



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
CIVIL INDUSTRIAL



# OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE PRODUCCIÓN EN PLANTAS DE MADERA EN CMPC MADERAS SPA.

POR

**Estefanía Isabel Matus Matus**

Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial

**Profesores guía:**

Carlos Contreras Bolton

**Ingeniero Supervisor:**

Sergio Cuevas Mardones

Abril 2024

Concepción (Chile)

© 2024 Estefanía Isabel Matus Matus

© 2024 Estefanía Isabel Matus Matus

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **Resumen**

La presente memoria de título tiene como objetivo abordar un problema de planificación de producción en las plantas de aserradero de CMPC Maderas. El problema actual de CMPC Maderas es la ineficiencia y limitaciones del proceso manual de planificación de producción en la industria maderera, que depende en gran medida de la experiencia de los planificadores y datos históricos, resultando en una distribución subóptima y tiempos prolongados de planificación. Para superar este problema, este trabajo propone un modelo que asigna la cantidad de pedidos a cumplir por cada planta de aserradero, determina los períodos en que se deben realizar los procesos necesarios para satisfacer el pedido y determina en qué máquinas se debe realizar cada uno de los procesos, garantizando el cumplimiento de la demanda y optimizando el uso de los recursos disponibles. Mientras, las restricciones asociadas al problema tienen relación con la capacidad de producción, límites de tiempo, uso de la materia prima, entre otros. El modelo propuesto está basado en programación lineal y se resuelve mediante el solucionador OR-tools de Google. El modelo computacional muestra un aumento promedio del 7% en el cumplimiento de la demanda y una reducción significativa en el tiempo de planificación, logrando asignar los pedidos de manera más precisa y eficiente. Además, los resultados evidencian una mejora en la utilización de recursos y la capacidad de anticipar y optimizar el uso de stock en cada periodo. Por lo tanto, el modelo propuesto optimiza la planificación de producción, superando las limitaciones del enfoque manual y mejorando significativamente la eficiencia operativa en la industria maderera.

## **Abstract**

This thesis aims to address a production planning problem in the sawmill plants of CMPC Maderas. The current problem of CMPC Maderas is the inefficiency and limitations of the manual production planning process in the timber industry, which relies heavily on the experience of planners and historical data, resulting in suboptimal distribution and extended planning times. To overcome this problem, this work propose a model that assigns the number of orders to be fulfilled by each sawmill plant, determines the periods in which the necessary processes must be carried out to meet the order, and specifies which machines should perform each process, ensuring demand fulfillment and optimizing the use of available resources. Meanwhile, the constraints associated with the problem are related to production capacity, time limits, raw material usage, among others. The proposed model is based on linear programming and solved using Google's OR-tools solver. The computational model showed an average increase of 7% in demand fulfillment and a significant reduction in planning time, achieving more precise and efficient order assignment. Additionally, the results shows an improvement in resource utilization and the ability to anticipate and optimize stock usage in each period. Therefore, the proposed model optimizes production planning, overcoming the limitations of the manual approach and significantly enhancing operational efficiency in the timber industry.

# Índice de Contenidos

Resumen .....	3
Abstract .....	4
1. Introducción .....	8
1.1. Objetivos .....	10
1.1.1 Objetivo general .....	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
1.2 Organización del documento.....	10
2. Definición del problema de asignación en el plan de producción.....	12
2.1 Contexto del negocio de aserraderos.....	12
2.2 Marco de asignación del plan de producción .....	24
2.3 Problema abordado.....	28
2.4 Revisión de Literatura .....	29
3. Modelo Propuesto .....	32
3.1 Definición formal del problema abordado .....	32
3.2 Planteamiento del modelo .....	33
4. Resultados .....	38
4.1 Instancias de prueba .....	38
4.2 Interacción con el sistema Capacity .....	40
4.2 Resultados del modelo .....	40
5. Conclusiones .....	51
6. Referencias .....	53

## Índice de Tablas

Tabla 1: Clientes analizados.....	12
Tabla 2: Ejemplo de pedidos realizados por diferentes clientes. ....	13
Tabla 3: Máquinas por procesos.....	21
Tabla 4: Rutas.....	21
Tabla 5. Notación del modelo propuesto. ....	34
Tabla 6: Características de los escenarios. ....	39
Tabla 7: Comparación entre los resultados del programa y los planificadores.....	40
Tabla 8: Extracto de resultados producción contra pedido obtenidos por el modelo. ....	43
Tabla 9: Extracto de resultados producción contra pedido realizada por los planificadores de planta. .....	43
Tabla 10: Cumplimiento de la demanda en cada escenario. ....	45
Tabla 11: Extracto de la carta Gantt planificación de producción en <b>m3</b> para el escenario 1. ....	46
Tabla 12: Extracto de resultados porcentaje de uso de máquinas por periodo. ....	47
Tabla 13: Extracto de resultados cumplimiento de fecha de entrega de los pedidos. ....	48
Tabla 14: Extracto de resultados de ingreso y costos por pedidos.....	49
Tabla 15: Extracto de resultados de ingreso y costos por pedidos.....	50

## Índice de Figuras

Figura 1: Materia prima, rollizos de madera podada. ....	14
Figura 2: Material seco en dos estados distintos. ....	16
Figura 3: Conversión material prima a producto terminado. ....	17
Figura 4: Nomenclatura del producto.....	17
Figura 5: Dos esquemas de corte.....	18
Figura 7: Ejemplo cumplimiento de la demanda de un producto con producción y stock. ....	26

## 1. Introducción

La industria forestal comprende una amplia variedad de productos derivados del bosque, tales como papel, cartón, celulosa, madera, entre otros. La eficiencia se convierte en un aspecto crucial para las empresas de esta industria, especialmente considerando la alineación de los ciclos naturales de la madera con la demanda de productos finales. En este contexto altamente competitivo, la planificación de la producción, en sus distintos niveles, emerge como un factor esencial para enfrentar estos desafíos y mantener una posición competitiva.

En Chile, la industria forestal desempeña un papel fundamental en la economía, contribuyendo significativamente al producto interno bruto (PIB) con alrededor del 3%. Esta representa una fuente primordial de ingresos a través de las exportaciones y alcanzaron los US\$6602,86 millones en productos forestales durante diciembre de 2022 (Instituto Forestal, 2024).

A lo largo de los años, la demanda y las posibilidades de exportación han aumentado debido a la creciente internacionalización e industrialización que ha experimentado la industria. Por ello, actualmente la participación en la industria forestal es más exigente, en comparación a décadas pasadas (Zhang et al. 2014). Por tanto, para países exportadores como Chile, es de vital importancia una adecuada organización de los procesos (Rönnqvist 2003).

CMPC (Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones) es una compañía especializada en la fabricación y venta de productos derivados de la madera, como madera aserrada, remanufacturas y paneles contrachapados. La mayor parte de su producción es destinada a la exportación, con un significativo porcentaje dirigido a regiones como Asia, Oceanía, Europa y América del Norte. Dentro de su cadena de suministro se encuentran procesos logísticos que incluyen la coordinación del transporte, la gestión de compras de bienes y servicios, y el almacenamiento de las materias primas y productos finales.

Este escenario presenta un desafío significativo a nivel de producción. Por tanto, CMPC para mantenerse como una empresa competitiva, ha desarrollado diversas estrategias e investigaciones para seguir mejorando en este aspecto. Esta búsqueda constante de eficiencia se extiende a todas sus divisiones, incluida CMPC Maderas, la cual tiene como propósito incrementar el valor de los recursos forestales mediante la manufactura y comercialización de productos derivados de la madera.

En la actualidad, CMPC Maderas está implementado un sistema avanzado de simulación y optimización llamado "Capacity". Este sistema está diseñado para la planificación integral de todas las instalaciones de aserrío y reacondicionamiento pertenecientes a CMPC. La planificación está estructurada en tres niveles: estratégico (anual), táctico (mensual-semanal) y operativo (hora-hora). Además, se desglosa en cuatro fases clave: esquematización de cortes, balance de procesos, asignación y programación diaria.

En la fase de esquematización de cortes, se busca generar patrones de corte en función a las características de los trozos y las máquinas disponibles, con el objetivo de lograr un mejor aprovechamiento de la materia prima. En la etapa de balance de procesos, se evalúa la capacidad de las diferentes máquinas que pueden desarrollar un mismo proceso en las plantas disponibles, con el fin de identificar las limitaciones de producción de cada máquina y distribuir los pedidos teniendo en cuenta tanto la capacidad como la disponibilidad de dichas máquinas. Luego, la siguiente etapa asigna la producción de los pedidos a las diferentes plantas, basado en el stock de materia prima con que cuenta cada planta y el balance de procesos realizado en la etapa anterior. Finalmente, ya con una demanda de producción en cada planta se procede a la etapa de planificación diaria. Este genera una carta Gantt que organiza la producción de los pedidos con el objetivo de reducir los tiempos de entrega de estos. El funcionamiento correcto de todas las etapas permite conocer de forma global la disponibilidad y capacidad de las máquinas en las plantas y de esta forma evitar pérdidas a la hora de planificar. A diferencia de como se hace actualmente, en donde la asignación de pedidos se realiza solo en función de la disponibilidad de las plantas en el momento de realizar la planificación.

Este trabajo está inserto dentro del marco de la etapa de asignación para la elaboración del plan de producción para las plantas de CMPC a nivel táctico y operativo. Este proceso consiste en una serie de actividades que tienen como objetivo decidir dónde y en qué momento fabricar los productos demandados para satisfacer la demanda de los clientes. De esta manera, el objetivo de este trabajo es modelar la asignación de la producción a las distintas plantas de CMPC, considerando el ingreso por los productos, los costos de producción en los procesos, los plazos de entrega, capacidades de las plantas, entre otros aspectos relevantes. Por consiguiente, se debe maximizar las ganancias antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización (EBITDA), esta función se debe limitar por las restricciones propias del problema, como la disponibilidad de horas en cada planta, y la capacidad de producción de las máquinas, entre otras.

En el contexto de esta investigación, se lleva a cabo el modelamiento de la asignación de la producción en CMPC Maderas a través de un modelo de programación lineal. La elección de esta metodología se respalda en su eficacia, rapidez y precisión, lo que lo convierte en una herramienta apropiada para mejorar la eficiencia operativa en CMPC Maderas.

Debido a que CMPC Maderas se dedica a la producción y comercialización de madera aserrada en diversos formatos, incluyendo aserradero, remanufactura y paneles. Este proyecto se enfoca específicamente en el área de aserradero, más precisamente en productos aserrados secos. No obstante, como se detalla más adelante, el modelo desarrollado puede ser adaptado y replicado en distintas áreas de producción mediante las modificaciones correspondientes. Por tanto, este enfoque busca no solo optimizar el rendimiento financiero, sino que también proporcionar una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia operativa y la toma de decisiones en la empresa.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Implementar un modelo para la optimizar la elaboración de un plan de producción en CMPC Maderas.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Realiza una revisión de la literatura de problemas similares en la industria forestal.
- Plantear la problemática de la elaboración del plan de producción.
- Diseñar un modelo matemático que represente la problemática de elaboración del plan de producción definido.
- Implementar el modelo y generar soluciones adecuadas al problema planteado.
- Analizar los resultados obtenidos, comparando los resultados con un plan de producción realizado por el área de planificación.

## **1.2 Organización del documento**

La presente memoria de título está estructurada de la siguiente manera: El Capítulo 1 presenta la introducción, que establece el contexto y los objetivos del trabajo. El Capítulo 2 entrega el contexto del negocio de los aserraderos y describe los factores clave que determinan la complejidad de la

asignación del plan de producción. Además, se presenta la revisión de la literatura, ofreciendo una mirada general de los estudios previos relacionados con la asignación en el contexto de aserraderos. El Capítulo 3 realiza el planteamiento formal del problema de asignación y el modelo de programación lineal. Los detalles específicos de las instancias utilizadas se discuten en el Capítulo 4, planteando diferentes escenarios de prueba y comparando el modelo planteado con datos de los trimestres anteriores. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones principales, destacando el impacto de los resultados y proponiendo posibles líneas de investigación futuras.

## 2. Definición del problema de asignación en el plan de producción

Este capítulo introduce el entorno empresarial de los aserraderos, proporcionando un marco contextual para el problema en cuestión. Se detallan diversos aspectos relacionados con la asignación en el plan de producción, se presenta el marco del proyecto "Capacity" y se lleva a cabo una revisión de la literatura pertinente.

### 2.1 Contexto del negocio de aserraderos

Es necesario primero describir conceptos clave de la producción en los aserraderos, con el propósito de establecer una base que permita comprender la problemática de planificación de producción que se aborda más adelante. A continuación, se describen los siguientes conceptos:

#### Cliente

El término cliente se refiere a cualquier empresa u organización que adquiere bienes proporcionados por CMPC Maderas. Estos clientes se clasifican en dos categorías: nacionales e internacionales. En el caso de los clientes internacionales, se agrupan según su país de origen. Esta distinción se basa en la necesidad de cumplir con fechas de entrega más rigurosas, ya que el comercio internacional implica utilizar transporte marítimo, el cual está ligado a fechas de embarque que se realizan con una frecuencia mucho menor en comparación con los clientes nacionales, que se transportan mediante camiones y tienen una frecuencia más elevada. Debido a esta diferencia en la logística, se otorga prioridad a la satisfacción de la demanda de los clientes internacionales. La Tabla 1 presenta los principales clientes con los que se desarrolla el análisis de este proyecto y a que tipo de cliente corresponde.

**Tabla 1: Clientes analizados.**

Conjuntos	Abreviación	Tipo de Cliente
China	CN	Internacional
Corea del Sur	KR	Internacional
Remanufactura	Rema	Nacional

Remanufactura es considerado un cliente interno ya que corresponde a la demanda que establece CMPC Maderas en el negocio de Remanufactura para satisfacer la producción de productos que se

procesan dentro de la misma empresa. Se establece un precio y costo específicos para los productos, al igual que se hace para los clientes externos, esto con el objetivo de llevar un seguimiento detallado de los diferentes negocios del área de madera por separado. Al ser un cliente interno, también se considera una mayor holgura dentro de los plazos al momento de realizar el plan de producción.

## Pedido

Un pedido corresponde a la demanda de una determinada cantidad de un producto por parte de un cliente, el pedido tiene asociado un id, un producto, un cliente, un plazo de entrega y un precio de venta establecido. La Tabla 2 presenta un listado de pedidos con sus correspondientes características.

**Tabla 2: Ejemplo de pedidos realizados por diferentes clientes.**

ID	Producto	$m^3$	Cliente	Plazo	Precio (US)
0	C_Grado_A_13.5_68.0_4000	1000,00	KR	08/08/2023	217
1	Rema_G_A_13.5_78.0_4500	28,42	KR	08/08/2023	222
2	C_Grado_A_58.0_78.0_4900	31,35	KR	30/10/2023	201
3	C_Grado_A_16.5_78.0_4900	40,00	Rema	01/08/2023	197
4	C_Grado_A_22.5_78.0_4900	220,00	Rema	05/08/2023	197
5	Rema_G_A_13.5_78.0_4500	100,00	CN	20/08/2023	180
6	C_Grado_A_58.0_78.0_4900	4000,00	CN	20/08/2023	200
7	C_Grado_A_78.0_78.0_4000	88,50	CN	05/09/2023	200
8	Lateral_G_A_48.0_78.0_4000	33,00	CN	05/09/2023	222
9	Lateral_G_A_48.0_78.0_4000	33,00	CN	20/10/2023	197
10	C_Grado_A_58.0_68.0_4000	80,01	CN	20/10/2023	197

En la Tabla 2, se puede observar la diversidad de pedidos realizados por un mismo cliente, abarcando diferentes productos y fechas de entrega. Por ejemplo, un cliente puede solicitar dos productos distintos con la misma fecha de entrega, como se muestra en los pedidos de ID 1 y 2 para el cliente Corea. Por el contrario, podría requerir un mismo producto en fechas diferentes, como se evidencia en los pedidos de ID 8 y 9 para el cliente China. Además, se percibe una variación en los precios para un mismo producto destinado a clientes diferentes como se aprecia en los pedidos de ID 1 y 5. Esto es debido principalmente a los costos de transporte asociados a cada país y las negociaciones realizadas con cada uno. En cuanto a los clientes de remanufactura, se aplica un precio estándar para todos los productos como se aprecia en los pedidos de ID 3 y 4. Los precios para remanufactura son referenciales ya que, como se mencionó anteriormente, no existe un costo para la empresa al adquirir los productos desde el negocio de aserradero hacia el negocio de remanufactura, si no que esto se realiza para llevar una mejor contabilidad de los negocios por separado.

## Producto

Bajo este contexto, un producto se refiere a las diferentes formas de madera aserrada y otros derivados de la madera producidos y comercializados por CMPC Maderas en el negocio de aserradero. Estos productos se pueden dividir según la etapa de procesamiento en la que se encuentra que corresponden a materia prima, producto verde, material en proceso y producto terminado.

## Materia prima

En el caso de la madera aserrada, la materia prima consiste en rollizos o trozos de madera con corteza obtenidos directamente del bosque. Estos trozos se caracterizan principalmente por su origen, que puede ser podado o no podado. Los trozos podados son de mayor calidad debido al cuidado más exhaustivo que se les brinda desde su plantación, en comparación con los árboles no podados. Por lo tanto, los productos provenientes de árboles podados tienen un mayor valor en el mercado y pueden venderse a precios más elevados. La Figura 1, presenta un conjunto de rollizos podados en la forestal Mininco de CMPC.



**Figura 1: Materia prima, rollizos de madera podada.**

**Fuente:** Manual de producción y abastecimiento forestal Mininco (CMPC, 2010).

Cada trozo de madera posee dimensiones específicas, que incluyen ancho, espesor y largo, las cuales oscilan entre 10 y 150 centímetros de espesor, 40 y 350 centímetros de ancho, y 2 a 5 metros de largo. De manera similar, cada producto tiene dimensiones de referencia por lo que no todos los trozos son aptos para la fabricación de todos los productos demandados. Por ejemplo, si se necesita producir un producto con dimensiones de  $140\text{ cm} \times 300\text{ cm} \times 4,5\text{ m}$ , este no podría originarse a partir de un trozo con dimensiones inferiores a  $145\text{ cm} \times 310\text{ cm} \times 5\text{ m}$ . Esto se debe a la consideración de un

factor de pérdida de los procesos que conducen a la obtención del producto final con las dimensiones mencionadas. Por consiguiente, la gestión del abastecimiento y el control del inventario de la materia prima son cruciales al determinar qué pedidos se pueden cumplir y cuáles deben ser rechazados o pospuestos de acuerdo con la planificación de abastecimiento desde los bosques.

La materia prima experimenta una serie de etapas, que incluyen descortezado, aserradero y reproceso, con el objetivo de transformarse en un producto verde. En la fase de descortezado, el trozo es sometido a una secuencia de sierras que eliminan la corteza. En cuanto al aserradero y reproceso, el trozo se corta siguiendo un patrón específico, conocido como esquema de corte, que determina la variedad de productos verdes que se pueden obtener.

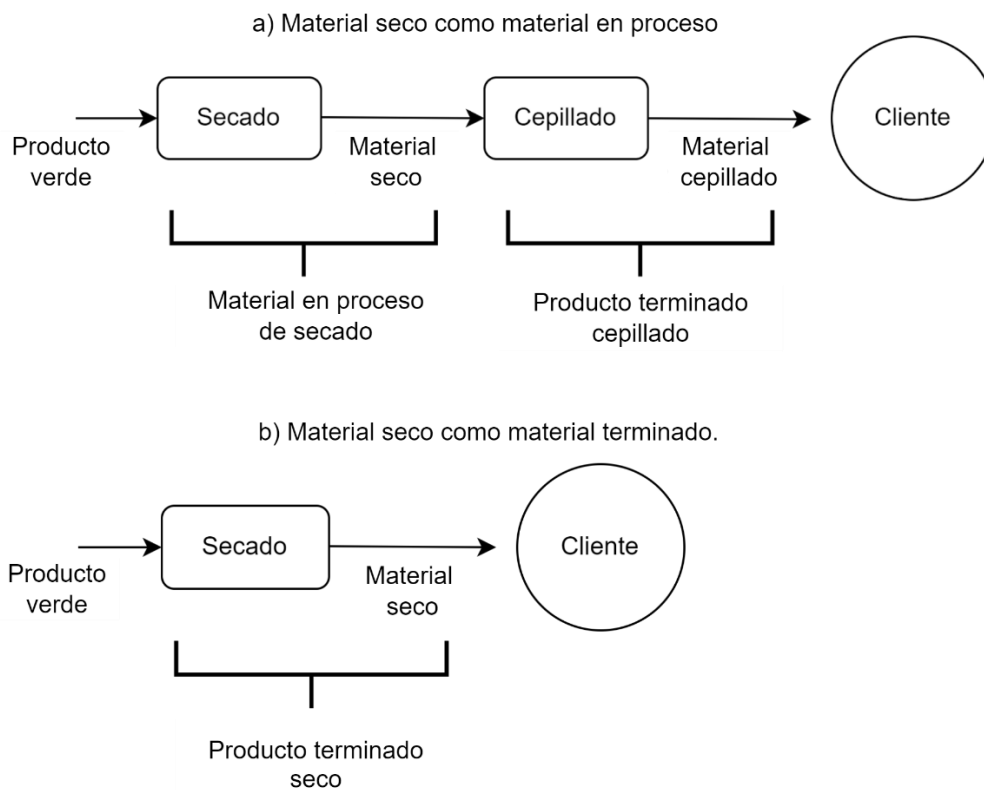
### **Producto verde**

Los clientes pueden solicitar diferentes tipos de productos, que se distinguen principalmente entre productos verdes y productos secos. Un producto verde se obtiene al pasar por las fases de aserradero y reproceso. Este tipo de producto puede destinarse para satisfacer la demanda específica de productos verdes solicitada por los clientes, ajustando sus dimensiones según la demanda establecida. Alternativamente, puede dirigirse al proceso de secado, donde se generan productos secos.

En caso de optar por la producción de productos secos, el producto verde debe someterse a una serie adicional de procesos hasta transformarse en el producto final entregado al cliente. El producto verde que atraviesa por procesos adicionales se denomina material en proceso.

### **Material en proceso**

Un material en proceso se refiere a un producto verde que experimenta procesos adicionales después del aserradero y el reproceso, con el propósito de obtener productos más elaborados que son solicitados por los clientes. Por ejemplo, si existe una demanda de un producto seco-cepillado, se requiere que un producto verde pase por el proceso de secado y cepillado. Este es clasificado como un “material en proceso de secado” durante la etapa de secado y, al finalizar el cepillado, se convierte en un “producto terminado cepillado”. En cambio, si lo que se requiere es un producto seco, el producto verde solo debe pasar por el proceso de secado y por ende este se clasifica como producto terminado.



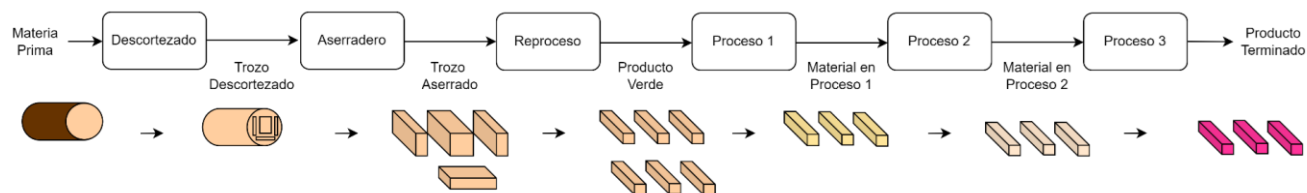
**Figura 2: Material seco en dos estados distintos.**

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 2a) se aprecia como el material seco se puede clasificar como un material en proceso si se utiliza para ser consumido por otro proceso posterior. Por otro lado, el mismo material seco en la Figura 2b) es clasificado como producto terminado ya que se utiliza para satisfacer directamente la demanda de un cliente.

### **Producto terminado**

El material en proceso se transforma en un producto terminado cuando ha completado todos los procesos necesarios para alcanzar las dimensiones y cualidades específicas requeridas por un determinado cliente. En la Figura 3, se presenta gráficamente como la materia prima se convierte en producto terminado, atravesando por distintos procesos.

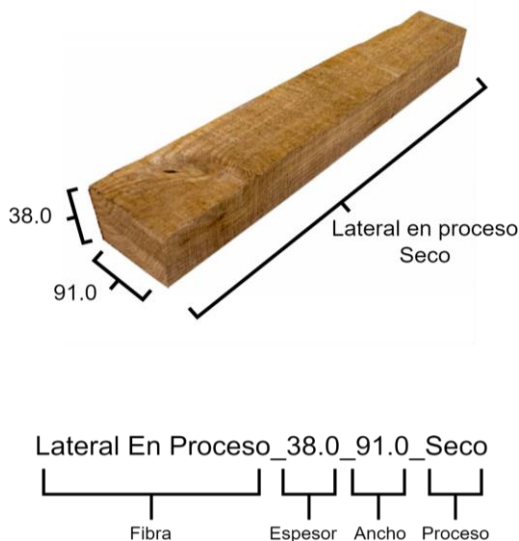


**Figura 3: Conversión material prima a producto terminado.**

**Fuente:** Elaboración propia.

### Características del producto

Los productos verdes, los materiales en proceso y los productos terminados cuentan con diferentes características propias de la composición de la materia prima de la cual se extrajo y los procesos que hayan atravesado. Las propiedades y características de los materiales cambian al pasar por un proceso. Por ello, se lleva el registro dentro de las bases de datos y los productos se denominan por sus características principales que son: fibra, ancho, espesor y largo, como se presenta en la Figura 4.



**Figura 4: Nomenclatura del producto.**

**Fuente:** Elaboración propia.

El tipo de fibra se divide entre central y lateral, esta característica corresponde a la parte del trozo de tronco de donde se extrae el producto verde en el proceso de aserradero. Las piezas centrales corresponden al centro del tronco y tienen mayor dimensión, mientras que las piezas laterales

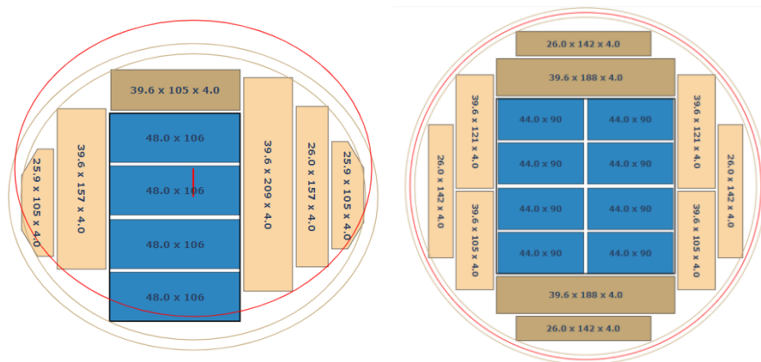
corresponden a piezas que se extraen de los lados del tronco. En tanto, el espesor, ancho y largo de las piezas corresponden a las dimensiones de volumen de las tablas de madera.

Las dimensiones de los productos verdes están determinadas por el esquema de corte utilizado en el procesamiento de la materia prima. En el caso de los materiales en proceso, las dimensiones pueden disminuir entre un proceso y otro debido a un factor de pérdida asociado a la madera, que se convierte en aserrín.

Una característica que no se considera dentro de la nomenclatura, pero es relevante a la hora de realizar la planificación de producción es la calidad. La calidad es un porcentaje que está dado por la presencia de nudos, firmeza de los nudos, porcentaje de canto muerto, entre otras irregularidades en un producto, mientras menor es este porcentaje, mejor es la calidad de la pieza.

### Esquema de corte

Un esquema de corte es un patrón que indica de qué forma disponer las sierras en el aserradero para cortar un tronco y obtener productos verdes determinados por el patrón seleccionado. Dependiendo del esquema que se utilice variarán los productos obtenidos. La Figura 5 presenta un ejemplo de cómo para un mismo trozo con dos esquemas de corte diferentes se pueden obtener distintos resultados. Además, se puede observar que los rectángulos azules representan productos verdes de fibra central y los rectángulos color café corresponden a productos laterales.



**Figura 5: Dos esquemas de corte.**

**Fuente:** Software Capacity, CMPC Maderas.

La Figura 3 muestra dos esquemas de corte distintos, ilustrando cómo, a partir de un mismo trozo, es posible lograr diversas distribuciones que generan una variedad de combinaciones de productos

verdes. Por esta razón, la elección de los esquemas de corte se vuelve relevante para obtener la máxima cantidad de productos verdes necesarios para satisfacer la demanda y a su vez utilizar la menor cantidad de materia prima posible.

En función de los productos verdes deseados y el esquema de corte seleccionado para su obtención, la materia prima puede ser procesada exclusivamente a través del aserradero o necesitar también someterse al reproceso. Este último proceso implica la realización de cortes adicionales a los productos verdes obtenidos durante el aserradero, con el fin de lograr productos con dimensiones más pequeñas.

### **Procesos**

Un proceso corresponde a una conversión por la que debe pasar un producto para convertirse en otro producto de cualidades y/o dimensiones diferentes. Cada proceso tiene como objetivo modificar o adaptar el producto para cumplir con estándares y requisitos establecidos por la demanda de los clientes. Estos procesos abarcan diversas operaciones como el baño, secado, clasificado, impregnado, cepillado, entre otros, y su aplicación varía según el tipo de producto y los objetivos específicos de fabricación. A continuación, se detallan los procesos:

- **Baño:** En este proceso, la madera es bañada en productos químicos que evitan el ataque de hongos y la aparición de manchas. Esto es necesario para los productos que se venden sin secar, los cuales tienen un alto contenido de humedad. Para el análisis de capacidad y rendimiento en el proceso de baño, es relevante determinar factores como el tipo de madera que ingresa al proceso, el tiempo de inmersión, el tiempo escurrido, además de los químicos y consumos según producto.
- **Secado:** En el proceso de secado, la madera es ingresada a grandes cámaras donde se genera un ambiente con altas temperaturas para vaporizar el agua dentro de la madera. Al evaluar la capacidad de secado para los distintos tipos de madera, se analizan parámetros tales como el tiempo de los ciclos de secado, las cámaras disponibles, la tasa de ocupación de las cámaras y la disponibilidad de energía térmica.
- **Cepillado:** En el proceso de cepillado, las tablas de madera son ingresadas a sierras y lijas que le otorgan una forma homogénea a la madera que se procesa. Este proceso se ve afectado por las velocidades de la línea y dimensiones del producto que se desea procesar.
- **Clasificado:** El proceso de clasificado consiste en separar las piezas de madera según sus

características, ya sea para atravesar a otro proceso o para ser entregado al cliente según las medidas que requiera.

- **Impregnado:** Este proceso implica tratar la madera con sustancias químicas para mejorar su resistencia, durabilidad y protección contra insectos y hongos. Se realiza mediante la aplicación de soluciones químicas en un ambiente presurizado, permitiendo que los agentes químicos penetren profundamente en las fibras de la madera.

## Máquinas

Las máquinas corresponden a grandes instalaciones que permiten llevar a cabo un determinado proceso. Dependiendo de sus características, cada máquina realiza un proceso con un rendimiento, un ritmo y costo asociado.

- **Rendimiento:** se define como la eficacia de la máquina al medir la proporción de productos producidos en relación con el material consumido. En otras palabras, el rendimiento indica la capacidad de producir un material a partir del consumo de un material. Este indicador se expresa comúnmente mediante la Ecuación (1).

$$Rendimiento = \left( \frac{Cantidad\ de\ Material\ Producido}{Cantidad\ de\ Material\ Consumido} \right) \quad (1)$$

Un rendimiento más alto sugiere una mayor eficiencia ya que se está generando más producto con la misma cantidad de material, lo cual es deseable para maximizar la eficiencia y reducir costos.

- **Ritmo:** se refiere a la cantidad máxima de producción o trabajo que una máquina puede realizar en un periodo de tiempo determinado. Esta medida suele expresarse en términos de unidades de producto, operaciones o trabajo completado por unidad de tiempo, como por ejemplo, unidades por hora o piezas por día. El ritmo de una máquina puede estar sujeta a limitaciones físicas, técnicas o de recursos.
- **Disponibilidad:** se refiere al período de tiempo de funcionamiento efectivo en el cual la máquina está operativa y puede llevar a cabo su tarea. Una alta disponibilidad indica que la máquina está operativa durante una proporción significativa del tiempo total disponible dentro de los turnos de trabajo dentro de las plantas, lo que contribuye a una producción más eficiente y efectiva. Por otro lado, una baja disponibilidad podría sugerir problemas de mantenimiento, tiempos de inactividad no planificados u otros desafíos que afectan la eficiencia del proceso.

- **Costo:** se refiere al gasto asociado al uso de una máquina al momento de fabricar un producto. Este costo abarca tanto los elementos fijos como los variables relacionados con la operación y mantenimiento de la máquina en el proceso productivo.

Estas características varían dependiendo del proceso, la máquina y el producto. Distintas máquinas pueden realizar un mismo proceso con un mismo producto, pero se pueden diferenciar tanto por su rendimiento, ritmo, disponibilidad y costo. Por tanto, en la planificación se debe evaluar cuál es la alternativa óptima para procesar los productos.

No todas las máquinas pueden llevar a cabo todos los procesos. En la Tabla 3, se detallan los procesos que fueron objeto de análisis en este proyecto y las máquinas asociadas a cada uno de ellos.

**Tabla 3: Máquinas por procesos.**

<b>Proceso</b>	<b>Máquina</b>
Baño	Baño_Bucalemu Baño_Nacimiento
Clasificado	Clasificado_Bucalemu Clasificado_Nacimiento Clasificado_Mulchen Clasificado_Loncoche
Cepillado	Cepillado_Bucalemu Cepillado_Nacimiento Cepillado_Mulchen Cepillado_Loncoche
Secado	Secado_Bucalemu Secado_Nacimiento Secado_Mulchen

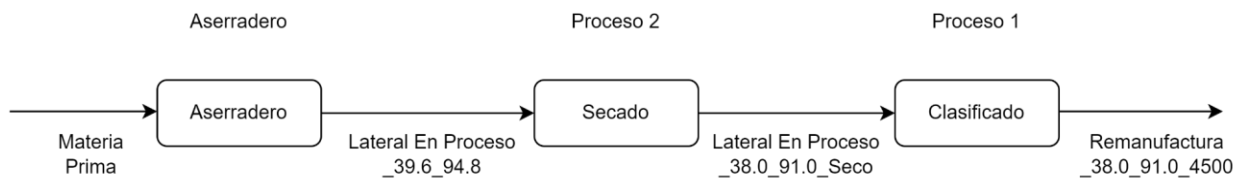
## Ruta

Una ruta corresponde a un conjunto específico de procesos que un producto verde debe atravesar para transformarse en un producto terminado. En este proyecto, las rutas comprenden los procesos desde el aserradero, que es el último proceso dentro de la ruta, mientras que el primer proceso es aquel que entrega el producto terminado. En la Tabla 4 se presentan las principales rutas que fueron analizadas.

**Tabla 4: Rutas.**

<b>ID</b>	<b>Proceso 1</b>	<b>Proceso 2</b>	<b>Proceso 3</b>
1	Baño	Aserradero	
2	Clasificado	Secado	Aserradero
3	Cepillado	Secado	Aserradero
4	Secado	Aserradero	
5	Terminación	Aserradero	

Cada producto terminado tiene asociada una ruta particular. Por ejemplo, el producto terminado “L\_39.6\_94.8\_4500” tiene asociada la ruta de ID 3, por lo tanto para obtener un producto terminado de estas características, un producto verde debe atravesar por el proceso de secado y cepillado. En la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo donde el producto verde “Lateral En Proceso\_39.6\_94.8” atraviesa por los procesos de secado y cepillado para llegar al producto terminado.



**Figura 6:** Conversión material prima a producto terminado.

**Fuente:** Elaboración propia.

### OEE (Overall Equipment Effectiveness)

El OEE es un indicador clave de rendimiento que forma parte de la metodología TPM (Total Productive Maintenance o Mantenimiento Productivo Total) (Agustiady & Cudney, 2017). OEE se refiere a la eficiencia general del equipo y se calcula considerando tres factores principales: disponibilidad, rendimiento y calidad.

- **Disponibilidad:** Mide el tiempo real en que una máquina o equipo está en funcionamiento y disponible para la producción. Se expresa como el cociente entre el tiempo de operación real y el tiempo total disponible, como muestra la Ecuación (2).

$$Disponibilidad = \left( \frac{Tiempo\ real\ de\ operación}{Tiempo\ total\ disponible} \right) \quad (2)$$

- **Rendimiento:** Evalúa la eficiencia de la máquina durante su tiempo de actividad, considerando la velocidad de producción en comparación con la velocidad teórica o estándar. Se calcula como el cociente entre la velocidad de producción real y la velocidad de producción estándar, según la Ecuación (3).

$$Rendimiento = \left( \frac{Velocidad\ de\ producción\ real}{Velocidad\ de\ producción\ estándar} \right) \quad (3)$$

- **Calidad:** Representa la proporción de productos conformes en relación con la producción total. Se calcula, según la Ecuación (4) como el cociente entre la cantidad de productos buenos y la cantidad total de productos producidos.

$$Calidad = \left( \frac{Cantidad\ de\ Productos\ Conformes}{Cantidad\ Total\ de\ Productos\ Procesados} \right) \quad (4)$$

Así, la fórmula general para calcular el OEE está dada por la Ecuación (5):

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad (5)$$

El OEE es una métrica integral que proporciona una visión completa de la eficiencia del equipo al considerar aspectos de tiempo, rendimiento y calidad. Una puntuación de OEE del 100% indica que la máquina está operando a su máxima eficiencia en términos de disponibilidad, rendimiento y calidad.

### **Planta**

Una planta se refiere a las instalaciones físicas y operativas en las que se lleva a cabo la producción y manufactura de los productos. Esta instalación incluye los edificios, maquinaria, equipos, personal y otros recursos necesarios para llevar a cabo las operaciones productivas de una empresa o industria. Dentro de este proyecto se consideran las plantas Bucalemu, Nacimiento, Mulchén y Loncoche.

En el negocio de aserradero no todas las plantas cuentan con la capacidad de realizar todos los procesos o de procesar todas las materias primas. En el caso de la planta de Nacimiento, se cuenta con máquinas que pueden trabajar con fibras de línea delgada o línea gruesa. Donde la línea delgada corresponde a aquellos trozos de menor diámetro, mientras que la línea gruesa posee la capacidad de procesar trozos de mayor diámetro. Por otro lado, la planta de Mulchén solo puede procesar trozos de línea delgada. Debido a esta limitación, no todas las rutas pueden completarse en una sola planta. Sin embargo, existe la opción de transferir materiales entre diferentes plantas. Por tanto, para obtener un producto terminado, por ejemplo, la producción puede comenzar con la materia prima en la planta de Nacimiento y luego completar sus procesos subsiguientes en la planta de Mulchén.

En las plantas, la capacidad operativa se ve influenciada por la estructura de los turnos de trabajo, la disponibilidad de personal para mantener una producción constante y la capacidad de almacenamiento de materias primas y productos terminados.

## **Servicios**

Dentro del ámbito empresarial, puede surgir la situación en la que la producción de las plantas resulte insuficiente para satisfacer la demanda de un pedido. En estos casos, para cumplir con los compromisos contractuales, se puede optar por contratar servicios de empresas externas a CMPC para llevar a cabo determinados procesos productivos y así satisfacer la demanda del pedido. Estos servicios externos implican un costo significativamente superior a la producción interna de los procesos. A pesar de que esta práctica se ve como una alternativa menos favorable debido a los mayores costos, es común recurrir a ella ante la elevada demanda de productos específicos en el mercado.

## **EBITDA**

EBITDA significa "Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization" en inglés, que traducido al español es "Beneficio Antes de Intereses, Impuestos, Depreciación y Amortización". El EBITDA es una medida financiera que representa la capacidad de una empresa para generar beneficios operativos, excluyendo el impacto de intereses, impuestos y ciertos gastos no monetarios como la depreciación y la amortización. Se utiliza comúnmente como indicador de la rentabilidad operativa y la eficiencia de una empresa. El EBITDA es calculado según la Ecuación (6).

$$EBITDA = Ingresos - Costos operacionales \quad (6)$$

## **Stock de seguridad**

El inventario de seguridad abarca un rango en que la cantidad de materiales por proceso en cada planta debe ubicarse. Esto se debe a que cada planta tiene un límite de almacenamiento que no se debe exceder y un mínimo de materiales necesario para mantener la continuidad operativa, evitando así que las máquinas se detengan por falta de materia prima.

## **2.2 Marco de asignación del plan de producción**

Un plan de producción es una estrategia que establece los procesos y recursos necesarios para fabricar productos en una empresa. Este plan aborda aspectos como la cantidad de productos que se requieren producir, la asignación de recursos disponibles, la programación de actividades, y otros detalles operativos. El objetivo principal es optimizar la eficiencia y la capacidad de respuesta a la demanda del mercado, asegurando que los recursos estén adecuadamente coordinados para cumplir con los objetivos de producción de la empresa.

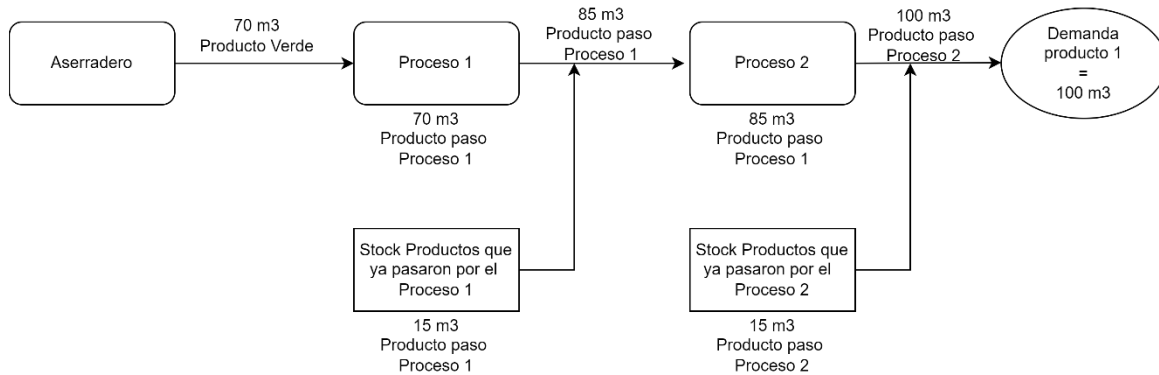
El propósito del plan de producción en el negocio de aserradero es maximizar la ganancia determinando la mejor alternativa a la hora fabricar los productos que requieren los clientes. Esto considera desde la materia prima y el esquema de corte que se utiliza para generar los productos verdes, que serán consumidos en cada periodo, hasta la combinación óptima de máquinas por las cuales deben pasar los materiales en proceso en el día a día.

Para maximizar las ganancias por medio del plan de producción en el negocio de aserradero se debe considerar diferentes aspectos, entre los cuales lo más importantes son los ingresos y costos que implica la venta de un producto terminado.

Cada producto terminado representa un ingreso por su venta y conlleva un costo asociado a su producción. Cada producto terminado no solo representa un ingreso por su venta, sino que también conlleva un costo asociado a su producción. Este costo de producción abarca el valor del trozo utilizado como materia prima, los costos del proceso de aserradero y reproceso, los cuales varían en función del esquema de corte aplicado para obtener los productos verdes. Una vez obtenido el producto verde, el costo de cada producto terminado se compone del uso de las máquinas en cada etapa de la ruta, así como de los gastos de transporte asociados a los traslados entre plantas. En el caso de pedidos completados con servicios externos, se suma también el costo respectivo de estos servicios.

Los clientes realizan pedidos que incluyen una cantidad determinada de metros cúbicos de productos, los cuales deben ser fabricados dentro de un plazo acordado entre la empresa y el cliente.

La demanda de los clientes puede ser satisfecha mediante varias maneras, la disponibilidad de productos terminados en inventario o stock, complementando la producción con materiales en proceso, realizando la producción completa desde la materia prima y, en última instancia, a través de la contratación de servicios externos para cubrir la demanda requerida. La elección entre estas opciones depende de la disponibilidad de los materiales y de la priorización de los pedidos, determinada por los plazos de entrega establecidos.



**Figura 7: Ejemplo cumplimiento de la demanda de un producto con producción y stock.**

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 7, se ilustra un ejemplo de cómo se satisface la demanda de un producto final utilizando materiales en proceso disponibles en el inventario y produciendo la cantidad necesaria para cumplir con un pedido específico. En este escenario, la demanda del pedido es de  $100\text{ m}^3$  para el Producto 1, y su ruta implica pasar por el Proceso 1 y el Proceso 2. En este caso, se generan  $70\text{ m}^3$  de producto verde en el aserradero, que se consume en el Proceso 1, resultando en  $70\text{ m}^3$  de material en proceso 1. A esto se agrega que en el inventario había  $15\text{ m}^3$  de material en proceso 1, sumando un total de  $85\text{ m}^3$  que se consumen en el proceso 2 para producir  $85\text{ m}^3$  de material en proceso 2. Además, en el inventario se contaba con  $15\text{ m}^3$  adicionales de material en proceso 2, totalizando así  $100\text{ m}^3$  de producto terminado y cumpliendo con la demanda requerida.

Existen pedidos con plazos de entrega fijos y otros que se trabajan con plazos de entrega estimados. Los pedidos con plazo fijo corresponden a clientes internacionales cuyos pedidos se transportan en naves “breakbulk”, las cuales son naves marítimas que tienen fechas de embarque con una periodicidad que varía entre dos y tres meses. Por otro lado, existen pedidos con plazos estimados de entrega, que corresponden a aquellos clientes internacionales que se transportan por contenedores vía marítima cuya periodicidad es de un mes aproximadamente y los clientes nacionales cuyos pedidos se transportan en camiones con frecuencia semanal. Ante posibles retrasos, los pedidos nacionales tienen una demora máxima de una semana, mientras que los internacionales, están sujetos a naves con frecuencia mensual y pueden experimentar demoras de uno a tres meses, por lo tanto, toman prioridad a los pedidos internacionales frente a los nacionales. Este aspecto es crítico, ya que los

incumplimientos en la entrega podrían poner en riesgo los contratos comerciales con clientes internacionales o llevar a severas penalizaciones monetarias que impactarían directamente en la rentabilidad de la venta.

El cumplimiento de los plazos está ligado a la capacidad de satisfacer la producción requerida. En este sentido, se debe evaluar la disponibilidad de las máquinas, los turnos de trabajo y los factores de eficiencia operativa en las plantas. Es importante destacar que no todos los productos pueden ser elaborados en todas las máquinas, y que un producto verde debe seguir una ruta específica para transformarse en el producto terminado deseado. Por tanto, al planificar la producción es esencial considerar la disponibilidad de las máquinas que son capaces de llevar a cabo los procesos de las rutas correspondientes. Este análisis permite determinar si es factible cumplir con todos los pedidos considerando la producción de todas las máquinas de todas las plantas, o si se requiere la contratación de servicios externos para finalizar las rutas de procesos o fabricar los productos desde cero con empresas externas.

La planificación de producción debe tener en cuenta el inventario de materia prima en cada planta. Basándose en la cantidad y tipo de materia prima disponible, se pueden diseñar diferentes esquemas de corte para obtener una variedad de productos verdes. La elección del esquema de corte es un componente esencial de la planificación, ya que representa la primera fase en la cual se decide la mejor manera de obtener los productos verdes. Estos productos luego seguirán sus respectivas rutas, para generar los productos terminados deseados.

CMPC considera la planificación productiva en sus tres niveles con el fin de garantizar una gestión eficiente y una respuesta adecuada a las demandas del mercado. En primer lugar, la planificación estratégica establece los objetivos a largo plazo, definiendo la dirección y los propósitos de la empresa para un horizonte temporal de tres años o más. Aquí, se toman decisiones clave sobre la expansión, diversificación y posicionamiento en el mercado. Seguido de esto, la planificación táctica se enfoca en traducir esos objetivos estratégicos en acciones más detalladas y específicas en un período mensual o anual. Los planificadores consideran las capacidades de las plantas, los plazos de entrega y otros factores operativos para distribuir estratégicamente los recursos y asignar las tareas de manera eficiente. Finalmente, la planificación operativa se concentra en la ejecución diaria de las tareas. A nivel de las plantas, se organizan los turnos de trabajo, se asignan recursos y se coordinan las

actividades para cumplir con los objetivos establecidos en los niveles estratégico y táctico. Estos tres niveles de planificación trabajan de manera sinérgica para garantizar una operación fluida y alineada con los objetivos de la empresa.

### **2.3 Problema abordado**

Los planificadores de CMPC desempeñan un papel crucial al considerar diversos aspectos en la planificación de producción en sus distintos niveles, lo que implica un análisis exhaustivo respaldado por conocimientos en ingeniería. En la actualidad, la toma de decisiones de los planificadores se basa en su experiencia y en el historial de productos que han demostrado ser más beneficiosas para el negocio. Aunque esta aproximación suele carecer de precisión debido a la falta de un análisis de las variables relevantes como la utilidad, los tiempos entre los procesos, los tiempos de traslados entre otros, a pesar de esto, es común adoptar este enfoque debido a la ausencia de herramientas automatizadas para calcular la utilidad y los diversos escenarios que se pueden presentar en la producción.

El desafío de la asignación en la planificación de producción se desglosa en tres etapas. En la primera etapa, se debe determinar qué pedidos se cumplirán en cada periodo, considerando un equilibrio entre los procesos a realizar, la capacidad de las máquinas y las prioridades según los plazos, entre otros factores. A partir de esta decisión, se obtiene la cantidad de producto verde requerida desde el aserradero. En la segunda etapa, se busca determinar qué esquemas de corte se utilizarán para satisfacer la demanda de los productos en verde. Esto implica optimizar el uso de la materia prima, procurando obtener la mayor cantidad de producto verde necesaria con la menor cantidad de trozos. Esta etapa está vinculada directamente a la disponibilidad de materia prima en cada planta. Finalmente, la tercera etapa implica llevar a cabo el secuenciamiento de los productos que se procesarán cada día en cada planta.

Este proyecto se centra en la optimización de la planificación táctica y operativa, ya que las decisiones a nivel estratégico requieren un período de estudio más extenso y deben considerar el contexto de todos los negocios de la empresa, lo cual está fuera del alcance de esta memoria.

## 2.4 Revisión de Literatura

En esta sección, se exploran diversos problemas planteados en la literatura, abarcando perspectivas para optimizar la planificación de producción. El análisis se centra en la identificación de tendencias, enfoques innovadores y metodologías propuestas en investigaciones anteriores. Este proceso proporciona la base necesaria para desarrollar un método de optimización aplicable al contexto del negocio de aserradero en CMPC.

El problema de planificación de la producción de aserraderos puede considerarse una extensión de lo que se conoce en la literatura como el problema de tamaño de lote (Drexl & Kimms, 1997; Fleischmann & Meyr, 1997; Kopanos, et al. 2011). Este problema consiste en determinar el tamaño óptimo de los lotes de producción o de pedido que minimiza los costos totales asociados con el almacenamiento y la producción. Este problema busca encontrar el equilibrio adecuado entre los costos de mantener el inventario y los costos asociados a realizar los pedidos y la configuración de la producción. Para resolver este problema, se presenta un enfoque basado en programación entera mixta para la planificación y programación de procesos continuos, implementando un enfoque que se centra en el secuenciamiento de los procesos y en determinar la dimensión de lote garantizando el cumplimiento de las restricciones de tiempo de producción. El modelo propuesto logró obtener soluciones para problemas con cientos de productos en menos de cinco minutos, incluyendo soluciones óptimas en un plazo razonable.

Quadt & Kuhn (2008) abordan la problemática de la toma de decisiones respecto al tamaño de lote en entornos de producción donde la materia prima se transforma en productos finales después de pasar por diversas operaciones, teniendo en cuenta restricciones de capacidad y la existencia de máquinas paralelas. La presencia de máquinas paralelas agrega una complejidad adicional, ya que implica la coordinación de actividades entre múltiples máquinas que pueden operar de manera simultánea.

Seguel (2007) aborda la problemática de optimización de la producción basada en una materia prima y emplea un algoritmo genético con el propósito de maximizar el volumen o el valor total de la producción. Para alcanzar este objetivo, se toma en consideración una lista de precios asociada a los distintos productos obtenidos a partir de la materia prima, así como la disponibilidad y características de los recursos disponibles. Este estudio concluye que la implementación de los algoritmos genéticos es capaz de identificar soluciones más eficientes. Al comparar los rendimientos obtenidos por los algoritmos propuestos con los de la industria del aserrío, que

oscilan entre el 55% y el 65%, se sugiere que la solución propuesta podría significativamente mejorar la eficiencia en la utilización de la materia prima.

Maness & Adams (1991) desarrollan un modelo que aborda el problema de trozado y aserrío de forma integrada a través de un sistema multi-agente. Consiste en una solución para la planificación operativa de la producción que permita a un aserradero común maximizar sus utilidades, tomando en consideración su tecnología y características de proceso, así como la información de mercado y la disponibilidad de materia prima. Con este propósito, se desarrollaron tres modelos individuales. El primero es un modelo destinado a optimizar los patrones de corte mediante el empleo de algoritmos genéticos. El segundo es un modelo para determinar la política de trazado óptima mediante el uso de metaheurística por medio de algoritmos genéticos. Finalmente, un modelo de asignación de trozos basado en programa lineal, que actúa como un problema maestro. Este método demostró una reducción en el tiempo de respuesta.

En el trabajo realizado por Wessels et al. (2006), se presenta un sistema de planificación diseñado para un aserradero, que aborda de manera integral el proceso de cosecha del proveedor de materia prima. Este sistema se compone de la integración de tres modelos, que posibilitan la evaluación del suministro de rollizos según su tipo, la simulación del volumen de producción durante el proceso de aserrío en función del suministro, y la planificación de la producción mediante la selección de patrones de corte óptimos para los rollizos, con el objetivo de maximizar el beneficio. El modelo de optimización implementado emplea técnicas de programación lineal y entera mixta, incorporando diversas restricciones, como el volumen disponible de rollizos, la demanda de productos de madera, así como las capacidades del proceso de aserrío y del proceso de secado, entre otras consideraciones relevantes.

Gazmuri & Arrate (1995) proponen un modelo de programación entera mixta para abordar la planificación agregada en una compañía de electrodomésticos. Donde la función objetivo tiene como finalidad maximizar el beneficio. Este modelo considera la mano de obra como un factor crucial que determina la capacidad de producción, y opera bajo la premisa de una demanda conocida para cada periodo y producto.

La investigación aplicada de Cieza (2021) identificó causas clave de altos costos en la empresa producciones nacionales TC. E.I.R.L., como el exceso de horas extras y la falta de planificación. Para resolver este problema, se emplea programación lineal para optimizar los costos de producción,

permitiendo prever la demanda y estimar el requerimiento de material, y así, lograr una producción óptima y cumplimiento eficiente de plazos. La implementación del modelo ofreció una optimización del 39% en los costos de horas extras, generando un ahorro significativo.

En su trabajo, Jolayemi & Olorunniwo (2004) desarrollan un modelo de programación entera mixta de planificación de producción y transporte que abarca múltiples plantas y almacenes con capacidad variable. Su objetivo es maximizar los beneficios al integrar los problemas de producción, transporte y capacidad de almacenamiento, permitiendo la subcontratación y abordando todos los aspectos de la cadena de suministro. Es importante señalar que en este análisis no se han considerado estructuras de costos decrecientes para el transporte.

Finalmente, Viveros & Salazar (2010) plantean un modelo de planificación de producción para un sistema multiproducto con múltiples líneas de producción, en el cual se desarrolla un modelo de programación lineal basado en el pronóstico de ventas, los inventarios iniciales de productos terminados y materias primas, la capacidad de producción instalada y las rutas alternativas de producción de los productos. El modelo permite la compensación de déficits de producto en períodos posteriores cuando exista disponibilidad de recursos. Además, proporciona tasas de producción por línea de producción, la utilización de la capacidad instalada, el equilibrio de inventarios de productos y materias primas, así como la planificación de adquisiciones de materias primas en un horizonte de planificación anual dividido en períodos mensuales. El modelo demostró ser una herramienta valiosa en la administración de la producción, generando planes factibles y alineados con buenas prácticas. Los resultados revelaron un aumento del 3,6% en la productividad operativa y una reducción del 5% en los costos, principalmente debido al uso más eficiente de la capacidad y la disminución de inventarios a lo largo del horizonte de planificación.

### 3. Modelo Propuesto

A partir de la problemática expuesta y tras la revisión de la literatura, se propone elaborar un modelo de programación lineal con el propósito de optimizar el desarrollo de la planificación de producción considerando la rentabilidad de la venta de la madera. Este modelo aborda la toma de decisiones respecto a los pedidos a cumplir, la asignación de máquinas y la programación temporal de cada proceso, con el objetivo de satisfacer las demandas de los clientes teniendo presente las limitaciones de capacidad de las plantas para proporcionar una planificación eficiente y efectiva.

#### 3.1 Definición formal del problema abordado

El problema abordado es definido formalmente como: dado un pedido  $p \in P = \{1, 2, \dots, |P|\}$  con una demanda  $D_p$  de una determinada cantidad de  $m^3$  de un producto  $i \in I = \{1, 2, \dots, |I|\}$ . Se genera un ingreso  $Q_p$  por cada pedido  $p \in P$  cumplido y un costo  $K_{im}$  ( $i \in I$ ) dado por el uso de las máquinas  $m \in M = \{1, 2, \dots, |M|\}$ .

El problema se analiza en un intervalo de tiempo  $t \in T = \{1, 2, \dots, |T|\}$  en el cual se deben realizar los pedidos  $p \in P$  demandados que entreguen el mayor beneficio. Cada pedido  $p \in P$  tiene un plazo de entrega establecido, dado por  $L_p$ .

Para que un producto  $i \in I$  se convierta en otro diferente debe pasar por un proceso  $b \in B = \{1, 2, \dots, |B|\}$ . Luego, para lograr producir un producto terminado específico  $\bar{i} \in I$ , un producto verde  $i \in I$  debe atravesar por todos los procesos  $\hat{b} \in \hat{B}_r = \{1, 2, \dots, |\hat{B}_r|\}$  dados por la ruta  $r \in R = \{1, 2, \dots, |R|\}$  como se presenta en la Tabla 4.

Cada planta  $a \in A = \{1, 2, \dots, |A|\}$  cuenta con una dotación de máquinas  $m \in M$ , las cuales cuentan con una cantidad de horas disponibles para trabajar  $H_{mt}^d$  ( $m \in M, t \in T$ ), un rendimiento  $U_{mit}$  ( $m \in M, i \in I, t \in T$ ) y una velocidad  $H_{im}^x$  ( $i \in I, m \in M$ ). Además, las máquinas  $m \in M$  cuentan con factores de eficiencia que impactan al porcentaje de tiempo de operación efectivo.

En cada planta  $a \in A$  se considera un stock inicial  $S_{ia}$  por cada producto  $i \in I$ . Además, se debe gestionar la producción de tal manera de no sobrepasar el stock de seguridad máximo y estar por debajo del stock de seguridad mínimo  $S_{bat}^{Smax}$  y  $S_{bat}^{Smin}$  ( $b \in B, a \in A, t \in T$ ), respectivamente. Estos rangos pueden variar para cada periodo  $t \in T$  dependiendo de las necesidades de la producción.

Cuando existe traspaso de un producto  $i \in I$  entre una planta de salida  $a \in A$  a otra de llegada,  $\bar{a} \in A$ , se incurre en un costo por transporte  $C_{pa\bar{a}}^T$ .

Para aquellos pedidos  $p \in P$  que deben cumplir con un plazo fijo por el embarque de las naves breakbulk pertenecen al conjunto  $P_t^L$  ( $t \in T$ ). De forma similar, aquellos pedidos  $p \in P$  que solo pueden ser realizados en una determinada planta  $a \in A$  pertenecen al conjunto  $P_a^A$ . Si se da el caso en que exista retraso al realizar la entrega de un pedido  $p \in P$ , se genera un factor de retraso  $F$ .

Se asigna a cada pedido  $p \in P$  un factor de exceso  $G_p$ . Este factor representa un porcentaje de producción adicional destinado a prevenir posibles problemas de calidad que podrían surgir durante el proceso de fabricación.

El objetivo del problema es generar un plan de producción máximo que determine en qué máquina  $m \in M$ , periodo  $t \in T$  se debe fabricar un pedido  $p \in P$  para obtener un EBITDA óptimo y cumplir las condiciones de la demanda.

### 3.2 Planteamiento del modelo

Se presenta el modelo de programación lineal para la resolución del problema de la elección del plan de producción óptimo. El modelo propuesto considera tres variables de decisión que contemple la producción contra pedido, stock contra pedido y producción contra stock.  $X_{p\hat{b}mt}$  es la producción contra pedido y corresponde a la cantidad en  $m^3$  de productos  $i \in I$ , donde  $\hat{b} \in \hat{B}_r$  representa el proceso de la ruta  $r \in R$  que se realizan con el fin de satisfacer la demanda de un pedido  $p \in P$  a lo largo de la planificación de producción.  $W_{p\hat{b}at}$  representa el stock contra pedido y corresponde a la cantidad en  $m^3$  de productos  $i \in I$ , que se retiran de stock para satisfacer la demanda de un pedido  $p \in P$ , donde  $\hat{b} \in \hat{B}_r$ :  $\forall r \in R$  son los procesos por los que se requiere atravesar para conseguir el producto  $i \in I$  que requiere el pedido  $p \in P$ . Finalmente,  $Y_{imt}$  es la producción contra stock y corresponde a la cantidad de  $m^3$  de productos  $i \in I$  que se produjeron en la máquina  $m \in M$  en el periodo  $t \in T$  y se dejaron en stock para entregarlos en un periodo  $\hat{t} \in T$  posterior. En la Tabla 5, a modo resumen se presentan los conjuntos, parámetros y variables de decisión del modelo propuesto.

**Tabla 5. Notación del modelo propuesto.**

<b>Conjuntos</b>	
$P$	Conjunto de pedidos, denotados por el índice $p$ , donde $P_a^A \cap P_t^L = \emptyset$
$P_a^A$	Conjunto de pedidos $p \in P$ dirigidos a planta específica $a \in A$ , denotados por el índice $\hat{p}$ .
$P_t^L$	Conjunto de pedidos $p \in P$ que deben cumplir un plazo de entrega en el periodo $t$ , denotados por el índice $\bar{p}$ .
$I$	Conjunto de materiales de producción, denotados por el índice $i$ .
$\bar{I}$	Conjunto de materiales de consumo, denotados por el índice $\bar{i}$ , donde $\bar{I} \subseteq I$ .
$A$	Conjunto de plantas, denotadas por el índice $a$ .
$T$	Conjunto de periodos, denotados por el índice $t$ .
$R$	Conjunto de rutas, denotadas por el índice $r$ .
$B$	Conjunto de procesos, denotados por el índice $b$ .
$\hat{B}_r$	Conjunto de procesos $b \in B$ que se deben realizar para cumplir la ruta $r \in R$ , denotados por el índice $\hat{b}$ .
$M$	Conjunto de máquinas, denotado por el índice $m$ .
$M^A$	Conjunto de máquinas que se encuentran en la planta $a \in A$ .
<b>Parámetros</b>	
$D_p$	Demanda asociada al pedido $p \in P$ en $m^3$ .
$Q_p$	Precio del pedido $p \in P$ en $\$/m^3$ .
$K_{im}$	Costo asociado al producto $i \in I$ al ser procesado en la máquina $m \in M$ en $\$/hrs$ .
$C_{pa\bar{a}}^T$	Costo por transporte entre la planta $a \in A$ hasta la planta $\bar{a} \in A$ para la entrega del pedido $p \in P$ en $\$$ .
$H_{mt}^d$	Horas disponibles por cada máquina $m \in M$ en hrs en cada periodo $t \in T$ .
$H_{imt}^x$	Tiempo de fabricación del producto $i \in I$ en la máquina $m \in M$ en hrs en cada periodo $t \in T$ .
$L_p$	Periodos $t \in T$ disponibles para cumplir el pedido $p \in P$ en días.
$V_{imt}$	Velocidad de producción del producto $i \in I$ en la máquina $m \in M$ en $hrs/m^3$ en cada periodo $t \in T$ .
$H_t^T$	Horas que contempla un periodo $t \in T$ .
$U_{mi}$	factor de rendimiento de la máquina $m \in M$ al procesar el producto $i \in I$ .
$S_{ia}$	Stock inicial de los productos $i \in I$ en la planta $a \in A$ .
$S_{bat}^{min}$	Stock de seguridad mínimo que puede existir en el proceso $b \in B$ en la planta $a \in A$ en el periodo $t \in T$ .
$S_{bat}^{max}$	Stock de seguridad máximo que puede existir en el proceso $b \in B$ en la planta $a \in A$ en el periodo $t \in T$ .
$O_{mt}^D$	Factor OEE asociado a la disponibilidad en horas de la máquina $m \in M$ en el periodo $t \in T$ .
$O_{mi}^R$	Factor OEE asociado al rendimiento de producción de un producto $i \in I$ en la máquina $m \in M$ .
$O_{mi}^C$	Factor OEE asociado a la calidad de producción de un producto $i \in I$ en la máquina $m \in M$ .
$F_p$	Factor de retraso del pedido $p \in P$ .
$E_p$	Factor de exceso de producción del pedido $p \in P$ .
$A_p$	Planta asignada para el pedido $p \in P^L$ .
$G_p$	Factor de exceso sobre demanda para el pedido $p \in P$ .
<b>Variables</b>	
$X_{p\hat{b}mt}$	Cantidad de pedido $p \in P$ , en el proceso $\hat{b} \in \hat{B}_r: \forall r \in R$ en la máquina $m \in M$ en el periodo $t \in T$ .
$Y_{imt}$	Cantidad de producto $i \in I$ procesado en la máquina $m \in M$ en el periodo $t \in T$ .
$W_{p\hat{b}at}$	Cantidad de pedidos $p \in P$ , en el proceso $\hat{b} \in \hat{B}_r: \forall r \in R$ en la planta $a \in A$ en el periodo $t \in T$ .

A continuación, se presenta la función objetivo, que busca optimizar las ganancias por medio de la elección de la mejor combinación de pedidos  $p \in P$  a cumplir y máquinas a utilizar, en las plantas  $a \in A$  y los periodos  $t \in T$  que generen mayor utilidad.

$$Z^1 = \sum_{p \in P} \left( Q_p \sum_{t \in T} \left( \sum_{m \in M} X_{p0mt} + \sum_{a \in A} W_{p0at} \right) \right) \quad (7)$$

$$Z^2 = \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \left( \sum_{r \in R} \sum_{\hat{b} \in \hat{B}_r} \sum_{p \in P} \left( X_{p\hat{b}mt} \sum_{i \in I} C_{im} \right) + \sum_{i \in I} Y_{imt} C_{im} \right) + \sum_{p \in P} \left( F_p + \sum_{a \in A} \sum_{\bar{a} \in \bar{A}} C_{pa\bar{a}}^T \right) \quad (8)$$

$$\text{maximizar } Z = Z^1 - Z^2 \quad (9)$$

La función objetivo (9) se puede simplificar como ingreso  $Z^1$  por pedidos  $p \in P$  cumplidos menos la suma de todos los costos  $Z^2$  que implican la fabricación de los pedidos  $p \in P$  cumplidos. Las restricciones de modelo son:

$$E_p \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} X_{p0mt} + E_p \sum_{t \in T} \sum_{a \in A} W_{p0at} \leq D_p \quad \forall p \in P \quad (10)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{r \in R} \sum_{\hat{b} \in \hat{B}_r} \frac{X_{p\hat{b}mt}}{U_{mi}} = \sum_{r \in R} \sum_{\hat{b} \in \hat{B}_r} \sum_{m \in M} X_{p\hat{b}mt} + \sum_{r \in R} \sum_{\hat{b} \in \hat{B}_r} W_{p\hat{b}at} \quad (11)$$

$\forall i \in I, p \in P, t \in T, a \in A$

$$\frac{Y_{\bar{i}mt}}{U_{mi}} = Y_{imt} \quad \forall i \in I, \bar{i} \in \bar{I}, m \in M, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P} W_{p\hat{b}a1} \leq S_{ia} \quad \forall i \in I, \hat{b} \in \hat{B}_r: \forall r \in R, a \in A \quad (13)$$

$$\sum_{p \in P} W_{p\hat{b}at} \leq S_{ia} \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \left( \sum_{p \in P} W_{p\hat{b}at} - \sum_{m \in M} \frac{Y_{imt}}{U_{mi}} - \sum_{m \in M} \frac{X_{p\hat{b}mt}}{U_{mi}} + \sum_{m \in M} Y_{imt} \right) \quad (14)$$

$$\forall t \in T, i \in I, a \in A, \hat{b} \in \hat{B}_r: \forall r \in R$$

$$S_{bat}^{Smin} \leq \sum_{p \in P} W_{pbat} \leq S_{bat}^{Smax} \quad \forall b \in B, a \in A, t \in T \quad (15)$$

$$H_{mt}^d O_{mt}^M \geq \sum_{r \in R} \sum_{\hat{b} \in \hat{B}_r} \sum_{i \in I} H_{imt}^x O_{mit}^V O_{mit}^C \left( \sum_{p \in P} X_{p\hat{b}mt} + Y_{imt} \right) \quad (16)$$

$\forall m \in M, t \in T$

$$\sum_{t \in T: L_{\bar{p}} < t} \sum_{m \in M} X_{\bar{p}0mt} + \sum_{L_{\bar{p}} < t \in T} \sum_{a \in A} W_{\bar{p}0at} = 0 \quad \forall \bar{p} \in P^L \quad (17)$$

$$E_{p^l} \sum_{t \in T: t < L_{\bar{p}}} \sum_{t \in T: t < L_{\bar{p}}} \sum_{m \in M} X_{\bar{p}0mt} + \sum_{t \in T: t < L_{\bar{p}}} \sum_{a \in A} W_{\bar{p}0at} = D_p \quad (18)$$

$$\forall \bar{p} \in P^L$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{m \in M \setminus \{M^A\}} X_{\hat{p}0mt} + \sum_{t \in T} \sum_{a \in A \setminus \{A_p\}} W_{\hat{p}0at} = 0 \quad \forall \hat{p} \in P^A \quad (19)$$

$$X_{p\hat{b}mt} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \hat{b} \in \hat{B}_r : \forall r \in R, m \in M \quad (20)$$

$$Y_{imt} \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M, t \in T \quad (21)$$

$$X_{p\hat{b}mt} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \hat{b} \in \hat{B}_r : \forall r \in R, m \in M \quad (22)$$

Las restricciones (10) limitan que la cantidad de  $m^3$  de los pedidos cumplidos no sobrepase la demanda establecida. Las restricciones (11) establecen que la cantidad de un producto necesario para fabricar otro producto en una máquina se determina a través del rendimiento de la máquina. Esta cantidad es igual a la suma de la producción contra pedido y el stock contra pedido de dicho producto. De esta manera, se puede obtener el producto necesario para el consumo, considerando la ruta del pedido, donde lo producido en un proceso de la ruta se consume en el siguiente proceso de la misma ruta. Por otro lado, las restricciones (12) presentan el consumo necesario para la producción contra stock, el cual está determinado por el rendimiento de la máquina donde se genera la producción. Las restricciones (13) limitan que el stock contra pedido utilizado no sea mayor al stock disponible en la

planta. Mientras que las restricciones (14) establecen un equilibrio en el stock que determina la cantidad máxima de producto disponible para cumplir con un pedido. Esto tiene en cuenta la cantidad de producto utilizada en periodos anteriores, tanto para ser consumida en otros procesos como para satisfacer otros pedidos. Además, el uso de los productos en stock se ve limitado por los umbrales de stock de seguridad máximo y mínimo de cada planta, como se muestra en las restricciones (15). Las restricciones (16) limitan la producción contra pedido y la producción contra stock a la capacidad productiva de las máquinas, teniendo en cuenta los factores de OEE para calcular la disponibilidad de producción. Para los pedidos con plazo de entrega estricto, se restringe la producción a los períodos anteriores a la fecha de entrega, ya que no se puede considerar completar los pedidos después de esta fecha, como se muestra en las restricciones (17). Al mismo tiempo, según se indica en las restricciones (18), se obliga al modelo a completar toda la producción en los periodos permitidos. De manera análoga, en el caso de pedidos que tienen una planta asignada, se establece una restricción para garantizar que solo puedan completarse utilizando la producción o el stock de las plantas designadas. De esta forma, se establece que las variables de producción y stock deben ser iguales a cero para todas las demás plantas que no han sido asignadas, tal como se muestra en la restricción (19). Por último, las restricciones (20), (21) y (22) hacen referencia a la no negatividad de las variables.

## 4. Resultados

Este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos a partir de la implementación del modelo de programación lineal, que fue implementado mediante Python 3.10 y el solver pywraplp 7.3.7083 de Google OR-Tools. Se ofrece una descripción del proceso de introducción de datos, así como de la ejecución del modelo y los resultados generados. Este análisis contribuye a la evaluación y validación de la eficacia del modelo propuesto en la planificación y programación de la producción.

### 4.1 Instancias de prueba

Se utilizan tres instancias de prueba con el objetivo de ejemplificar los escenarios en los que se puede aplicar el programa a través de una muestra pequeña, una mediana y una grande. Cada instancia varía en la cantidad de datos ingresados y en el alcance, lo que proporciona diferentes perspectivas de la planificación de producción a partir de los resultados obtenidos. Los tres escenarios seleccionados cubren una amplia gama de situaciones operativas y tácticas, ofreciendo una visión completa de las capacidades del programa en diferentes contextos. Cada escenario permite observar el comportamiento representativo del sistema bajo diversas condiciones y planificaciones, facilitando así la comprensión de los resultados y sus implicaciones.

El primer escenario consiste en una muestra pequeña de pedidos que pueden completarse en un mes. Se utiliza para analizar el plan de producción en un período específico y evaluar el rendimiento de las máquinas y la disponibilidad de la materia prima a lo largo de cada período. Este escenario se emplea como apoyo a los planificadores de cada planta en la planificación operativa. Este escenario de prueba, gestiona 25 pedidos que abarcan 20 productos con una demanda total de  $3.066 m^3$  distribuidos en una ruta, cada una de las cuales demanda de dos procesos para su fabricación. La producción se lleva a cabo en dos plantas, cada una con una máquina activa para cada proceso necesario. El horizonte de planificación abarca cuatro periodos, equivalentes a una semana de cada uno, representando un mes de estudio.

El segundo escenario plantea una muestra mediana, con una demanda distribuida a lo largo de las 54 semanas del año para ver una planificación a largo plazo, donde el objetivo es observar cómo se comporta la producción si se plantean diferentes estrategias, por ejemplo, agregar una máquina o aumentar la cantidad de horas disponibles de una planta, etc. En este escenario no se busca una distribución precisa de los pedidos si no conocer el comportamiento general que tendrían las plantas

productivas tras diferentes modificaciones, pensando en la planificación táctica. Este escenario de prueba gestiona 437 pedidos que abarcan 23 productos con una demanda total de 109.504  $m^3$  distribuidos en una ruta, que demanda dos procesos para su fabricación. La producción se lleva a cabo en seis plantas, cada una con una máquina activa para cada proceso necesario. El horizonte de planificación abarca 54 periodos, equivalentes a una semana cada uno, representando un margen de un año de estudio.

Por último, el tercer escenario refleja una muestra grande donde se estudia la demanda a lo largo de doce meses, representando lo que se espera producir durante un año. Sin embargo, cada período se considera como un mes individual, lo que permite identificar cómo se movería el stock en cada mes para cumplir con los objetivos establecidos. Este escenario de prueba gestiona 5602 pedidos que abarcan 1050 productos con una demanda total de 1.034.998  $m^3$  distribuidos en siete rutas, cada una de las cuales demanda de uno a cuatro procesos para su fabricación. La producción se lleva a cabo en cinco plantas, cada una con una máquina activa para cada proceso necesario. El horizonte de planificación abarca 12 períodos, equivalentes a una semana de cada uno, representando las solicitudes a lo largo de un año. En la Tabla 6 se presenta un resumen con la información de cada escenario.

El modelo es validado en estos tres escenarios, sin embargo, dada la versatilidad que permite el programa en términos de las entradas, se pueden realizar modificaciones en la cantidad de pedidos, productos, períodos, máquinas y sus características. Mientras mayor sea la cantidad de datos ingresados, las decisiones del programa serán más certeras. Esto posibilita la creación de diversos escenarios para plantear nuevas estrategias en la planificación de producción, según sea necesario.

**Tabla 6: Características de los escenarios.**

<b>Característica</b>	<b>Escenarios</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Cantidad de Pedidos	25	437	5602
Cantidad de Productos	20	23	1001
Cantidad de Plantas	2	6	6
Cantidad de Procesos	2	2	7
Cantidad de Períodos	4	54	12
Metros cúbicos demandados	22.472	393.066	5.038.800

## 4.2 Interacción con el sistema Capacity

Para obtener los resultados del modelo, es necesario ingresar la información requerida de todos los pedidos que se desean analizar para la planificación de producción. Esto se logra mediante la conexión con el sistema Capacity y una base de datos que contiene el ID del pedido, el producto demandado, los  $m^3$  demandados, el plazo de entrega, el medio de transporte utilizado, la ruta y el precio de venta. Además, se conecta con una base de datos que proporciona las características de las máquinas, como los factores de rendimiento, calidad y disponibilidad, así como el costo por uso, todos estos asociados a cada producto que pueden procesar. Adicionalmente, se dispone de una base de datos que proporciona información sobre cada planta, como las máquinas con las que cuenta cada una, la disponibilidad de turnos de trabajo, el stock inicial de cada producto, los niveles de stock de seguridad y el costo de transporte entre cada planta. Por último, se deben especificar los parámetros iniciales, como la cantidad de períodos de análisis y los factores de exceso permitidos en la producción.

## 4.2 Resultados del modelo

Con la información proporcionada por el sistema Capacity aplicada a los tres escenarios propuestos, se obtienen resultados que luego son contrastados con los generados por los planificadores de las plantas. La Tabla 7 ilustra la comparación entre los resultados obtenidos por el modelo en los tres escenarios definidos y los resultados producidos por los planificadores bajo condiciones similares. La primera columna enumera los tres escenarios, seguida por los resultados del modelo desde la segunda hasta la cuarta columna, mientras que desde la quinta hasta la séptima columna se presentan los resultados proporcionados por los planificadores de las plantas. Así el % de cumplimiento es el porcentaje de metros cúbicos de la cantidad total de demanda que se satisfizo con los resultados obtenidos. El tiempo de solución se refiere al tiempo computacional utilizado por el modelo y al tiempo que tardan los planificadores en desarrollar el mismo escenario. Por último, el EBITDA se refiere a las utilidades que se obtuvieron en cada escenario.

**Tabla 7: Comparación entre los resultados del programa y los planificadores.**

Escenario	Modelo			Planificadores		
	% de cumplimiento	Tiempo de resolución	EBITDA	% de cumplimiento	Tiempo de resolución	EBITDA
<b>1</b>	95,18%	6,45 minutos	\$ 306.412	88,69%	5 horas	\$ 285.519
<b>2</b>	90,09%	9,33 minutos	\$ 10.358.476	87,77%	16 horas	\$ 10.091.724
<b>3</b>	89,49%	15,74 minutos	\$ 97.253.069	86,17%	72 horas	\$ 93.645.066

Actualmente, en el negocio de maderas, la asignación de pedidos se lleva a cabo manualmente, asignando individualmente los pedidos y agrupándolos según el producto solicitado, con prioridad basada en las fechas de entrega. Este enfoque, aunque ha sido efectivo hasta ahora, presenta limitaciones significativas al depender en gran medida del momento en que se realiza la evaluación, los patrones históricos y la disponibilidad de los planificadores para elaborar el plan de producción. En este contexto, se destaca la necesidad de adoptar enfoques más avanzados y basados en datos que puedan ofrecer una planificación más precisa, eficiente y adaptable. El programa, al basarse en datos actualizados de las máquinas y otras variables relevantes, logra una distribución más precisa en la planificación de producción en un tiempo mucho menor. Esto se debe a que utiliza un programa computacional que proporciona una planificación en minutos, en contraste con el análisis detallado que realizan los planificadores para cada pedido, cuya rapidez y certeza varían, pudiendo llevar desde horas hasta días para completarse dependiendo del planificador. Esto se refleja en los resultados obtenidos en la Tabla 7.

Al contrastar los resultados de las planificaciones generadas por el modelo con las realizadas manualmente por los planificadores de las plantas, se evidenció que el programa proporciona resultados para un mayor número de periodos de estudio en un tiempo exponencialmente menor en comparación con la planificación manual. El programa agiliza el análisis de la planificación táctica, ya que un estudio de esta envergadura, que implica recopilar información de las variables presentadas por el modelo, podría llevar días, dependiendo de la cantidad de periodos a analizar. A medida que aumenta la complejidad, con más periodos de estudio, pedidos y variedad de productos, la dificultad y el tiempo de análisis se incrementan al realizar la planificación de forma manual.

En contraste, como se mencionó en el contexto proporcionado, el análisis de la planificación y asignación de pedidos, cuando se realiza de manera manual, no tiene en cuenta el margen de beneficios, basándose únicamente en la experiencia y los datos de capacidad y disponibilidad del momento. Por el contrario, el modelo propuesto ofrece una perspectiva que considera tanto costos como ganancias del proceso productivo, permitiendo un análisis más exhaustivo al determinar el desarrollo de la planificación.

Adicionalmente, el programa propuesto proporciona la asignación óptima de los pedidos, considerando tanto aquellos que no pueden sufrir retrasos como aquellos que sí, priorizando así aquellos que no pueden tener retraso en comparación con los que, incluso con un nivel de retraso,

generen mayores beneficios. En la situación actual, los planificadores no cuentan con un control total sobre estos pedidos, ya que la carga significativa de solicitudes en cada periodo dificulta la distribución óptima en términos de priorizar los pedidos con restricciones de tiempo. Además, la planificación manual considera contratar servicios solo si lo ven necesario durante la producción una vez que se determina que no se cumplirá con los plazos establecidos inicialmente. El programa toma en cuenta los servicios externos al realizar la planificación, de modo que, si hay un pedido que debe cumplir una fecha específica debido a que corresponde a un transporte por nave breakbulk, se pueden considerar desde el principio la contratación de servicios, a pesar de los costos más altos, con el objetivo de obtener mayores ganancias en el escenario óptimo a nivel general.

Los planificadores tácticos determinan la cantidad total de metros cúbicos de cada producto en cada planta, considerando las materias primas disponibles y la capacidad de producción de las plantas. A partir de esta planificación, los planificadores operativos en cada planta desarrollan la distribución específica de la producción en cada máquina. El programa propuesto facilita la asignación tanto de las plantas como de las máquinas desde el momento en que se recibe la demanda, brindando un mayor control sobre la planificación desde el inicio. Además, permite analizar la factibilidad de cumplir con la demanda al conocer las características de cada máquina.

Al ejecutar el modelo se generan tres bases de datos que abarcan la producción contra pedido, el stock contra pedido y la producción contra stock. La Tabla 8 presenta un extracto de las salidas correspondientes a los escenarios. En la primera columna se detallan los escenarios, seguida de un extracto de los pedidos satisfechos en cada uno. La tercera columna indica el producto solicitado en cada pedido, mientras que la cuarta muestra la cantidad de metros cúbicos correspondiente a cada pedido. La quinta columna identifica la máquina en la que se realizó el último proceso para completar el producto, y la sexta columna indica en qué periodo se llevó a cabo la producción. Por otro lado, en la Tabla 9 se presenta el plan de producción elaborado por los planificadores para cada escenario. La primera columna muestra los escenarios, la segunda los pedidos realizados, la tercera el producto fabricado, la cuarta presenta la cantidad de metros cúbicos producidos, la quinta muestra la planta donde se realizará la producción y la sexta el periodo de producción del pedido

**Tabla 8: Extracto de resultados producción contra pedido obtenidos por el modelo.**

Escenario	Pedido	Producto	m <sup>3</sup>	Máquina	Periodo
1	1	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	45,00	Terminacion_NacimientoLD	1
	1	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	45,00	Terminacion_NacimientoLD	2
	8	CoreaEmbalajeVerdeRustico4m	35,00	Terminacion_Mulchen	1
	9	ChileFalldown_SecoSecoRustico4m	5,00	Terminacion_Mulchen	2
	11	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	40,00	Terminacion_NacimientoLG	2
	11	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	45,00	Terminacion_Bucalemu	3
	20	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	30,00	Aserrio_Mulchen	3
	20	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	45,00	Aserrio_Mulchen	4
2	176	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	145,00	Terminacion_NacimientoLD	1
	176	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	25,00	Terminacion_NacimientoLD	2
	176	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	325,00	Terminacion_Mulchen	1
	89	ChileFalldown_SecoSecoRustico4m	18,00	Terminacion_Mulchen	4
	108	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	141,00	Terminacion_NacimientoLG	9
	108	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	14,00	Terminacion_Bucalemu	9
	12	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	139,00	Aserrio_Mulchen	27
	12	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	132,00	Aserrio_Mulchen	34
3	2200	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	544,00	Terminacion_NacimientoLD	1
	2200	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	482,00	Terminacion_NacimientoLD	3
	807	CoreaEmbalajeVerdeRustico4m	308,00	Terminacion_Mulchen	1
	903	ChileFalldown_SecoSecoRustico4m	1805,00	Terminacion_Mulchen	5
	1240	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	1554,00	Terminacion_NacimientoLG	5
	1240	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	35,00	Terminacion_Bucalemu	8
	320	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	230,00	Aserrio_Mulchen	8
	320	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	1045,00	Aserrio_Mulchen	10

**Tabla 9: Extracto de resultados producción contra pedido realizada por los planificadores de la oficina central.**

Escenario	Pedido	Producto	m <sup>3</sup>	Planta	Periodo
1	1	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	50,00	Mulchén	1
	8	CoreaEmbalajeVerdeRustico4m	50,00	Nacimiento	1
	11	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	50,00	Laja	1
	20	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	45,00	Mulchén	1
2	176	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	145,00	Mulchén	1
	89	ChileFalldown_SecoSecoRustico4m	25,00	Los Ángeles	2
	108	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	325,00	Mulchén	1
	12	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	18,00	Mulchén	4
3	2200	USA Revestimiento Seco Rustico 4 m	544,00	Laja	1
	807	CoreaEmbalajeVerdeRustico4m	482,00	Laja	3
	903	ChileFalldown_SecoSecoRustico4m	1805,00	Laja	1
	1240	LANEmbalajeSecoRustico4,9m	1554,00	Mulchén	5
	320	CoreaEmbalajeVerdeRustico4,9m	230,00	Nacimiento	5

En las Tablas 8 y 9 se pueden observar las diferencias en el formato de los resultados obtenidos tanto del modelo como de los planificadores. La principal diferencia radica en el alcance de la asignación. Al utilizar el modelo, se puede determinar la máquina específica en la que se desarrollará cada pedido desde el primer análisis. En cambio, los planificadores solo pueden realizar una distribución inicial de la cantidad de pedidos que se debe desarrollar en cada planta. A diferencia del modelo, los planificadores no consideran todas las variables desde el primer momento, sino que dividen el proceso en dos etapas: primero determinan la producción por planta, y luego cada planificador de producción de cada planta define la distribución que debe desarrollarse en cada máquina para completar la demanda.

Por otro lado, el modelo calcula la producción contra pedido, que se refiere a la cantidad de productos fabricados en un período para satisfacer los requisitos de los pedidos. Este enfoque implica planificar la producción asignando los periodos y las máquinas que deben utilizarse para lograr el resultado óptimo. En contraste, en la programación manual, esta asignación solo se puede realizar una vez que se ha completado la planificación central determinando cuántos metros cúbicos de cada pedido se producirán en cada planta, y luego cada planificador de planta debe distribuir la producción entre las máquinas disponibles según su capacidad y disponibilidad. Aunque los planificadores hacen todo lo posible con la información disponible, la falta de una visión global al distribuir la demanda puede resultar en una planificación subóptima. En contraste, el modelo realiza esta distribución en un solo paso, considerando todas estas variables desde el principio, reduciendo el uso de recurso y los tiempos asociados a la planificación. Lo mismo ocurre con la definición del uso de stock, ya que, al realizar la planificación manual, solo se puede tener en cuenta el stock disponible en el momento del análisis de la producción, mientras que el programa puede anticipar el stock generado en cada periodo futuro. Esto permite dirigir de manera óptima el stock disponible hacia los pedidos correspondientes, considerando la planta en la que se está completando cada pedido. Adicionalmente, el modelo considera una variable de manejo de inventario como la producción contra stock la que refleja la cantidad de materiales producidos que se destinarán a satisfacer pedidos en períodos futuros, pero que serán almacenados temporalmente en el inventario. Esto permite utilizar de manera eficiente los materiales y recursos disponibles, evitando el exceso o la escasez de stock, lo que reduce costos operativos y maximiza la rentabilidad.

A partir de este conjunto de resultados, es posible determinar una serie de estadísticas que permiten visualizar cómo se comporta cada escenario. Primero, se analiza el porcentaje de pedidos cumplidos, lo que proporciona información sobre la viabilidad de satisfacer todas las solicitudes dentro del

periodo de estudio. La Tabla 10 compara las características de cada escenario junto con sus respectivos porcentajes de cumplimiento. En la primera columna se enumeran los escenarios, mientras que en la tercera y cuarta columna se presentan los resultados del modelo en términos de metros cúbicos completados y el porcentaje correspondiente de cumplimiento. En la quinta y sexta columna, se muestran los mismos indicadores para los resultados obtenidos por los planificadores.

**Tabla 10: Cumplimiento de la demanda en cada escenario.**

Escenarios	$m^3$ demandados	Modelo		Planificadores	
		$m^3$ cumplidos	% de cumplimiento	$m^3$ cumplidos	% de cumplimiento
1	22.472	21.390	95,18%	19.930	88,69%
2	393.066	357.62	90,09%	344.994	87,77%
3	5.038.800	4.509.432	89,49%	4.341.933	86,17%

En la Tabla 10 se observa una mejora promedio del 7% en el porcentaje de cumplimiento de la demanda en los escenarios del modelo con respecto a los resultados obtenidos por los planificadores. Este es atribuible a la inclusión de una mayor cantidad de variables en el modelo para estimar la cantidad óptima de pedidos a producir en cada instancia.

La carta Gantt generada por el modelo es presentada en la Tabla 11 y permite una visualización de cómo se debe realizar la producción durante los periodos en los que se realiza el estudio. En la primera columna se muestra un extracto de las maquinas disponibles, en la segunda columna se observan los productos que se producirán en cada máquina, mientras que las siguientes columnas representan un periodo para cada estudio, y representa la cantidad de metros cúbicos que se debe producir del determinado producto en la maquina especificada en cada periodo.

**Tabla 11: Extracto de la carta Gantt planificación de producción en  $m^3$  para el escenario 1.**

Máquina	Producto	Periodos			
		1	2	3	4
Terminacion_LoncocheLD	ChileCentral_VerdeVerdeRustico4,5m				31
	ChileCentralB_VerdeVerdeRustico4,4m				9
	ChileCentralB_VerdeVerdeRustico4,4m		30	30	
	M. OrienteCentralVerdeRustico4,2m	31			
Terminacion_LoncocheLG	CoreaLateralVerdeRustico4,5m	20			
	LANLateralVerdeRustico4,9m	112	110	32	20
	M. OrienteCentralVerdeRustico4,3m			79	
Terminacion_Mulchen	ChileCentralRetalSecoCepillado4,5m		11		
	ChileCentral_EstructuralSeco4,6m	17			
	ChileCentral_VerdeVerdeRustico4,3m	98			

La salida del modelo también permite ver el factor de uso de cada máquina para satisfacer los pedidos demandados, como se presenta en la Tabla 12. Esta visualización permite observar cuellos de botella que se pueden generar en la cadena productiva, y tomar las medidas correspondientes de ser necesario. La planificación manual no permite predecir estos índices de manera precisa ya que solo se trabaja con aproximados y los factores de disponibilidad de las máquinas se obtienen una vez realizada la producción. En la primera columna se encuentran las plantas de producción, en la segunda se muestran las máquinas utilizadas, y desde la tercera columna en adelante se encuentran los periodos de producción donde se señala el porcentaje de uso de cada máquina, donde el 100% corresponde a la máxima capacidad de uso de la máquina.

**Tabla 12: Extracto de resultados porcentaje de uso de máquinas por periodo.**

Escenario	Planta	Máquina	Periodos			
			1	2	3	4
1	LD_Loncoche	Terminacion_LoncocheLD	70%	72%	73%	72%
	LD_Nacimiento	Terminacion_NacimientoLD	80%	80%	80%	82%
	LG_Loncoche	Terminacion_LoncocheLG	98%	97%	96%	99%
	LG_Nacimiento	Terminacion_NacimientoLG	100%	100%	98%	100%
2	Aserrio_Bucalemu	Terminacion_Bucalemu	90%	99%	98%	99%
	Aserrio_Mulchen	Terminacion_Mulchen	99%	99%	97%	100%
	LD_Loncoche	Terminacion_LoncocheLD	79%	79%	73%	76%
	LD_Nacimiento	Terminacion_NacimientoLD	86%	89%	80%	89%
	LG_Loncoche	Terminacion_LoncocheLG	99%	97%	96%	99%
	LG_Nacimiento	Terminacion_NacimientoLG	100%	100%	98%	100%
	Aserrio_Laja	Terminación_Laja	100%	100%	100%	100%
3	Aserrio_Bucalemu	Terminacion_Bucalemu	70%	79%	98%	99%
	Aserrio_Mulchen	Terminacion_Mulchen	98%	89%	77%	100%
	LD_Loncoche	Terminacion_LoncocheLD	80%	82%	77%	100%
	LD_Nacimiento	Terminacion_NacimientoLD	82%	80%	87%	100%
	LG_Loncoche	Terminacion_LoncocheLG	98%	97%	99%	99%
	LG_Nacimiento	Terminacion_NacimientoLG	100%	100%	98%	100%

Con la fecha de entrega de los pedidos, es posible identificar cuáles pedidos se entregan puntualmente, cuáles presentan retraso y la cantidad de períodos de demora. Cabe destacar que el modelo incorpora un costo por retraso en cada pedido, y este retraso se produce en un escenario orientado a maximizar las ganancias. La Tabla 13 presenta un extracto de los resultados donde se detalla una serie de pedidos y si presenta retraso o no en su entrega. Esto permite renegociar las condiciones de los contratos antes de concretarlos o realizar los ajustes necesarios para poder completar la demanda solicitada. Mientras que la programación tradicional no permite este alcance ya que la demanda se trabaja periodo a periodo sin considerar posibles retrasos en la entrega de los pedidos.

**Tabla 13: Extracto de resultados cumplimiento de fecha de entrega de los pedidos.**

Escenario	Pedido	Estado de cumplimiento del pedido
1	2	se realizó en el plazo óptimo
	4	se realizó en el plazo óptimo
	5	se realizó en el plazo óptimo
	8	se realizó en el plazo óptimo
	11	1 periodos de retrasado
	17	2 periodos de retrasado
	19	2 periodos de retrasado
2	22	se realizó en el plazo óptimo
	34	se realizó en el plazo óptimo
	55	se realizó en el plazo óptimo
	98	1 periodos de retrasado
	211	1 periodos de retrasado
	337	1 periodos de retrasado
	429	3 periodos de retrasado
3	32	se realizó en el plazo óptimo
	74	se realizó en el plazo óptimo
	115	se realizó en el plazo óptimo
	1678	se realizó en el plazo óptimo
	2811	1 periodos de retrasado
	3997	1 periodos de retrasado
	4019	1 periodos de retrasado

La Tabla 14 presenta un extracto de los resultados de los ingresos de los pedidos seleccionados y los costos totales de cada pedido por el uso de las máquinas y los posibles transportes entre plantas para realizar la producción, ambos ejemplos obtenidos del escenario 1. La información contenida en esta tabla permite calcular el resultado EBITDA para los diferentes escenarios planteados dentro del programa. En la planificación tradicional, se aborda este aspecto utilizando aproximaciones de las producciones a realizar. Sin embargo, al no considerar los costos óptimos asociados al desarrollo de los pedidos, no se logra alcanzar un EBITDA óptimo.

**Tabla 14: Extracto de resultados de ingreso y costos por pedidos.**

Escenario	Pedido	Ingreso	Costo
1	2	14.400	9.786
	4	77.600	4.294
	5	83.400	9.208
	8	78.600	3.946
	11	50.000	8.375
	17	150.000	7.875
	19	370.200	7.975
	20	115.800	3.889
2	22	504.400	3.886
	34	447.600	4.834
	55	87.700	8.398
	98	176.300	9.236
	211	789.000	1.395
	337	90.300	7.945
	429	849.900	7.235
3	32	939.300	9.386
	74	123.900	4.894
	115	903.200	3.438
	1678	949.400	3.346
	2811	733.300	1.235
	3997	390.300	2.375
	4019	933.300	2.375

A partir del análisis del consumo de materiales, se determina la cantidad de productos verdes necesarios en cada planta, provenientes del área de aserradero, para cumplir con la demanda de pedidos a lo largo del periodo de estudio. La salida del modelo proporciona la capacidad de determinar qué productos deben ser consumidos para minimizar los costos, mientras que en la planificación tradicional solo se puede obtener una estimación aproximada de la cantidad de trozos necesarios para satisfacer la demanda.

A lo largo del desarrollo se presentaron diversas ventajas del modelo frente a la planificación tradicional, a continuación, la Tabla 15 presenta un cuadro comparativo que muestra las cualidades que destacan de cada metodología a la hora de realizar el plan de producción.

**Tabla 15: Extracto de resultados de ingreso y costos por pedidos.**

<b>Característica</b>	<b>Modelo</b>	<b>Planificadores</b>
Asignación de pedidos a plantas	Si	Si
Generar una aproximación de ingresos y costo	Si	Si
Priorización de pedidos según urgencia	Si	Si
Generar un plan de producción óptimo considerando EBITDA	Si	Limitado
Control de inventario	Si	Limitado
Asignación y análisis a largo plazo	Si	Limitado
Generar un plan de producción óptimo	Si	Limitado
Reducción del riesgo de sobreproducción o escasez de materiales	Si	Limitado
Eficiencia en el uso de recursos financieros	Si	Limitado
Mejora continua basada en datos	Si	Limitado
Simulación de múltiples escenarios simultáneos	Si	Limitado
Visualización de cargas de trabajo	Si	Limitado
Consideración de múltiples variables	Si	Limitado
Consideración de entregas en periodos diferentes	Si	Limitado
Identificación de cuellos de botella	Si	Limitado
Asignación de pedidos a máquinas	Si	Limitado
Automatización de procesos	Si	No
Minimización de errores humanos	Si	No
Capacidad de escalar para grandes volúmenes de producción	Si	No

## 5. Conclusiones

El presente trabajo de memoria de título propuso un modelo de programación lineal destinados a mejorar la planificación y programación de la producción en el negocio de aserradero de CMPC Maderas. El modelo, mediante un enfoque integral, considera variables críticas como la capacidad de las máquinas, la disponibilidad de materia prima y las restricciones temporales, generando un plan de producción eficiente. El modelo ofrece resultados que posibilitan un amplio análisis de varios escenarios, lo que permite identificar y desarrollar estrategias para distintos niveles de planificación. Esto proporciona una solución integral para mejorar la eficiencia operativa y facilitar la toma de decisiones en la cadena de producción forestal.

Los planificadores desempeñan un papel crucial en las plantas de producción de maderas, realizando la planificación de la producción tomando y decisiones basadas en su experiencia y datos históricos. La asignación de los pedidos se realiza individualmente priorizados principalmente por fecha de entrega. Aunque esta metodología es efectiva hasta ahora, este método depende en gran medida de la disponibilidad y rapidez de los planificadores y de la información disponible en el momento de la planificación. Por otro lado, el modelo implementado ofrece una perspectiva completa de la cadena de producción, abarcando desde la adquisición de la materia prima hasta la entrega del producto final al cliente. Además, proporciona diversas vistas de los resultados, adaptándose a los distintos aspectos que se deseen analizar o a las áreas específicas de implementación. Esta funcionalidad permite una exploración detallada y especializada de los datos, facilitando la comprensión y toma de decisiones en diversos contextos.

El modelo fue probado en tres escenarios de prueba, en cada una de las cuales demostró su capacidad para asignar los pedidos demandados de manera más eficiente y rentable. Esta eficacia se evidenció a través de la optimización en la distribución de recursos, maximizando beneficios y minimizando costos en cada escenario evaluado.

Una mejora futura para el modelo puede incluir la implementación de ingreso de datos mediante machine learning, tomando como base las dimensiones de la materia prima disponible y de los productos demandados con el fin de estimar parámetros como la capacidad, los tiempos y la calidad de producción de cada producto en cada máquina. Esto debido a que, en la actualidad, la introducción de información sobre atributos de productos se lleva a cabo mediante las bases de datos. Integrar un

modelo de machine learning podría optimizar significativamente este proceso, aumentando la eficiencia al automatizar el ingreso de datos y contribuir a una mayor precisión en la planificación.

A diferencia de los métodos convencionales, el uso de esta solución tecnológica proporciona una toma de decisiones más informada y estratégica. Al comparar los resultados históricos con las salidas del modelo, se puede evaluar de manera objetiva la efectividad de ambos enfoques. Este análisis brinda la oportunidad de identificar áreas de mejora y entender cómo la incorporación de tecnologías avanzadas puede traer beneficios sustanciales para aumentar la eficiencia y la rentabilidad en la planificación de la producción en la industria forestal.

## 6. Referencias

- Agustiady, T., & Cudney, E. (2017). Total Productive Maintenance: Strategies and Implementation Guide. CRC Press.
- Cieza Vasquez, V. V. (2021). Planeación de la producción aplicando programación lineal para la optimización de costos en la empresa producciones nacionales TC. E.I.R.L. Tesis de grado, Universidad Señor de Sipan.
- CMPC (2024). Producción y Abastecimiento M. Capacitación de Calibradores. Mininco.cl.
- Drexl A., & Kimms A. (1997). Lot sizing and scheduling: Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99, 221-235.
- Fleischmann, B., & Meyr, H. (1997). The general problem of lot sizing and scheduling. *OR Spectrum*, 19(1), 11-21.
- Gazmuri, P., & Arrate, I. (1995) Modeling and Visualization for a Production Planning Decision Support System. *International Transactions in Operational Research*, Vol. 2(3): 249-258.
- Instituto forestal (2024). INFOR: En el sector forestal chileno. Recuperado 28 de febrero de 2024, de <https://wef.infor.cl/index.php/destacados/mercado-forestal>
- Jolayemi, J., & Olorunniwo, F. A. (2004) Deterministic Model for Planning Production Quantities in a Multi-Plant, Multi-Warehouse Environment with Extensible Capacities. *International Journal of Production Economics*, Vol. 87(2): 99-113.
- Kopanos, G. M., Puigjaner, L., & Maravelias, C. T. (2011). Production Planning and Scheduling of Parallel Continuous Processes with Product Families. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1369–1378(2011), 50.
- Maness, T., & Adams, D. (1991). The combined optimization of log bucking and sawing strategies. *Wood and Fiber Science*, 23(2), 296-314.
- CMPC (2010). Manual Producción y Abastecimiento versión 2. Recuperado a la fecha de enero

2024.

<http://www.mininco.cl/sga/pages/abresearchivo2.asp?arch=archivos/112/Manual%20de%20Capacitaci%F3n%20repcionistas%20%282010%29.pdf>

Quadt, D., & Kuhn, H. (2008). Capacitated lot-sizing with extensions: a review. *4OR*, 6, 61-83.

Rönnqvist, M. (2003). Optimization in forestry. *Mathematical Programming* 97:267-284.

Seguel, J. E. G. (2007). Optimización De Los Esquemas De Corte En Aserraderos Forestales Mediante Algoritmos Metaheurísticos. Universidad de Concepción.

Viveros, R., & Salazar, E., (2010). Modelo de Planificación de Producción para un Sistema Multiproducto con Múltiples Líneas de Producción: Vol. XXIV. *Revista Ingeniería de Sistemas*.

Wessels, C., Price, C., Turner, P., & Dell, M. (2006). Integrating harvesting and sawmill operations using an optimized sawmill production planning system. *Proceedings International Precision Forestry Symposium IUFRO*, 341-347.

Zhang, Y., Toppinen, A., & Uusivuori, J. (2014). Internationalization of the forest products industry: A synthesis of literature and implications for future research. *Forest Policy and Economics* 38:8-16.