en la empresa se debe contar con un computador que tenga la capacidad suficiente para la ejecución del modelo, además de instalar Python, el cual no presenta ningún costo extra por licencia, una vez instalado el programa, se deben cargar las librerías necesarias para ejecutar el modelo, como lo es pandas y pyomo principalmente.

Conclusiones

El presente informe abordó el tratamiento de problemas de programación de operaciones en ambientes Job-Shop y propuso un modelo de optimización para la empresa MAF. A partir de la revisión de la literatura, se pudo constatar la escasez de enfoques específicos para este tipo de problemas, lo que lleva a la adopción de heurísticas y metaheurísticas como alternativas viables. Para la problemática abordada se optó por simplificar el modelo, apuntando a uno más general que represente el funcionamiento de la empresa, además de buscar la simplicidad de este para facilitar su aplicación para el encargado de la planificación.

El diagnóstico realizado en la empresa MAF fue fundamental para comprender los procesos productivos y los recursos involucrados en cada etapa. Esta información se convirtió en la base sólida para la construcción del modelo de optimización propuesto. La importancia de llevar a cabo un diagnóstico exhaustivo previo a la modelación se reafirma como una actividad crucial en cualquier iniciativa de mejora y optimización. Si bien las variables del modelo se determinaron gracias a la definición de la problemática a tratar, al igual que la función objetivo, gracias al diagnóstico se logró determinar los supuestos, las restricciones del modelo, además de definir los parámetros, identificando a la demanda, el tiempo de procesamiento y el ponderador que fue calculado a partir del porcentaje que cada uno de los trabajos aporta a la utilidad total de la empresa, buscando producir primero el trabajo que genere un mayor aporte. Al momento de definir las restricciones se consideró lo encontrado en la literatura sobre los procesos tipo Job-Shop y la asignación de trabajos, utilizando variables binarias para determinar cuando una máquina se encuentra en funcionamiento y cuando un trabajo está siendo producido, pudiendo modelar la precedencia de los trabajos en las máquinas, puesto que no todos los trabajos pasan por las mismas máquinas.

Al momento de correr modelo, el cual fue programado en Pyomo utilizando Python, se presentaron dificultades asociadas al tiempo de procesamiento, por lo que se tomaron 8 trabajos tanto de estaciones como de rodillos por separado, puesto que no comparten máquinas en sus procesos productivos, pudiendo producirse de forma paralela ambos productos. Esta cantidad de trabajos permiten al programa planificar la producción considerando un tiempo de procesamiento computacional aceptable de aproximadamente 30 segundos.

Si bien el modelo de optimización desarrollado no arrojó mejoras significativas en cuanto al tiempo de procesamiento, se identificó su utilidad como guía para la secuencia de procesamiento por maquinaria, además de ayudar a determinar en qué orden producir los diferentes trabajos, puesto que actualmente la empresa no cuenta con una regla que defina en qué orden producir, generando una producción por goteo. Esto implica que el modelo puede proporcionar pautas y recomendaciones valiosas para optimizar la

asignación de tareas en el proceso productivo de la empresa.

A partir del análisis y las conclusiones obtenidas, se proponen potenciales trabajos futuros con el propósito de mejorar el rendimiento del modelo propuesto. Una opción sería aplicar heurísticas o metaheurísticas, ya que estas técnicas no solo reducen la carga computacional, sino que también ofrecen resultados cercanos al óptimo. Además, sería interesante reconsiderar el modelo actual mediante la inclusión de procesos en paralelo. Por otro lado, se podría evaluar el uso de Machine Learning para la optimización de los procesos.

Anexo

Anexo1: Ponderadores obtenidos a través del porcentaje que cada trabajo aporta a la utilidad total de la empresa. El trabajo se identifica como la Orden de producción (OP) y la posición (POS), mientras que la forma en que se trataron para el modelo corresponde al ID, por otro lado, se indica adicionalmente a que corresponde cada trabajo, si es un Rodillo o una Estación. (Fuente: Elaboración Propia).

Trabajo	ID	Tipo	Ponderador
2270-10	1	Estación	0.0591
2270-20	2	Rodillo	0.004
2273-10	3	Estación	0.0508
2273-20	4	Estación	0.0014
2273-30	5	Estación	0.0034
2273-50	6	Rodillo	0.0002
2273-60	7	Estación	0.0035
2273-70	8	Estación	0.0014
2273-80	9	Estación	0.0007
2273-90	10	Estación	0.0011
...	...	...	...
2316-250	134	Estación	0.0005
2316-270	135	Rodillo	0.0037
2317-10	136	Rodillo	0.0069
2318-10	137	Estación	0.0021
2318-20	138	Estación	0.0021
2319-10	139	Rodillo	0.0013

Anexo 2: Código utilizando en Python aplicando Pyomo para el modelo.

```
import pandas as pd
from pyomo.environ import *
import pyomo.environ as pyo
Excel='mini_modelo_data.xlsx'

Tabla_maquinas_trabajo= pd.read_excel(Excel,sheet_name='operaciones_estaciones')
Tabla_maquinas_trabajo_tiempo=
pd.read_excel(Excel,sheet_name='operaciones_estaciones',index_col=1)
Tabla_Demanda_trabajo=
pd.read_excel(Excel,sheet_name='dda_estaciones',index_col=0)
Tabla_tiempo_set_up= pd.read_excel(Excel,sheet_name='t_setup',index_col=0)
Tabla_ponderador_trabajo=
pd.read_excel(Excel,sheet_name='pond_estacion',index_col=0)
Tabla_maquinas_trabajo=Tabla_maquinas_trabajo.set_index(['Trabajo','Maquina'])
Tabla_maquinas_trabajo['Predecesor']=Tabla_maquinas_trabajo.index
Tabla_maquinas_trabajo['Predecesor']=Tabla_maquinas_trabajo['Predecesor'].shift(
).fillna(0)
```

```

def predecesor(fila):
    if fila.Predecesor==0:
        return 0

    if fila.Predecesor[0]== fila.name[0]:
        return fila.Predecesor
    else:
        return 0

Tabla_maquinas_trabajo['Predecesor'] =Tabla_maquinas_trabajo.index
Tabla_maquinas_trabajo['Predecesor']=Tabla_maquinas_trabajo['Predecesor'].shift(
).fillna(0)
Tabla_maquinas_trabajo['Predecesor']=Tabla_maquinas_trabajo.apply(predecesor,axis=1)
Tabla_maquinas_trabajo_operaciones =Tabla_maquinas_trabajo.reset_index()
Tabla_ponderador_trabajo=Tabla_ponderador_trabajo.to_dict()['b']
Tabla_tiempo_set_up=Tabla_tiempo_set_up.to_dict()['ts']
Tabla_Demanda_trabajo=Tabla_Demanda_trabajo.to_dict()['d']

O = Tabla_maquinas_trabajo.index.tolist()

#Conjuntos

J = Tabla_maquinas_trabajo.index.get_level_values(0).unique()
M = Tabla_maquinas_trabajo.index.get_level_values(1).unique()
O=Tabla_maquinas_trabajo.index.tolist()

# create an instance of ConcreteModel
model = ConcreteModel("Optimizacion Memoria")

# Conjuntos
model.j = Set(initialize = J)

model.m = Set(initialize = M)

model.Op = Set(dimen=2,initialize = O)

# Variables
#Tiempo de inicio del trabajo
model.X = Var(model.j,model.m, within=NonNegativeReals)

#Variable que define la precedencia entre las distintas operaciones
model.Z = Var(model.j,model.j,model.m, within=pyo.Binary,initialize=0)

#MakeSpan
model.C = pyo.Var(within=pyo.NonNegativeReals)

#Tiempo_final
model.W= pyo.Var(model.j,model.m,within=pyo.NonNegativeReals)

```

```

dict_tabla = Tabla_maquinas_trabajo.to_dict()
dict_tiempos_maquina = dict_tabla['tiempo_procesamiento']

def tiempo_proceso(model, Op):
    return dict_tiempos_maquina[Op]

def ponderador(model, J):
    return Tabla_ponderador_trabajo[J]

def demanda(model, J):
    return Tabla_Demanda_trabajo[J]

def setup(model, M):
    return Tabla_tiempo_set_up[M]

# Parámetros

model.b = Param(model.j, initialize = ponderador)

model.d = Param(model.j , initialize = demanda)

model.ts_m = Param(model.m, initialize = setup)

model.t_jm = Param(model.Op, initialize = lambda model, j, m:
dict_tiempos_maquina[(j,m)])
# Restricción de procesamiento
def Precedencia_entre_mismo_trabajo(model, j, m):
    if (j, m) not in Tabla_maquinas_trabajo.index:
        return pyo.Constraint.Skip
    if Tabla_maquinas_trabajo.loc[(j, m)].Predecesor == 0:
        return pyo.Constraint.Skip
    else:
        o = Tabla_maquinas_trabajo.loc[(j, m)].Predecesor[1]
        return model.X[j, o] + model.t_jm[(j, o)] * model.d[j] <= model.X[j, m]
- model.t_jm[(j, m)] * model.d[j]

model.Precedencia_entre_mismo_trabajo = Constraint(model.j, model.m,
rule=Precedencia_entre_mismo_trabajo)

#Restricción precedencia entre trabajos
def Precedencia_entre_trabajos(model, j,k,m):
    if (j,m) not in Tabla_maquinas_trabajo.index or (k,m) not in
Tabla_maquinas_trabajo.index :
        return pyo.Constraint.Skip
    if j != k:
        return model.X[j,m] + model.t_jm[(j,m)]*model.d[j]<= model.X[k,m] +
100000*(1-model.Z[j,k,m])

```

```

        else:
            return pyo.Constraint.Skip

model.Precendencia_entre_trabajos = Constraint(model.j,model.j,model.m,
rule=Precendencia_entre_trabajos)

# # Restricción precedencia de las máquinas
def precede_maquina(model, j,k,m):
    if (j,m) not in Tabla_maquinas_trabajo.index or (k,m) not in
Tabla_maquinas_trabajo.index :
        return pyo.Constraint.Skip
    if j != k:
        return model.Z[j,k,m] + model.Z[k,j,m] ==1
    else:
        return model.Z[j,k,m] == 0
model.precede_maquina = Constraint(model.j, model.j, model.m,
rule=precede_maquina)

# Makespan
def Makespan(model, j):
    m = Tabla_maquinas_trabajo.loc[j][-1:]
    m = m.Predecesor.values[0]
    return (model.X[j, m[1]] + model.t_jm[j, m[1]]*model.d[j])*(1/model.b[j]) <=
model.C

model.Makespan = Constraint(model.j, rule=Makespan)

# Determinación del tiempo final
def Tiempo_final(model, j,m):
    if (j,m) not in Tabla_maquinas_trabajo.index:
        return pyo.Constraint.Skip
    else:
        return model.X[j,m] + model.t_jm[(j,m)]*model.d[j]== model.W[j,m]

model.Tiempo_final = Constraint(model.Op, rule=Tiempo_final)

# Función Objetivo: Minimizar el Makespan
def objective_function(model):
    return model.C

model.obj = Objective(rule=objective_function, sense=minimize)

#Resolver el modelo

Solver = SolverFactory("glpk")
Solver.solve(model,timelimit=10000)

print("Objective value:", model.obj())

```

Anexo 3: Resultado obtenido al modelar 8 trabajos de estaciones.

Job	Machine	Start time	End time
1	1	133.8	175.4
	2	18627.1	18645.8
	3	18685.8	18725.8
	4	18789.1	18852.4
	5	18870.8	18889.1
	6	18930.8	18972.4
	7	23772.4	28572.4
	8	28630.8	28689.1
	9	28722.4	28755.8
2	1	121.3	133.8
	2	18621.5	18627.1
	3	18639.1	18651.1
	4	18670.1	18689.1
	5	18694.6	18700.1
	6	18712.6	18725.1
	7	22332.4	23772.4
	8	23789.9	23807.4
	9	23817.4	23827.4
3	1	81.3	121.3
	2	149.3	177.3
	3	237.3	297.3
	4	395.4	456.2
	5	665.2	874.2
	6	899.2	924.2
	7	3804.2	6684.2
	8	6719.2	6754.2
	9	22743.1	22763.1
4	1	0.0	65.3
	2	86.2	107.1
	3	151.9	196.7
	4	296.1	395.4
	5	518.6	641.8
	6	735.1	828.4
	7	11580.4	22332.4
	8	22463.1	22593.8
	9	22668.4	22743.1
5	1	71.3	76.6
	2	84.6	86.2
	3	145.5	149.1
	4	288.1	296.1

	5	507.6	517.5
	6	525.0	532.5
	7	1396.5	2260.5
	8	2271.0	2281.5
	9	2287.5	2293.5
6	1	76.6	81.2
	2	83.3	84.6
	3	149.1	151.9
	4	281.0	288.1
	5	506.3	507.6
	6	522.0	525.0
	7	1060.5	1396.5
	8	1400.5	1404.6
	9	1407.0	1409.3
7	1	65.3	68.0
	2	76.9	78.8
	3	82.8	86.8
	4	90.9	94.9
	5	108.8	122.8
	6	124.4	126.1
	7	868.5	1060.5
	8	1062.8	1065.1
	9	1066.5	1067.8
8	1	68.0	71.3
	2	72.8	74.3
	3	77.5	80.7
	4	85.8	90.9
	5	92.3	93.8
	6	97.1	100.5
	7	484.5	868.5
	8	873.1	877.8
	9	880.5	883.1

Anexo 4: Resultado obtenido al modelar 8 trabajos de rodillos.

Job	Machine	Start time	End time
1	10	368.1	386.5
	17	56755.0	61555.0
	18	61585.0	61615.0
	19	61673.3	61731.7
	14	61750.0	61768.3
	15	61788.3	61808.3
	16	61818.3	61828.3
	11	61835.0	61841.7

	12	61848.3	61855.0
	13	61861.7	61868.3
	22	61891.7	61915.0
	21	157254.2	157277.5
2	10	362.6	368.1
	14	57194.5	57200.0
	15	57218.5	57224.5
	16	57230.5	57233.5
	11	57238.5	57240.5
	12	57250.5	57252.5
	13	57254.5	57256.5
	22	57263.5	57270.5
	21	57277.5	57284.5
	20	373.3	378.5
3	10	351.6	362.6
	17	44275.0	47155.0
	18	56875.0	56893.0
	19	57108.3	57143.3
	14	57183.5	57194.5
	15	57206.5	57218.5
	16	57224.5	57230.5
	11	57234.5	57238.5
	12	57242.5	57246.5
	13	57250.5	57254.5
	22	149311.0	149325.0
	21	156890.2	156904.2
4	10	350.2	351.6
	14	47511.7	47513.1
	15	48115.0	48116.6
	16	48396.0	48396.8
	11	48589.0	48589.5
	12	48973.9	48974.5
	13	48975.0	48975.5
	22	49675.0	49676.9
	21	156888.3	156890.2
	20	372.0	373.3
5	10	348.3	350.2
	14	57181.7	57183.5
	15	57185.5	57187.5
	16	148375.0	148376.0
	11	148575.0	148575.7
	12	148674.3	148675.0
	13	148874.3	148875.0
	22	149308.7	149311.0

	21	156886.0	156888.3
	20	370.3	372.0
6	10	311.7	348.3
	17	47155.0	56755.0
	18	56815.0	56875.0
	19	56991.7	57108.3
	14	57145.0	57181.7
	15	147735.0	147775.0
	16	148205.0	148225.0
	11	148238.3	148251.7
	12	148661.0	148674.3
	13	148861.0	148874.3
	22	149262.0	149308.7
	21	156839.3	156886.0
7	10	0.0	275.0
	17	72275.0	144275.0
	18	144725.0	145175.0
	19	146050.0	146925.0
	14	147200.0	147475.0
	15	147775.0	148075.0
	16	148225.0	148375.0
	11	148475.0	148575.0
	12	148675.0	148775.0
	13	148875.0	148975.0
	22	149325.0	149675.0
	21	156904.2	157254.2
8	10	275.0	311.7
	14	47475.0	47511.7
	15	48075.0	48115.0
	16	48376.0	48396.0
	11	48575.7	48589.0
	12	48960.6	48973.9
	13	148847.7	148861.0
	22	149215.3	149262.0
	21	156792.6	156839.3
	20	359.7	370.3

Referencias

- Ambiente, C. N. (2001). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial*. Taller Metalmecánico. Santiago.
- Bowman, E. H. y Fetter, R. H. (1967). *Analysis for Production and Operation Management*. Nueva York: McGraw-Hill/Irwin.
- Cabello, C. (15 de Enero de 2021). *La Tercera*. Obtenido de <https://www.latercera.com/pulso/noticia/el-impacto-que-tuvo-la-pandemia-en-las-ventas-de-delivery-de-locales-de-comida-en-2020/JWJH4NSXLVGAFEGPRLK6JUX3IU/>
- Cerda, G. E. (2013). *Implementación del sistema de calidad HACCP en la elaboración de panetones*. Lima.
- Chase, R. B y Jacobs, F. R. (2014). *Administración de Operaciones. Producción y cadena de suministro*. México: McGrawHill.
- Chase, R. B, Jacobs, F. R, Aquilano, N. J. (2009). *Administración de operaciones* (12 ed.). Mc Graw Hill.
- Chile, G. d. (Marzo de 2018). *Política Nacional de Inocuidad de los Alimentos 2018-2030*. Obtenido de <https://www.achipia.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/POLITICA-DE-LA-INOCUIDAD-2018-2030-1.pdf>
- Codelco. (2018). *Codelco Educa*. Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/extraccion.html>
- Department, S. R. (19 de Mayo de 2022). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/1284650/participacion-del-pib-de-la-industria-minera-en-chile/#:~:text=En%202021%2C%20el%20sector%20minero,más%20que%20el%20año%20anterior>
- Earle, M. (1997). Innovation in the food industry. En *Trends in Food Science & Technology* (Vol. 8, págs. 166-175). doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)01026-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01026-1)
- Fernández, R. P. (2007). *Apuntes de econometría*. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso: ICIPEV.
- Foundation, P. S. (2023). *Python*. Obtenido de <https://docs.python.org/es/3/tutorial/>
- Garcete, A, Benítez, D, Pinto Roa, D, y Vasquez, A. (2017). Técnica de pronóstico de la demanda basada en Business Intelligence y Machine Learning. In *Simposio Argentino sobre Tecnología y Sociedad (STS)-JAIIO 46*.
- Gobierno de Chile. (22 de Enero de 2019). *Invest Chile*. Obtenido de <http://blog.investchile.gob.cl/bloges/chile-apunta-a-una-industria-de-alimentos-saludables>
- Gobierno de Chile. (2021). *Invest Chile*. Obtenido de <https://investchile.gob.cl/es/industrias-clave/industria-alimentaria/>
- Gomez, C y Elizalde, R. (2009). Trabajo, tiempo libre y ocio en la contemporaneidad: Contradicciones y

- desafíos. *Polis, Volumen 8*(22), 249 - 266.
- Gómez, P. G. (2019). *A memetic algorithm for the job shop*.
- Heizer, J y Render. B. (2001). *Dirección de la Producción. Decisiones Tácticas* (6 ed.). Madrid: Pearson Education.
- Heyzer, J. &. (2007). *Dirección de la producción de operaciones. Decisiones tácticas*. Madrid: Editorial: Pearson .
- Luque, P. L. (2000). *Lenguaje AMPL*.
- M. Malagie, G. Jensen, J.C Graham y Donald L. Smith. (2012). Procesos de la Industria alimentaria. En D. Berkowitz (Ed.), *Industria alimentaria. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)*. Obtenido de <https://www.jmcpnl.net/OIT%20completa/67.pdf>
- Machinenfabrik. (2021). Presentación Comercial. Santiago y Antofagasta.
- Maschinenfabrik. (2022). *Planos de Producción*.
- Mena, R. (2021). Administración de inventarios. Gestión de Operaciones I. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Mena, R. (2021). Pronóstico de la demadna y monitoreo de errores. Gestión de Operaciones I. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Metalmecánicas, A. d. (Diciembre de 2022). 84 años por un Chile industrial ASIMET fuerza gremial. Santiago.
- Minería, S. N. (2022). *SERNAGEOMIN*. Obtenido de [https://www.sernageomin.cl/recursos-minerales/#:~:text=Los%20Recursos%20Minerales%20Metálicos%20\(RMM,productores%20de%20cobre%20del%20mundo.\)](https://www.sernageomin.cl/recursos-minerales/#:~:text=Los%20Recursos%20Minerales%20Metálicos%20(RMM,productores%20de%20cobre%20del%20mundo.))
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la producción y las operaciones*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Nahmias, S., Castellanos, A. T., Murrieta, J. E. M., Hernández, F. G., Nudiug, B., Juaárez R. A., y Milanés, J. Y. (2007). *Análisis de la producción y las operaciones* (5ta ed., Vol. 57). McGraw-Hill Interamericana.
- Operaciones, G. d. (2016). *Gestión de Operaciones*. Obtenido de <https://www.gestiondeoperaciones.net/procesos/caracteristicas-de-un-proceso-productivo-job-shop-produccion-tipo-taller/>
- Osorio Gómez, J. C., Castrillón Montenegro, O. E., & Toro Cardona, J. A. (2008). Modelo de programación jerárquica de la producción en un Job shop flexible con interrupciones y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. *Redalyc*, 72 - 79.
- Parada, J. (2006). *Sistema de inventario*. Caracas: Ediciones Punto Cero.
- Rodríguez. S, R., Rojo. M, G. E., Martínez. R, R., Piña. R, H. H., Ramírez. V, B., Vaquera. H, H., y Cong. H, M. D. L. C. (2014). Envases inteligentes para la conservación de alimentos. *Redalyc*, 10(6), 151 - 173.
- S.A, A. A. (2015). *Caracterización de la industria metalúrgica y metalmecánica en relación a su capital*

humano y tecnológico. Santiago: ASIMET CAPACITACIÓN.

- S.L.U, M. I. (9 de JULIO de 2020). *Inter 2000*. S.L.U. Obtenido de <https://www.inter2000mecanizados.com/post/que-es-la-metalmechanica>
- Santamaria, M. R. (2010). Tecnologías emergentes. En *Industria alimentaria*. Catalunya: Univ. Politéc.
- SERNAGEOMIN. (2020). *Anuario de la Minería de Chile*. Obtenido de https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_de_%20la%20Mineria_de_Chile_2020_290621.pdf
- Sinha, S. (2006). En *Mathematical Programming*. Elsevier.
- Tapia, D. (6 de Febrero de 2019). Obtenido de Revista Nueva Minería y Energía: <https://www.nuevamineria.com/revista/correas-transportadoras-soluciones-innovadoras-desde-la-industria-minera/>
- Tapia, D. (29 de Mayo de 2020). Obtenido de Revista Nueva Minería y Energía: <https://www.nuevamineria.com/revista/correas-transportadoras-enfrentando-un-nuevo-escenario/>
- TVN. (28 de Mayo de 2019). *TVN*. Obtenido de <https://www.tvn.cl/programas/nadatedetiene/comida/ecook-3340596>
- Xia. W y Wu. Z. (2005). An effective hybrid optimization approach for multi-objective. *Elsevier*, 409 - 410.