



Departamento de
Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN TÁCTICA DE LA PRODUCCIÓN EN CMPC MADERAS SPA

POR

Pedro Romeo Silva Velásquez

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

Profesor Guía:

Carlos Contreras Bolton

Ingeniero Supervisor:

Sergio Cuevas Mardones

Julio 2025

Concepción, Chile

© 2025, Pedro Romeo Silva Velásquez

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

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis padres por su constante apoyo y el esfuerzo que han realizado a lo largo de todo mi camino académico. A mi abuela materna, por estar siempre dispuesta a ayudar en lo que haga falta. A mi hermano, por su compañía y valiosos consejos; y a mi pareja, por su apoyo incondicional, así como también a su familia.

Extiendo además mi agradecimiento a mis amigos, quienes me acogieron y compartieron conmigo todo nuestro paso por la Universidad de Concepción.

Agradezco a mi profesor guía por su orientación, compromiso y disposición durante el desarrollo de esta memoria, así como al equipo de trabajo *CAPACITY*, por su colaboración, confianza y apoyo constante en el desarrollo de este proyecto.

Resumen

Esta memoria es desarrollada en CMPC Maderas, empresa del sector forestal dedicada a la producción de madera aserrada. Actualmente, su planificación táctica se realiza mediante balances trimestrales elaborados de forma manual por cada aserradero, lo que genera limitaciones en términos de eficiencia, trazabilidad, coordinación entre unidades productivas y capacidad de simular escenarios. En este contexto, surge el proyecto *CAPACITY*, una iniciativa desarrollada junto al área de planificación central que busca reemplazar el sistema actual basado en estimaciones empíricas de los aserraderos. Si bien *CAPACITY* ha implementado un modelo de programación lineal para programar y planificar la producción de los aserraderos, este aún presenta limitaciones importantes, como la ausencia de esquemas de corte, la falta de integración de restricciones técnicas relevantes y debilidades estructurales en su formulación, lo que impide su uso como una herramienta táctica robusta. Por tanto, este trabajo diseña y mejora el modelo existente de programación lineal, representando de forma precisa el problema de planificación, las restricciones operativas y la optimización de recursos. El modelo considera variables asociadas a producción, inventarios, trasposos, servicios externos y esquemas de corte, con el fin de maximizar el beneficio neto de la operación. El modelo propuesto es validado en seis escenarios representativos, los cuales permitieron analizar su desempeño en condiciones reales. Los resultados evidencian mejoras en la utilización de recursos, cumplimiento de demanda y rentabilidad, entregando a la empresa una herramienta sólida y flexible para la toma de decisiones tácticas y la evaluación de estrategias productivas.

Keywords – Planificación táctica, Programación lineal, Optimización, Aserradero

Abstract

This thesis was developed at CMPC Maderas, a forestry company dedicated to the production of sawn timber. Currently, its tactical planning is carried out through quarterly balance sheets manually prepared by each sawmill, which generates limitations in terms of efficiency, traceability, coordination between production units, and the ability to simulate scenarios. In this context, the CAPACITY project emerged as an initiative developed in collaboration with the central planning area, aiming to replace the current system based on empirical estimates made by the sawmills. Although CAPACITY has implemented a linear programming model to support the production planning process, it still presents significant limitations, such as the absence of cutting schemes, the lack of integration of relevant technical constraints, and structural weaknesses in its formulation, which prevent its use as a robust tactical tool. Therefore, this work designs and enhances the existing linear programming model, accurately representing the planning problem, operational constraints, and resource optimization. The model incorporates variables related to production, inventories, inter-plant transfers, external services, and cutting schemes, with the objective of maximizing net operational profit. The proposed model is validated through six representative scenarios, which enabled performance evaluation under real-world conditions. The results demonstrate improvements in resource utilization, demand fulfillment, and profitability, providing the company with a solid and flexible tool for tactical decision-making and the evaluation of production strategies.

Keywords – Tactical planning, Linear programming, Optimization, Sawmill

Índice General

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
Abstract	III
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Objetivos del proyecto	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Estructura del informe	4
2. Problema de planificación táctica de la producción en aserraderos	5
2.1. Definición de conceptos	5
2.2. Planificación táctica de la producción	9
2.3. Descripción del problema	12
2.4. Revisión de la literatura	15
3. Modelo propuesto	18
3.1. Planteamiento del modelo	18
4. Resultados	28
4.1. Descripción de instancias	28
4.2. Resultados del modelo	31
4.2.1. Resultados de la instancia 1	32
4.2.2. Resultados de la instancia 2	32
4.2.3. Resultados de la instancia 3	33
4.2.4. Resultados de la instancia 4	33
4.2.5. Resultados de la instancia 5	34
4.2.6. Resultados de la instancia 6	34
4.2.7. Utilización de las máquinas en las instancias 1 a 5	35
4.2.8. Utilización de las máquinas en la instancia 6	39
4.2.9. Ejemplo de cumplimiento de un pedido en la instancia 6	40
4.2.10. Comparación con balance trimestral	41
5. Conclusión	43
Referencias	45

Índice General	v
Apéndices	46
A. Resultados	46

Índice de Tablas

1.	Ejemplo ruta de procesos.	8
2.	Ejemplo de parámetros.	14
3.	Conjuntos del modelo.	19
4.	Parámetros del modelo.	20
5.	Variables de decisión del modelo.	22
6.	Pedidos instancia 1, 2, 3, 4 y 5.	29
7.	Pedidos de la sexta instancia.	31
8.	Comparación de resultados entre instancias.	32
9.	Resumen de resultados del escenario 6.	35
10.	Porcentaje de utilización de cada máquina por planta, periodo y escenario.	36
11.	Total de horas utilizadas, disponibles y porcentaje de utilización por máquina en el escenario 6.	39
12.	Producción por periodo y proceso del pedido 10.	40
13.	Balance y Capacidad por Producto.	42
A14.	Ruta de procesos.	46
A15.	Abastecimiento en Bucalemu de materia prima en m^3	47
A16.	Abastecimiento en Mulchen de materia prima en m^3	47
A17.	Abastecimiento en Nacimiento de materia prima en m^3	48
A18.	Producción en aserradero por planta y período escenario real	48
A19.	Stock final en aserradero por planta y período escenario real	48
A20.	Producción en proceso de secado por planta y período escenario real	48
A21.	Stock final en proceso de secado por planta y período escenario real	49
A22.	Producción en el proceso de baño por planta y período escenario real	49
A23.	Producción en proceso Drymill por planta, máquina y período escenario real	49
A24.	Detalle de trasposos de material entre plantas escenario real	49
A25.	Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Mulchen escenario real	49
A26.	Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Bucalemu escenario real	49
A27.	Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Nacimiento escenario real	50
A28.	Componentes de la función objetivo escenario real	50
A29.	Producción en el proceso de aserradero escenario 1	50
A30.	Stock final en aserradero por período escenario 1	50
A31.	Producción en el proceso de secado escenario 1	50
A32.	Stock final en secado por período escenario 1	50
A33.	Producción en el proceso de baño escenario 1	51
A34.	Producción en el proceso de drymill escenario 1	51
A35.	Trasposos de salida por material y período escenario 1	51
A36.	Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Mulchen escenario 1	51

A37. Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Bucalemu escenario 1 . . .	51
A38. Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Nacimiento escenario 1 . .	52
A39. Componentes de la función objetivo escenario 1	52
A40. Producción en el proceso de aserradero escenario 2	52
A41. Stock final en aserradero por período escenario 2	52
A42. Producción en el proceso de secado escenario 2	52
A43. Stock final en secado por período escenario 2	52
A44. Producción en el proceso de baño escenario 2	53
A45. Producción en el proceso de drymill escenario 2	53
A46. Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Mulchen escenario 2	53
A47. Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Bucalemu escenario 2	53
A48. Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Nacimiento escenario 2 . .	53
A49. Componentes de la función objetivo escenario 2	54
A50. Producción en el proceso de aserradero escenario 3	54
A51. Stock final en aserradero por periodo escenario 3	54
A52. Producción en el proceso de secado escenario 3	54
A53. Stock final en secado por periodo escenario 3	54
A54. Stock final en secado por periodo escenario 3	54
A55. Producción en el proceso de baño escenario 3	55
A56. Producción en el proceso de drymill escenario 3	55
A57. Componentes de la función objetivo escenario 4	55

Índice de Figuras

1.	Esquema de corte de <i>CAPACITY</i>	9
2.	Representación del proceso de aserrío.	11
3.	Representación de un aserradero.	12
4.	Ejemplo del problema para cumplir el pedido 1.	14

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo tiene como objetivo presentar la relevancia de la industria forestal en Chile. Se presenta a CMPC como uno de los principales actores del sector y se describe el proyecto *CAPACITY*. Finalmente, se exponen los objetivos del proyecto y la estructura del informe.

1.1. Antecedentes generales

La industria forestal en Chile es de suma importancia ya que genera grandes beneficios tanto sociales como económicos. En 2024, esta industria alcanzó una exportación de 6.370 millones de dólares en FOB (*Free on Board*) y generó empleos para más de 102 mil personas según el [Instituto Forestal \(2024\)](#). Además, representa aproximadamente el 1,6 % del producto interno bruto nacional, consolidándose así como uno de los sectores productivos más relevantes del país. El patrimonio forestal nacional supera las 2,4 millones de hectáreas de plantaciones, principalmente de especies como el pino radiata y el eucalipto, lo que posibilita una producción industrial constante ([Instituto Forestal, 2024](#)). Este considerable volumen de superficie plantada posiciona a Chile como uno de los líderes en producción forestal en Latinoamérica, respaldado por una sólida infraestructura exportadora y un enfoque en la sostenibilidad y la certificación ambiental.

Dentro de esta industria, una de las empresas más importantes es la Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones (CMPC), que cuenta con 105 años de experiencia en el sector forestal. Esta empresa está compuesta por tres grandes unidades de negocio: CMPC Celulosa, CMPC *Biopackaging* y *Softys*. CMPC produce una extensa variedad de productos de madera, celulosa, papel, embalaje y *tissue*, y emplea a alrededor de 20 mil colaboradores directos, cifra que

aumenta a más de 50 mil colaboradores si se consideran los indirectos. Además, CMPC se encuentra entre los cinco principales productores globales en su rubro, con ventas anuales de 8.097 millones de dólares, según la [Memoria Anual Inversiones CMPC \(2023\)](#).

En particular, esta memoria de título es realizada en CMPC Maderas, una división de CMPC Celulosa especializada en la transformación de la madera proveniente de los bosques propios y externos. Esta división está conformada por cuatro grandes plantas: Bucalemu, Mulchén, Nacimiento y Loncoche. Cada planta tiene un funcionamiento diferente, ya que posee maquinaria distinta, realiza diversos procesos y trabaja con diferentes diámetros de madera, lo que hace que la planificación de la producción y la generación de ofertas sea un desafío considerable.

El área de planificación central de CMPC Maderas tiene como objetivo consolidar e integrar la información de los distintos aserraderos. Con el fin de optimizar el uso de los recursos y planificar la producción futura de manera eficiente. Al mismo tiempo, el área comercial busca satisfacer la demanda de los productos aserrados solicitados por los clientes, lo que requiere que la planificación central genere una oferta trimestral basada en la capacidad de producción de los aserraderos. Para construir esta oferta, cada planta debe realizar su propio balance trimestral, teniendo en cuenta sus características específicas y la experiencia de los programadores, quienes actualmente carecen de herramientas sofisticadas para realizar una planificación adecuada. Posteriormente, esta información es validada por planificación central, la cual genera la oferta final para el área comercial y determina qué y cuánto debe producir cada planta. Sin embargo, este proceso depende de herramientas como hojas de calculo, lo que limita la escalabilidad, trazabilidad y capacidad de simulación ante escenarios alternativos, dificultando la estandarización y automatización del proceso.

En este contexto, surge el proyecto *CAPACITY*, que ha estado trabajando durante años como apoyo en la programación de la producción junto al área de planificación central. Actualmente, el proyecto busca desarrollar un sistema que permita planificar sin depender de las estimaciones realizadas por los aserraderos. Este sistema actual es poco ortodoxo, ya que se basa en la experiencia de los planificadores de planta, lo que presenta numerosas limitaciones, especialmente cuando se requieren modificaciones o cambios importantes. Por tanto, el objetivo de este trabajo es crear una solución que permita evaluar diferentes escenarios y opciones de producción con la misma cantidad de materia prima, lo que brindaría al área comercial diversas ofertas que podrían satisfacer mejor los requisitos de los clientes. Al mismo

tiempo que optimizan el uso de los recursos disponibles, generando mayores beneficios tanto para la organización como para los clientes.

Actualmente, *CAPACITY* dispone de un modelo de optimización en desarrollo, el cual busca mejorar la toma de decisiones en los aserraderos, abarcando el flujo de materiales a través de los procesos hasta su conversión en productos aserrados terminados. El proceso comienza con la definición de la cantidad de producción de cada aserradero, la cantidad de producción almacenada como *stock* en los distintos procesos y la cantidad de *stock* utilizada para cumplir con los pedidos. Sin embargo, este modelo de optimización está incompleto y presenta limitaciones en su modelación e implementación. Como por ejemplo, no incluir la utilización esquemas de corte en la materia prima, la falta de integración de restricciones técnicas relevantes y debilidades en su formulación. Por tanto, es necesario implementar mejoras que integren la decisión sobre los esquemas de corte que cada planta debe aplicar a los trozos de madera en un período de tiempo determinado. Además, es esencial añadir otros requisitos fundamentales como el rango de diámetros de materia prima que procesa cada aserradero y costos por la utilización de la materia prima, para que el funcionamiento del modelo sea acorde a la realidad.

Se espera que el modelo mejorado facilite la generación de diferentes escenarios durante la planificación de la producción, lo que permitirá aprovechar de manera más eficiente la materia prima disponible y mejorar los beneficios para la organización. Adicionalmente, los resultados del modelo mejorado deben ser analizados y comparados con la planificación de la producción realizada originalmente por CMPC Maderas de forma tradicional, utilizando los datos correspondientes a un periodo de tiempo específico.

El modelo propuesto permite planificar de manera táctica la producción de madera aserrada en CMPC Maderas, resolviendo simultáneamente decisiones relacionadas con la asignación de producción por pedido, la utilización de inventarios, la ejecución de trasposos entre plantas, la contratación de servicios externos y la selección de esquemas de corte. Todo esto bajo restricciones operativas reales y con el objetivo de maximizar el beneficio neto de la operación. Para validar su efectividad, el modelo fue evaluado en seis instancias representativas, construidas con datos reales y configuraciones distintas, lo que permitió analizar su comportamiento en escenarios con diferentes niveles de complejidad y restricciones operativas. La herramienta entrega una solución integrada y optimizada que apoya directamente el proceso de toma de decisiones de planificación, mejorando la eficiencia, trazabilidad y flexibilidad del

sistema productivo.

1.2. Objetivos del proyecto

1.2.1. Objetivo general

Implementar un modelo de programación lineal para la planificación táctica de la producción de madera aserrada en CMPC Maderas, con el fin de optimizar la asignación de recursos bajo restricciones operativas reales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la literatura sobre problemas de planificación de la producción y asignación de recursos en aserraderos.
- Diseñar nuevas variables y restricciones e integrarlas al modelo de programación lineal actual.
- Analizar el desempeño de la implementación del modelo propuesto.
- Contrastar los resultados obtenidos con datos reales de la planificación de la producción en la organización.

1.3. Estructura del informe

El resto del informe está compuesto por los siguientes capítulos: El capítulo 2 proporciona un análisis detallado del problema a abordar, definiendo los aspectos clave necesarios para comprender la problemática. Además, incluye una revisión de la literatura de problemas similares. El capítulo 3 presenta el modelo propuesto para la resolución de la problemática. El capítulo 4 presenta los resultados obtenidos, evaluando el desempeño de la metodología utilizada para resolver el problema planteado. Finalmente, el capítulo 5 concluye el proyecto, destacando la relevancia de los resultados alcanzados para la organización y señalando posibles oportunidades de mejora, así como áreas para futuras investigaciones.

Capítulo 2

Problema de planificación táctica de la producción en aserraderos

El objetivo de este capítulo es contextualizar el entorno operativo de CMPC Maderas y describir de manera detallada el problema abordado en esta memoria. Se presentan los principales conceptos técnicos relacionados con el proceso de aserrío, los actores involucrados y las limitaciones del sistema de planificación actual. Finalmente, se analiza cómo problemas similares han sido abordados en la literatura y se explica su relación con el proyecto a desarrollar.

2.1. Definición de conceptos

La planificación de la producción a nivel táctico requiere la consideración de diversos factores clave que influyen en la toma de decisiones dentro de un aserradero. A continuación, se definen los aspectos más relevantes para comprender el funcionamiento y los desafíos de este proceso.

Materia Prima

La materia prima de un aserradero proviene directamente del bosque y se compone principalmente de trozos de madera, con o sin corteza, que varían en longitud y diámetro debido a las propiedades naturales de la madera y su alta variabilidad. Cada planta tiene preferencias específicas basadas en su equipamiento y procesos internos, los cuales determinan los tipos de trozos que resultan más eficientes para su operación.

Aserradero

Un aserradero es una planta productiva de CMPC Maderas especializada en la transformación de la materia prima en tablas aserradas, las cuales son solicitadas por diversos clientes. Estas plantas cuentan con instalaciones físicas, equipos, maquinaria y personal altamente capacitado. Este proyecto considera los aserraderos de Mulchén, Nacimiento y Bucalemu, donde la materia prima debe atravesar una serie de procesos antes de estar lista para su comercialización. Cada planta dispone de distintos procesos productivos, adaptados a las características de su infraestructura y al tipo de producto final requerido.

Procesos

Los procesos corresponden a la transformación de la materia prima o de productos en proceso en productos finales en un aserradero, a medida que avanzan a través de las distintas etapas de producción. Cada planta puede contar con todos o algunos de los siguientes procesos:

- **Aserrío:** Es el primer proceso al que se somete la materia prima. Consiste en cortar el trozo cilíndrico de madera según un patrón de corte específico, con el fin de obtener distintos tipos y tamaños de tablas, tanto centrales como laterales.
- **Reproceso:** El reproceso consiste en volver a aserrar la madera central obtenida en el proceso de aserrío, con el objetivo de generar más piezas centrales y aprovechar mejor la materia prima, maximizando así el rendimiento del material.
- **Secado:** Este proceso es crucial para reducir los niveles de humedad de las tablas aserradas, asegurando su estabilidad dimensional y evitando deformaciones. El secado se realiza en cámaras especializadas, diseñadas para trabajar con las maderas obtenidas en el proceso de aserrío.
- **Baño:** A diferencia del secado, el baño es un proceso químico que sigue al aserrío. Durante este proceso, la madera aserrada se sumerge en una solución química que impide su descomposición y mejora algunas de sus propiedades.
- **Drymill:** El *drymill* abarca dos procesos dentro de la misma línea de producción: el clasificado y el cepillado. Algunos aserraderos realizan ambos procesos, mientras que otros solo cuentan con el proceso de clasificado.
 - **Clasificado:** Este proceso consiste en clasificar las tablas aserradas según criterios como calidad, tamaño y otras características.

- **Cepillado:** En este proceso, se eliminan las irregularidades superficiales de las tablas para mejorar su acabado. El cepillado puede ser de dos caras o de cuatro caras, según el acabado requerido y las dimensiones de la tabla.
- **Impregnado:** Este proceso introduce productos químicos en la madera para aumentar su resistencia a agentes biológicos, como hongos e insectos, prolongando así su vida útil.

Máquinas

Las máquinas son herramientas industriales de gran tamaño y capacidad, utilizadas para desarrollar los procesos mencionados anteriormente. Cada proceso está compuesto por máquinas especializadas, y cada máquina puede procesar distintos tipos de materiales. Las velocidades y rendimientos de las máquinas varían en función de los productos que procesan. Además, cada máquina opera a un porcentaje de su velocidad máxima, conocido como ritmo de trabajo. La disponibilidad de una máquina se refiere al tiempo efectivo de funcionamiento, calculado en función de las horas totales de operación de un proceso dentro del aserradero, del cual se deben descontar tiempos de mantenimiento, recambios, fallas, entre otros. Esto da lugar a un porcentaje de disponibilidad de la máquina.

Pedido

Un pedido corresponde a una solicitud específica de producción realizada por el área comercial de CMPC Maderas, la cual contiene información detallada sobre el producto a fabricar, su volumen requerido y características técnicas (como dimensiones, humedad y tratamiento).

Cliente

Un cliente corresponde a una empresa u organización que adquiere productos terminados de madera aserrada ofrecidos por CMPC Maderas. Estos clientes pueden ser tanto nacionales como internacionales y representan la fuente directa de la demanda que debe ser atendida por la compañía. Cada cliente realiza uno o más pedidos, los cuales especifican el volumen requerido en metros cúbicos, así como las características técnicas del producto.

Demanda

La demanda se refiere a la cantidad total de metros cúbicos de productos que deben ser producidos por los diferentes aserraderos para satisfacer los pedidos de los clientes. Para cumplir con la demanda de un pedido específico, cada aserradero debe planificar cómo procesar la madera, determinando qué cantidad de material se necesita y qué procesos productivos se seguirán para transformarlo en el producto final requerido.

Ruta

La ruta corresponde a la secuencia de procesos productivos que debe seguir un pedido dentro del aserradero para transformar un trozo de madera en un producto final. Esta secuencia varía según las características del pedido y se define desde el proceso final hacia el inicio, siendo el aserradero el primer proceso común a todas las rutas. La **Tabla 1** muestra un ejemplo de rutas, donde cada una está compuesta por una serie de procesos ordenados secuencialmente. La notación S indica la posición dentro de la ruta, siendo S1 el último proceso que se ejecuta para completar la transformación del producto.

Tabla 1: Ejemplo ruta de procesos.

Ruta	S1	S2	S3	S4	S5
1	drymill	secado	aserrío		
2	impregnado	drymill	secado	aserrío	
3	baño	aserradero			
4	secadoimp	impregnado	drymill	secado	aserrío
5	secadoimp	impregnado	drymill	secado	aserrío

Producto en proceso

Un producto o material en proceso es aquel que aún no ha completado todos los procesos de su ruta de producción. En la **Tabla 1**, un pedido que, por ejemplo, tiene asignada la ruta 1, es considerado un producto en proceso si se encuentra en su proceso secuencial **S2** o **S3**. Además, su nombre dependerá del proceso en el que se encuentre en ese momento.

Producto terminado

Un producto se considera terminado una vez que ha completado el último proceso de su respectiva ruta. Por ejemplo, si un pedido está asociado a la ruta 1 de la **Tabla 1**, el producto finaliza su producción al concluir su proceso final **S1**. Posteriormente, el producto se encuentra listo para su comercialización y entrega al cliente que realizó el pedido.

Producto verde

Se denomina producto verde a los productos terminados del proceso de baño. Esto se debe a que la materia prima siempre inicia su ruta en el proceso de aserrío, donde se aplica un esquema de corte a un trozo de madera. Posteriormente, el producto debe ser sometido a un baño químico para preservar sus propiedades, protegiéndolo estructural y sanitariamente.

Esquema de corte

El esquema de corte es un patrón que se aplica a la materia prima del aserradero como parte

del primer proceso de un pedido. Durante el aserrío, la materia prima se trocea para obtener tablas de diferentes medidas. La cantidad y las dimensiones de las tablas obtenidas dependen del esquema de corte utilizado. Cada planta, según sus características y maquinarias, puede aplicar distintos tipos de esquemas de corte, los cuales varían en función de las dimensiones de la materia prima. Esto da lugar a la producción de productos y cantidades diferentes entre los aserraderos. La **Figura 1** muestra un ejemplo de un esquema de corte aplicado a un trozo de madera, con el objetivo de obtener las piezas laterales y centrales en las medidas especificadas.

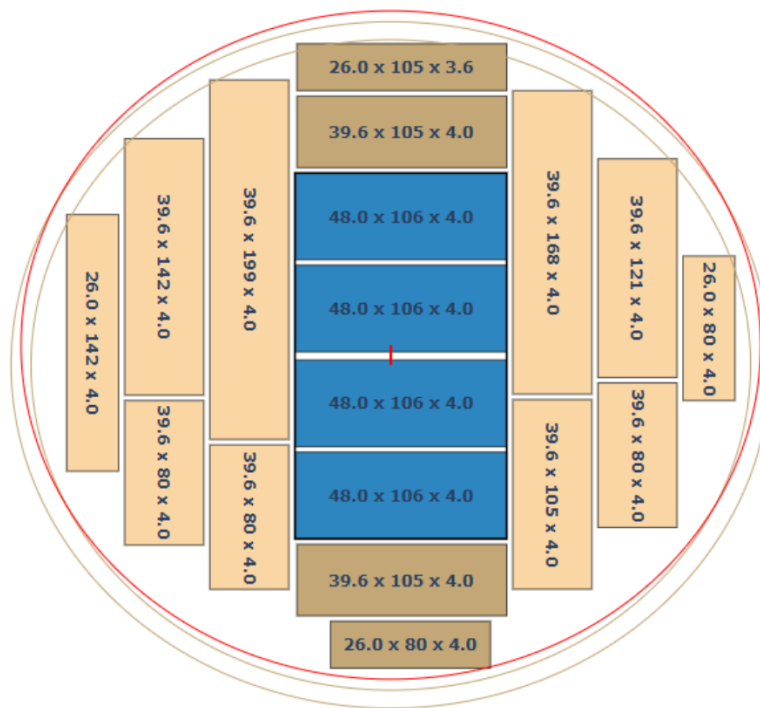


Figura 1: Esquema de corte de *CAPACITY*.

2.2. Planificación táctica de la producción

La planificación táctica de la producción en aserraderos es una actividad clave para garantizar el uso eficiente de la materia prima y los recursos de la organización, satisfacer la demanda de los pedidos del mercado y coordinar la operación de múltiples plantas productivas. En CMPC Maderas, esta planificación enfrenta diversas complejidades debido a la variabilidad de los procesos, las máquinas, los tiempos disponibles, los ritmos de producción y las capacidades técnicas de cada aserradero.

En general, la planificación táctica abarca un período de tiempo de varios meses y debe

estar alineada con los objetivos estratégicos a largo plazo, así como con el cumplimiento de las restricciones operativas de las plantas. Para ello, es necesario determinar qué producir, cuánto producir, dónde y cuándo hacerlo, considerando tanto las capacidades operativas de las plantas como las características de la materia prima. Además, la producción de un producto final involucra una serie de productos intermedios y procesos previos que también deben ser considerados en la planificación. Estos productos intermedios y procesos dependen de la ruta de producción del producto demandado.

Actualmente, la planificación se lleva a cabo de manera manual y descentralizada. Cada planta elabora sus propios balances trimestrales de producción, en los cuales definen qué productos producirán, en qué volúmenes, qué procesos se emplearán y en qué períodos de tiempo se llevarán a cabo. Esta información se genera con base en datos históricos de producción, ajustados al presupuesto anual. Sin embargo, extraer, interpretar y simular escenarios alternativos resulta complejo, lo que dificulta la toma de decisiones y la respuesta rápida ante cambios en la demanda o en el abastecimiento de trozos de madera provenientes del bosque.

Una de las decisiones más importantes es determinar qué esquemas de corte se deben aplicar a los trozos abastecidos para fabricar los productos demandados en los pedidos. Esta decisión, que no está integrada en el balance trimestral, corresponde a una operación diaria que debe ser tomada por los planificadores de planta en función de su experiencia, la cantidad de materia prima disponible y los productos que se esperan obtener. Esta actividad es crucial, ya que afecta el rendimiento de la materia prima, las velocidades de producción y los productos intermedios generados. La **Figura 2** ilustra un ejemplo de la decisión de utilizar el esquema de corte 1 en un trozo 22.0_4.0_Industrial de 22 centímetros de diámetro y 4 metros de largo, mostrando cómo este esquema genera distintas dimensiones de productos en milímetros como 24_<100, 24_100, 24_115-159, 24_>160 y 37_<100 en los porcentajes indicados en la figura.

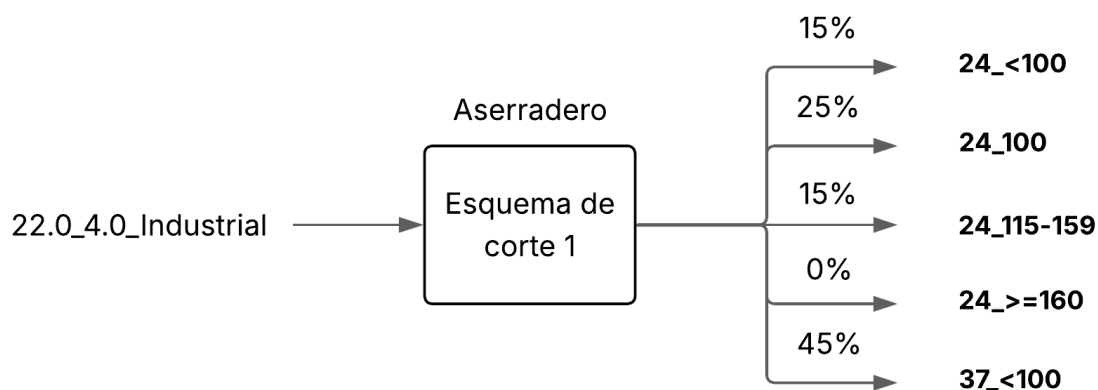


Figura 2: Representación del proceso de aserrío.

La **Figura 3** ilustra el flujo de materiales a través de los distintos procesos en un aserradero. El proceso comienza con los trozos de madera que ingresan al aserrío, donde se cortan para obtener madera aserrada en diversas medidas, como se muestra en la **Figura 2**. Posteriormente, la madera aserrada pasa por el proceso de secado, donde se reduce su humedad, o bien, puede ser sometida al proceso de baño, en el cual se aplica una solución química. Una vez secada, la madera puede almacenarse en *stock* o ser transferida a procesos posteriores, como el clasificado y el cepillado en la etapa de *Drymill*. En esta fase, se mejoran sus propiedades, como el acabado y la clasificación según calidad y tamaño. Finalmente, los productos terminados, listos para su comercialización, se generan a partir de estos procesos y se almacenan o entregan de acuerdo con la demanda. Este diagrama ilustra cómo cada etapa del proceso está interconectada, permitiendo que la materia prima se transforme en productos finales que cumplen con los requisitos del mercado.

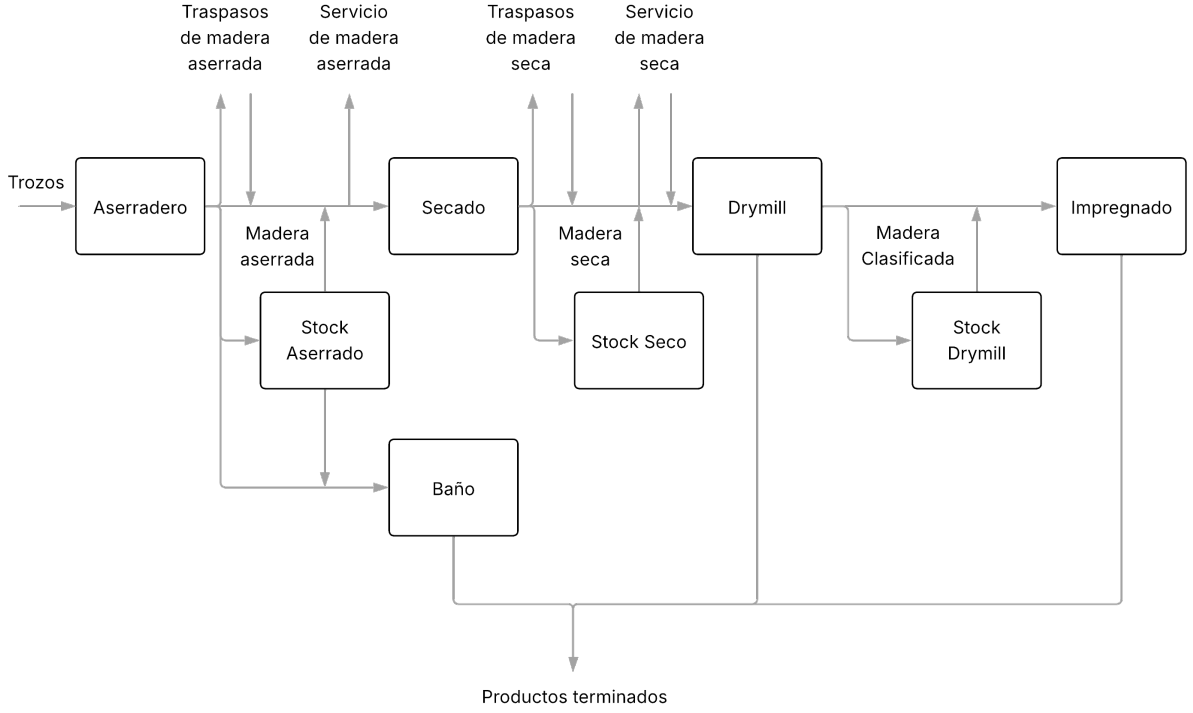


Figura 3: Representación de un aserradero.

2.3. Descripción del problema

El problema de planificación táctica de la producción en aserraderos de CMPC Maderas se origina a partir de una serie de pedidos $p \in P$, cada uno asociado a una demanda D_p , $p \in P$, medida en metros cúbicos (m^3) de madera aserrada. Para satisfacer esta demanda, cada pedido debe seguir una ruta específica $r \in R$, compuesta por un conjunto ordenado de procesos $b \in B$, que transforman la materia prima en un producto final. En cada uno de estos procesos, denotados por $\hat{b} \in B_r$, $r \in R$, se genera un producto intermedio $i \in I$. El último proceso de la ruta, identificado como $\hat{b}_0$, define el producto terminado, listo para su comercialización.

Cada pedido posee un valor unitario de venta Q_p , $p \in P$, así como un costo de producción C_{im} , asociado al material $i \in I$ y al uso de las máquinas $m \in M$ requeridas en los procesos $\hat{b} \in B_r$ de la ruta R_p del pedido. Estas máquinas se emplean en la producción del producto $i \in I$ correspondiente al pedido. El objetivo principal es satisfacer la mayor parte de la demanda total de los pedidos D_p , $p \in P$, dentro de un horizonte de planificación compuesto por períodos $t \in T$, maximizando así el beneficio neto.

La producción puede llevarse a cabo en cualquiera de los aserraderos $a \in A$, siempre que el proceso requerido $b \in B$ esté disponible en la planta, es decir, que $b \in B_a$. Cada planta $a \in A$ cuenta con un conjunto de máquinas $m \in M_a$, con parámetros asociados como el tiempo disponible por período H_{mt}^d , $m \in M, t \in T$; el rendimiento U_{im} , $m \in M$; la velocidad de procesamiento V_{im} , $m \in M$; y el ritmo de trabajo H_{im}^r , $m \in M$ para cada producto $i \in I$.

Adicionalmente, existe un conjunto de esquemas de corte $s \in S$, cada uno con un tiempo de producción T_s y un diámetro característico d_s , los cuales generan productos aserrados $j \in J$. Estos productos pueden ser almacenados en inventario S_{jat}^F , $j \in J, a \in A, t \in T$ o bien ser utilizados inmediatamente en procesos posteriores como el secado o el baño, que comúnmente siguen al proceso de aserrío, tal como se muestra en la **Figura 3** a donde se dirigen los flujos que salen del aserradero.

La materia prima se representa por un conjunto $k \in K$, correspondiente a los trozos de madera abastecidos al sistema. Cada planta $a \in A$ tiene restricciones de operación definidas por un rango de diámetros admisibles entre d_a^m y d_a^M , determinados por su equipamiento técnico.

Además, existe la posibilidad de realizar trasposos de productos entre plantas $a \in A$ y $\hat{a} \in A$, ya sea para productos intermedios $i \in I$ o productos aserrados $j \in J$. Estos movimientos generan un costo adicional de transporte $C_{ia\hat{a}}^T$, que debe ser considerado dentro del modelo. De forma similar, es posible externalizar procesos $b \in B$, permitiendo que un producto $i \in I$ sea enviado a un servicio externo y devuelto como un producto modificado $\hat{i} \in I$, correspondiente al siguiente proceso dentro de la misma ruta $r \in R$.

La **Figura 3** es una representación esquemática de una planta aserradera, donde se visualizan los flujos de productos intermedios $i \in I$ en cada proceso $b \in B$, así como las posibles etapas de almacenamiento intermedio (*stock*) que permiten la utilización de productos en períodos posteriores $t \in T$. Además, se muestran los trasposos y servicios que llegan y se van de un proceso. La figura destaca los procesos que generan productos terminados $i \in I$, listos para ser comercializados.

Un ejemplo simplificado de las decisiones necesarias dentro de un aserradero para cumplir con la demanda de un producto es mostrado en la **Figura 4**. Esta figura ilustra gráficamente el flujo de materiales a través de los procesos del aserradero para cumplir con el pedido. La **Tabla 2** presenta algunos de los parámetros más importantes de un pedido. En este caso, se

debe cumplir el **Pedido 1** con una demanda de 5 m^3 de *Revestimiento_Cep_Central_cepi* mostrado en el flujo de salida del proceso *drymill* en la figura. Dada la materia prima en el abastecimiento, se debe decidir qué esquema de corte aplicar para generar el producto en proceso necesario para el secado. Posteriormente, se debe decidir qué cantidad de la producción del material *Revestimiento_Cep_Central_seco* en el proceso de secado se almacenará en *stock*, cuánto se utilizará directamente para ser procesado en el *drymill* y cuánto se utilizará directamente del *stock* disponible. Además, en cada proceso existe la opción de traspasar cierta cantidad de producción a otra planta y/o externalizar parte de la producción a un servicio.

Tabla 2: Ejemplo de parámetros.

Elemento	Valor
Pedido	1
Demanda (m^3)	5
Stock seco (m^3)	3
Materia prima (m^3)	10
Esquemas de corte	s1, s2
Ruta	2
Procesos de la ruta	Drymill, Secado, Aserrío

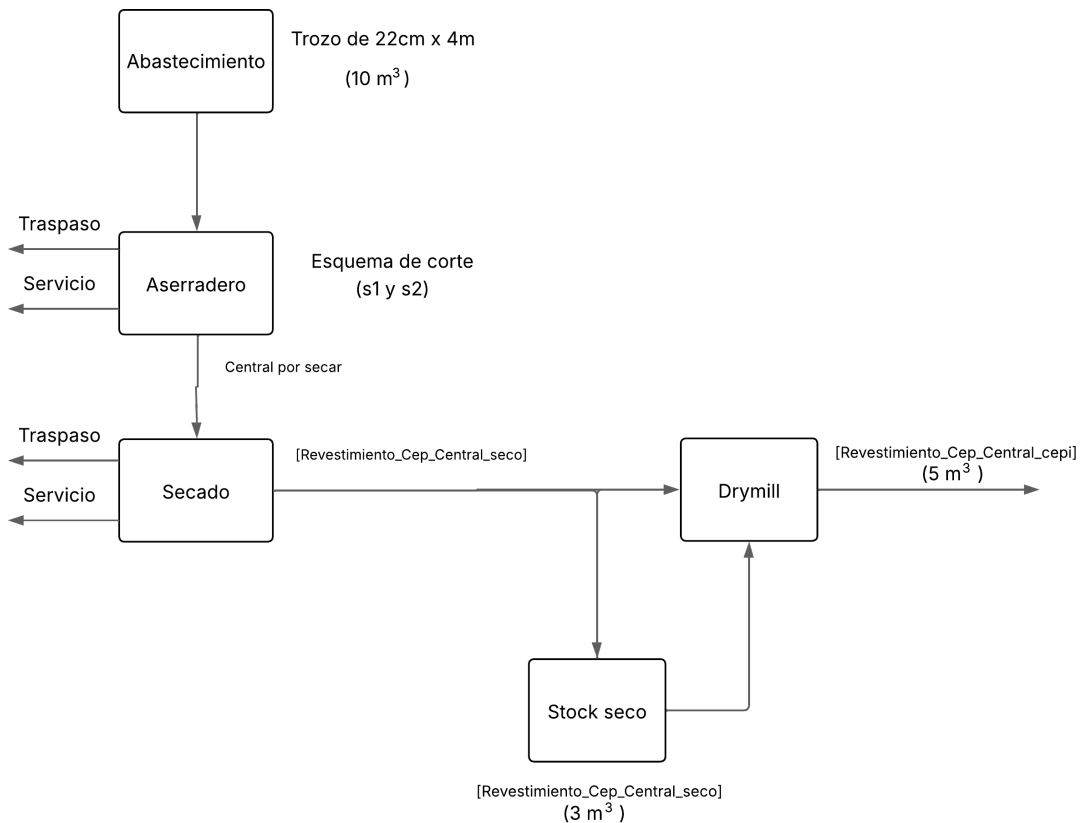


Figura 4: Ejemplo del problema para cumplir el pedido 1.

2.4. Revisión de la literatura

La planificación táctica de la producción en aserraderos ha sido ampliamente abordada en la literatura mediante modelos de optimización en tiempos discretos, destacando principalmente el uso de la programación lineal, entera y mixta (Díaz-Madronero et al., 2014). Estas herramientas son fundamentales para representar problemas de asignación de recursos bajo restricciones operativas reales, que están presentes en las distintas actividades productivas. Sin embargo, estos modelos suelen ser complejos debido a la diversidad de decisiones simultáneas involucradas, tales como la selección de esquemas de corte, la gestión de inventarios y el cumplimiento de la demanda (Vanzetti et al., 2018). En algunos casos, los modelos pueden incorporar condiciones de incertidumbre tanto en el suministro de materia prima como en la demanda de producción, lo que los hace más robustos (Varas et al., 2014; Lobos & Vera, 2016). Aunque en este proyecto no se busca implementar incertidumbre, este enfoque podría ofrecer oportunidades de mejora en el modelo.

El avance de la tecnología y la digitalización plantean nuevos desafíos y oportunidades para la optimización de los procesos en la industria forestal, aumentando la competitividad mediante herramientas avanzadas como *Digital Twins*, que representan dinámicamente los sistemas físicos e integran datos en tiempo real. En la planificación de la producción, estos sistemas facilitan la detección temprana de desviaciones, el ajuste automático de parámetros operativos y la evaluación de múltiples escenarios de decisión sin afectar la operación real. Además, permiten una mejor trazabilidad, visibilidad en tiempo real del estado de producción, y un soporte más robusto para la toma de decisiones tácticas y operativas (Chabanet et al., 2023). Si bien no se implementó un *Digital Twins* en esta memoria, se reconoce que su incorporación en el futuro podría potenciar la precisión y agilidad del modelo propuesto, especialmente en la captura y actualización de datos operacionales y en la validación de escenarios bajo condiciones variables.

Vanzetti et al. (2018) presentan un modelo de programación lineal entera mixta para planificar múltiples períodos en un aserradero, optimizando la selección de esquemas de corte, teniendo en cuenta la disponibilidad, costo y las políticas de almacenamiento de los troncos. Además, incorporan restricciones operativas, con el objetivo de optimizar las cargas de madera al proceso de secado. En este mismo ámbito, Singer & Donoso (2007) destacan la importancia de una gestión integrada de la cadena interna de suministro y proponen un modelo de gestión

colaborativa que integra múltiples aserraderos para optimizar la planificación y gestión de inventarios. Ambos enfoques se alinean con la problemática de esta memoria y sirven como base para la implementación del modelo. A diferencia de [Vanzetti et al. \(2018\)](#), que optimizan esquemas de corte con foco en el proceso de secado, y de [Singer & Donoso \(2007\)](#), que modelan una coordinación interaserraderos basada en colaboración, esta memoria se centra en la programación táctica de pedidos en CMPC, considerando múltiples procesos productivos (como aserrío, secado y *drymill*), múltiples plantas, y permitiendo además traspasos de materiales entre aserraderos y servicios logísticos entre procesos.

Otros autores han introducido conceptos como la optimización robusta para manejar incertidumbres en rendimientos y demanda ([Varas et al., 2014](#)) y la optimización estocástica intertemporal para decisiones tácticas y operativas bajo escenarios variables ([Lobos & Vera, 2016](#)). Asimismo, [Vergara et al. \(2015\)](#) demostraron cómo diferentes funciones objetivo, como la minimización de desperdicios y la maximización de beneficios, pueden influir significativamente en la estructura del modelo y en los resultados obtenidos. Además, se ha considerado que la energía eléctrica consumida por las plantas puede ser una variable relevante en los modelos de programación lineal para evaluar costos de producción ([Dumont et al., 2019](#)). El modelo propuesto en este trabajo se centra en la maximización del beneficio, considerando aspectos clave como los costos de las maquinarias, el uso de materia prima, la cantidad de traspasos y los servicios, mientras que los otros trabajos se enfocan en la incorporación de incertidumbre, la evaluación del impacto de la función objetivo o la inclusión de costos energéticos como variable crítica.

[Maturana & Pizani \(2009\)](#) analizaron dos enfoques para la planificación de la producción en un aserradero: un modelo de programación lineal entera mixta y la experiencia de los programadores mediante una heurística. En ambos casos logran una solución óptima, pero a medida que crece la demanda, el modelo supera ampliamente a la heurística en términos de la reducción de atrasos en entregas y un uso más eficiente de la materia prima. Este estudio es directamente relevante para el modelo propuesto, ya que actualmente CMPC planifica la producción con base en el criterio de los operadores de planta, quienes no utilizan modelos especializados. Para abordar la problemática definida, se ha decidido perfeccionar el modelo de programación lineal propuesto por [Matus \(2024\)](#), adaptándolo al contexto táctico de planificación de producción en CMPC Maderas. El modelo desarrollado en esta memoria incorpora nuevas variables de decisión que permiten representar con mayor realismo

los procesos operativos, tales como la producción en múltiples plantas, el almacenamiento intermedio, los trasposos entre aserraderos y la selección de esquemas de corte según la materia prima disponible. Estas mejoras amplían significativamente el alcance del modelo original propuesto por Matus (2024), proporcionando una herramienta más robusta y precisa para apoyar la toma de decisiones estratégicas y operativas en un horizonte de planificación de mediano plazo.

Los resultados de diversos estudios demuestran la eficacia de los modelos de programación lineal para planificar la producción. Por ejemplo, el modelo de Vanzetti et al. (2018) mejoró significativamente el uso de la materia prima y la rentabilidad de los aserraderos. Además, el estudio de Singer & Donoso (2007), aplicado a once aserraderos en Chile, obtuvo resultados positivos en todos ellos. Se destaca un aumento en las utilidades superior al 15 %, gracias a la integración de decisiones en la cadena de suministro, mejorando la utilización de las materias primas, reduciendo los costos operativos y mejorando el cumplimiento de la demanda.

El trabajo de Maturana & Pizani (2009) demuestra la importancia de contar con un modelo de optimización para la planificación de la producción en los aserraderos. Este modelo permitió mejorar la toma de decisiones mediante herramientas avanzadas de ingeniería. En el trabajo desarrollado en CMPC, se busca reemplazar los métodos tradicionales utilizados por los programadores de planta con un modelo de programación lineal que permita optimizar la programación de la producción en diferentes períodos de tiempo, de forma más eficiente y efectiva.

Capítulo 3

Modelo propuesto

Este capítulo presenta el modelo de programación lineal propuesto para optimizar la planificación táctica de la producción en los aserraderos. A continuación, se presenta el planteamiento formal del modelo, incluyendo la definición de variables, la función objetivo y las restricciones que permiten representar adecuadamente las condiciones operativas del sistema.

3.1. Planteamiento del modelo

Antes de detallar la formulación matemática del modelo, es fundamental definir los conjuntos y parámetros que estructuran el problema. Estos elementos constituyen la base sobre la cual se construyen las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones del sistema.

Conjuntos y parámetros del modelo

Las **Tablas 3** y **4** presentan los conjuntos y parámetros utilizados en el modelo propuesto, esenciales para su correcta interpretación y aplicación práctica. Estas tablas especifican claramente el símbolo que identifica a cada conjunto o parámetro, junto con una breve descripción que detalla su significado y función dentro del modelo. Además, en el caso particular de los conjuntos, se incluye el índice asociado a cada uno.

Tabla 3: Conjuntos del modelo.

Símbolo	Descripción
T	Conjunto de períodos de tiempo, usando el índice t .
P	Conjunto de pedidos, usando el índice p .
A	Conjunto de plantas, usando el índice a .
M	Conjunto de máquinas, usando el índice m .
M_a	Conjunto de máquinas en la planta $a \in A$, $m \in M_a$.
B	Conjunto de procesos de producción, usando el índice b . (No incluye el proceso de aserrío ni reproceso)
I	Conjunto de productos en proceso, usando el índice i .
A_b	Conjunto de plantas que contienen el proceso $b \in B$, $a \in A_b$, $A_b \subset A$.
R	Conjunto de rutas, usando el índice r .
M_b	Conjunto de máquinas en el proceso $b \in B$, $m \in M_b$, $M_b \subset M$.
$\hat{B}_r$	Conjunto de procesos $b \in B$ asociados a la ruta $r \in R$, $\hat{b} \in \hat{B}_r$.
S	Conjunto de esquemas de corte, usando el índice s .
J	Subconjunto de I de productos específicamente del proceso aserrío, usando el índice j , $J \subset I$.
K	Conjunto de trozos de materia prima, usando el índice k .
P^c	Subconjunto de pedidos centrales, $p \in P^c$, $P^c \subset P$.
P^d	Subconjunto de pedidos cepillados, $p \in P^d$, $P^d \subset P$.
I_p^d	Subconjunto de productos cepillados del pedido $p \in P$ en el proceso <i>drymill</i> , $i \in I_p^d$, $I_p^d \subset I$.

Tabla 4: Parámetros del modelo.

Símbolo	Descripción
Q_p	Valor unitario del pedido $p \in P$.
D_p	Demanda del pedido $p \in P$.
F^c	Factor mínimo de cumplimiento de producción de productos centrales.
F^u	Factor de utilización mínimo de las máquinas.
F^e	Factor de exceso de producción permitido respecto a la demanda.
F^m	Factor mínimo de cumplimiento de la producción.
F_a^d	Factor de producción de cepillado de la planta $a \in A$ en el proceso de <i>drymill</i> .
R_p	Ruta que debe seguir el pedido $p \in P$.
C_{im}	Costo unitario de uso de la máquina $m \in M$ en la producción de $i \in I$.
$C_{ia\hat{a}}^T$	Costo de transporte del producto $i \in I$ de la planta $a \in A$ a $\hat{a} \in A$.
C_i^S	Costo de realizar un servicio para el producto $i \in I$.
C_s^E	Costo por metro cúbico del esquema de corte $s \in S$.
V_{im}	Velocidad de producción del producto $i \in I$ en la máquina $m \in M$.
U_{im}	Rendimiento del producto $i \in I$ en la máquina $m \in M$.
U_i^g	Rendimiento del material $i \in I$ cuando se realiza un servicio
H_{mt}^d	Horas disponibles de la máquina $m \in M$ en el periodo $t \in T$.
H_{im}^r	Ritmo de la máquina $m \in M$ al producir un producto $i \in I$.
M_s^3	Metros cúbicos totales del esquema de corte $s \in S$.
M_{is}^3	Metros cúbicos del producto $i \in I$ del esquema de corte $s \in S$.
M_{js}^3	Metros cúbicos del producto $j \in J$ del esquema de corte $s \in S$.
M_s^3	Metros cúbicos del esquema de corte $s \in S$.
H_{at}	Horas totales de producción del aserradero a en el periodo t .
H_{at}^m	Horas mínimas de producción del aserradero a en el periodo t .
T_s	Tiempo de producción del esquema de corte $s \in S$.
d_s	Diámetro del trozo del esquema de corte $s \in S$.
d_a^m	Diámetro mínimo general de la planta $a \in A$.
d_a^M	Diámetro máximo general de la planta $a \in A$.
S_{ia}^0	<i>Stock</i> inicial del producto $i \in I$ en la planta $a \in A$.
S_{ja}^0	<i>Stock</i> inicial del producto aserrado $j \in J$ en la planta $a \in A$.
S_{ka}^0	<i>Stock</i> inicial del trozo $k \in K$ en la planta $a \in A$.
α_{pb}	Dado un pedido $p \in P$ y un proceso $b \in B$ se obtiene el producto $i \in I$.
β_i	Dado el producto $i \in I$ se obtienen las combinaciones de pedido $p \in P$ y proceso $b \in B$ que lo conforman.
λ_s	Dado un esquema de corte $s \in S$ se retorna el trozo $k \in K$ utilizado.
b^d	Proceso de <i>drymill</i>

Variables de decisión

Una de las principales variables de decisión del modelo es la **producción contra pedido** X_{pbmt} , que representa la cantidad de metros cúbicos (m^3) producidos para satisfacer el pedido $p \in P$ en el proceso $b \in B$, utilizando la máquina $m \in M$, durante el período $t \in T$. Esta variable continua es fundamental para asignar la producción a cada pedido y proceso específico. Complementariamente, se introduce la variable de decisión **producción contra inventario**

Y_{imt} , que indica la cantidad de m^3 del producto en proceso $i \in I$ producido en la máquina $m \in M$ durante el período $t \in T$, y que se destina al inventario o *stock*, sin estar asociada directamente a un pedido. Esta variable continua permite gestionar la producción que no está destinada inmediatamente a cumplir un pedido específico.

La variable continua W_{pbat} corresponde al **stock contra pedido** y es la cantidad de m^3 que se retira desde el inventario para ser utilizada en la producción del pedido $p \in P$, en el proceso $b \in B$ dentro de la planta $a \in A$, durante el período $t \in T$. Este flujo es esencial para modelar el consumo de inventario y garantizar que los pedidos sean completados con material disponible. Adicionalmente, se introduce la variable continua E_{sat} , que representa la cantidad de veces que se aplica el esquema de corte $s \in S$ en la planta $a \in A$, durante el período $t \in T$. Este esquema de corte es crucial para determinar cómo se transforman los trozos de madera en productos intermedios, y su frecuencia de aplicación influye directamente en la eficiencia de la producción.

La variable de decisión continua **traslado entre plantas** $Z_{ia\hat{a}t}$ permite modelar el movimiento de m^3 del producto $i \in I$ desde el aserradero $a \in A$ hacia otro aserradero $\hat{a} \in A$, durante el período $t \in T$. Esto optimiza la utilización de recursos distribuidos geográficamente y garantiza la correcta asignación de material entre las plantas. El **inventario final** o *stock* acumulado S_{iat}^F representa la cantidad de m^3 del producto $i \in I$ en la planta $a \in A$, al final del período $t \in T$. Esta variable continua es clave para controlar los niveles de inventario y asegurar la disponibilidad futura de productos. Finalmente, se incluye la variable de decisión $G_{i\hat{a}t}$, que representa la cantidad de m^3 del producto $i \in I$ que, tras pasar por un proceso de servicio externo (como secado, impregnado u otros), retorna como un nuevo producto $\hat{i} \in I$ al mismo aserradero $a \in A$, en el período $t \in T$. Esta variable continua permite modelar las operaciones en las que un producto puede ser enviado a un servicio externo y retornado para continuar con su proceso de producción.

Todas estas variables se utilizan para la construcción del modelo, y están resumidas en la **Tabla 5**.

Tabla 5: Variables de decisión del modelo.

Símbolo	Descripción
X_{pbmt}	Cantidad de m^3 contra el pedido $p \in P$ en el proceso $b \in B$, en la máquina $m \in M$, en el periodo $t \in T$.
Y_{imt}	Cantidad de m^3 de producción contra inventario (<i>stock</i>) del producto $i \in I_{pb}$, en la máquina $m \in M$, en el periodo $t \in T$.
W_{pbat}	Cantidad de m^3 de inventario (<i>stock</i>) contra el pedido $p \in P$ en el proceso $b \in B$, en la planta $a \in A$, en el periodo $t \in T$.
E_{sat}	Cantidad del esquema de corte $s \in S$ usado en la planta $a \in A$, en el periodo $t \in T$.
$Z_{iaât}$	Cantidad de m^3 de producción del producto $i \in I_{pb}$ que va del aserradero $a \in A$ al aserradero $\hat{a} \in A$, en el periodo $t \in T$.
S_{iat}^F	Cantidad de m^3 de inventario (<i>stock</i>) del producto $i \in I_{pb}$, en el aserradero $a \in A$, en el periodo $t \in T$.
$G_{iât}$	Cantidad de m^3 del producto $i \in I_{pb}$, que van a servicio en un proceso y vuelven como $\hat{i} \in I_{p(b-1)}$ en el aserradero $a \in A$, en el periodo $t \in T$.

Función objetivo del modelo

La **función objetivo** del modelo tiene como propósito maximizar el beneficio neto (1), considerando los ingresos generados por la producción terminada, así como los costos asociados a cada proceso de producción (2). Se incluye tanto el costo de cantidades de producción transferidas entre plantas (3) como las realizadas mediante servicios externos de productos recién aserrados (5) y servicios de productos en el resto de los procesos (4). Además, se incluye la utilización de los esquemas de corte aplicados a la materia prima. La totalidad de los esquemas de corte disponibles son calculados de forma exógena y permiten determinar la cantidad de materia prima procesada en función de las distintas opciones disponibles añadiendo el costo por el uso de esta materia prima (6). La suma total es detallada en (7).

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

$$Z^b = \sum_{t \in T} \left(\sum_{m \in M} \left(\sum_{i \in I: \beta_i = (p,b)} X_{\beta_i mt} C_{im} + \sum_{i \in I} Y_{imt} C_{im} \right) \right) \quad (2)$$

$$Z^c = \sum_{i \in I} \left(\sum_{a, \hat{a} \in A: a \neq \hat{a}} \sum_{t \in T} C_{ia\hat{a}}^T Z_{ia\hat{a}t} \right) \quad (3)$$

$$Z^d = \sum_{i, \hat{i} \in I} \sum_{t \in T} \sum_{a \in A} G_{i\hat{i}at} C_i^S \quad (4)$$

$$Z^e = \sum_{j, \hat{i}, \in I: j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{a \in A} G_{j\hat{i}at} C_j^S \quad (5)$$

$$Z^f = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} E_{sat} C_s^E M_s^3 \quad (6)$$

$$\text{Maximizar } Z = Z^a - (Z^b + Z^c + Z^d + Z^e + Z^f) \quad (7)$$

Restricciones del modelo

Las restricciones (8) aseguran que la cantidad total de materia prima generada en el último proceso ($b = \hat{b}_0$) de la ruta asociada al pedido no supere la demanda solicitada para cada pedido específico.

$$\sum_{t \in T} \left(\sum_{m \in M_{\hat{b}_0}} X_{p\hat{b}_0mt} + \sum_{a \in A_{\hat{b}_0}} W_{p\hat{b}_0at} \right) \leq D_p F^e \quad \forall p \in P : \hat{b}_0 \in \hat{B}_r, r \in R_p \quad (8)$$

Las restricciones (9) y (10) garantizan que la producción cumpla con un porcentaje mínimo establecido para satisfacer la demanda de cada pedido. En particular, las restricciones (9) aseguran que la cantidad total producida o retirada desde inventario para cada pedido específico sea igual o superior a un porcentaje mínimo predefinido (F^m) de la demanda original del pedido (D_p), en el último proceso de su ruta productiva. De esta forma, la restricción evita una producción insuficiente y asegura un nivel básico de satisfacción del pedido en cada ciclo de planificación. Mientras, las restricciones (10) establecen una condición adicional que aplica específicamente a los productos considerados como materiales centrales. Estas restricciones impiden que la producción total de dichos materiales sea inferior a un nivel mínimo determinado por el factor F^c , el cual ajusta la demanda agregada de todos los pedidos de productos centrales (P^c). Esto asegura que, globalmente, la producción de materiales centrales no caiga por debajo de un nivel crítico necesario para la operación

continua y estable del aserradero.

$$D_p F^m \leq \sum_{t \in T} \sum_{a \in A_{\hat{b}_0}} \left(\sum_{m \in M_a} X_{p\hat{b}_0mt} + W_{p\hat{b}_0at} \right) \quad \forall p \in P : \hat{b}_0 \in \hat{B}_r, r \in R_p \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P^c} D_p F^c \leq \sum_{p \in P^c} \sum_{t \in T} \left(\sum_{m \in M_{\hat{b}_0}} X_{p\hat{b}_0mt} + \sum_{a \in A_{\hat{b}_0}} W_{p\hat{b}_0at} \right) \quad \forall \hat{b}_0 \in \hat{B}_r : r \in R_p \quad (10)$$

Las restricciones (11) controlan el uso de cada máquina $m \in M$ en cada período de tiempo $t \in T$, estableciendo un rango válido de horas de producción. Estas restricciones garantizan que el tiempo total utilizado por una máquina esté dentro de los límites operativos establecidos. El tiempo de producción se calcula a partir del volumen de productos procesados tanto para satisfacer pedidos ($X_{\beta_{imt}}$) como para inventario (Y_{imt}), ajustado por la velocidad de procesamiento de la máquina (V_{im}) y su ritmo de operación (H_{im}^r).

$$H_{mt}^d F^u \leq \sum_{i \in I} \left(\frac{\sum_{p \in P} \sum_{b \in B^m} X_{\beta_{imt}}}{V_{im} H_{im}^r} + \frac{Y_{imt}}{V_{im} H_{im}^r} \right) \leq H_{mt}^d \quad \forall m \in M, t \in T \quad (11)$$

Las restricciones (12) establecen el balance de materiales entre procesos consecutivos dentro de la ruta productiva de un pedido. En concreto, asegura que la cantidad de material producido en un proceso siguiente ($\hat{b} - 1$) y destinado al proceso actual $\hat{b}$, sea igual a la suma de lo que se utiliza en el proceso actual, tanto desde producción directa como desde inventario.

$$\frac{X_{p(\hat{b}-1)mt}}{U_{m\alpha_{pb}}} = X_{p\hat{b}mt} + W_{p\hat{b}at} \quad \forall p \in P, t \in T, \hat{b} \in \hat{B}_r, r \in R_p, m \in M_b, a \in A_b \quad (12)$$

Las restricciones (13) establecen la condición inicial del inventario para cada producto $i \in I$ en cada planta $a \in A$, al inicio del horizonte de planificación (periodo $t = 1$). A partir de ese punto, la evolución del inventario se rige por las restricciones (14), que actualizan el *stock* considerando la producción que entra a inventario, el uso de materiales, el consumo por producción, los trasпасos entre plantas y los servicios externos. Además, se imponen las restricciones (15), que garantiza que el inventario final sea siempre mayor o igual a cero, evitando inconsistencias operativas.

$$S_{iat}^F = S_{ia}^0 \quad \forall i \in I, a \in A, t = 1 \quad (13)$$

$$S_{iat}^F = S_{iat-1}^F + \sum_{m \in M_a} Y_{imt} - \sum_{m \in M_a} \frac{Y_{imt}}{U_{im}} - W_{\beta_{iat}} - Z_{ia\hat{a}t} + Z_{i\hat{a}at} - G_{i\hat{a}t} + G_{i\hat{a}t} U_i^g \quad (14)$$

$$\forall t \in T : t \neq 1, \forall i, \hat{i} \in I : i \neq \hat{i}; a, \hat{a} \in A_b : a \neq \hat{a}, r \in R_p$$

$$S_{iat}^F \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in I, a \in A \quad (15)$$

Las restricciones (16) limitan la cantidad de inventario que puede ser utilizada en un período, asegurando que no se utilice más *stock* del que se tiene disponible. Este *stock* puede provenir del periodo anterior, de un traspaso entrante, o de un servicio externo que haya retornado producto transformado.

$$\sum_{p \in P} \sum_{\hat{b} \in \hat{B}_r} W_{\beta_{iat}} \leq S_{ia(t-1)}^F + Z_{i\hat{a}at} + G_{i\hat{a}at} U_i^g \quad \forall t \in T, i, \hat{i} \in I : i \neq \hat{i}, a, \hat{a} \in A : a \neq \hat{a}, r \in R_p \quad (16)$$

Las restricciones (17) aseguran que, para cada planta $a \in A$ y período $t \in T$, el total de horas utilizadas en la ejecución de los esquemas de corte esté dentro de un rango válido. Específicamente, el tiempo total asociado a los esquemas aplicados debe ser mayor o igual a un umbral mínimo de horas técnicas necesarias (H_{at}^m) y menor o igual a la disponibilidad total de horas de la planta (H_{at}).

$$H_{at}^m \leq \sum_{s \in S} E_{sat} T_s \leq H_{at} \quad \forall t \in T, a \in A \quad (17)$$

Las restricciones (18) imponen que el promedio ponderado de los diámetros de los trozos procesados mediante esquemas de corte en una planta no esté fuera del rango operativo permitido para dicha planta. Este rango se encuentra definido por un mínimo d_a^m y un máximo d_a^M de diámetros admitidos por planta $a \in A$, según sus características técnicas.

$$d_a^m \sum_{s \in S} E_{sat} \leq \sum_{s \in S} E_{sat} d_s \leq d_a^M \sum_{s \in S} E_{sat} \quad \forall t \in T, a \in A \quad (18)$$

Las restricciones (19) definen la condición inicial del inventario de productos verdes $j \in J$ en cada planta $a \in A$, correspondiente al primer período de planificación $t = 1$. A partir del segundo período en adelante, la evolución del inventario se regula mediante la restricción (20),

la cual contabiliza todas las entradas y salidas de material aserrado verde en cada planta.

$$S_{jat}^F = S_{ja}^0 \quad \forall j \in J, a \in A, t = 1 \quad (19)$$

$$S_{jat}^F = S_{jat-1}^F + \sum_{s \in S} E_{sat} M_{js}^3 - \sum_{m \in M_a} \frac{Y_{jmt}}{U_{jm}} - \sum_{m \in M_a} \frac{X_{\beta_j mt}}{U_{jm}} - Z_{ja\hat{a}t} + Z_{j\hat{a}at} - G_{j\hat{a}at} \quad (20)$$

$$\forall j \in J, i \in I, t \in T : t \neq 1, a \in A, a \neq \hat{a}, r \in R_p$$

Las restricciones (21) establecen el inventario inicial de trozos de materia prima $k \in K$ en cada planta $a \in A$ al comienzo del período de planificación ($t = 1$). A partir de los períodos siguientes, las restricciones (22) actualizan el *stock* considerando el consumo de trozos asociado a los esquemas de corte aplicados en esa planta.

$$S_{kat}^F = S_{ka}^0 \quad \forall j \in J, a \in A, t = 1 \quad (21)$$

$$S_{kat}^F = S_{ka(t-1)}^F - \sum_{s \in S: \lambda_s = k} E_{sat} M_s^3 \quad \forall t \in T : t \neq 1, k \in K, a \in A \quad (22)$$

Las restricciones (23) garantizan que se cumpla la proporción de productos cepillados definida para cada planta $a \in A$ en cada período $t \in T$, dentro del proceso de *drymill*. Esta condición impone que una fracción fija F_a^d de la producción total que pasa por dicho proceso sea destinada a productos cepillados.

$$\left(\sum_{p \in P} \sum_{m \in M_b} X_{pbmt} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_b} Y_{imt} \right) F_a^d = \sum_{p \in P^d} \sum_{m \in M_b} X_{pbmt} + \sum_{i \in I_p^d} \sum_{m \in M_b} Y_{imt} \quad (23)$$

$$\forall a \in A, t \in T, b = b^d$$

Las restricciones (24) - (30) definen el dominio de las variables de decisión del modelo propuesto y deben ser mayores o iguales a cero.

$$0 \leq X_{pbmt} \quad \forall p \in P, b \in B, m \in M, t \in T \quad (24)$$

$$0 \leq Y_{imt} \quad \forall i \in I, m \in M, t \in T \quad (25)$$

$$0 \leq W_{pbat} \quad \forall p \in P, b \in B, a \in A, t \in T \quad (26)$$

$$0 \leq E_{sat} \quad \forall s \in S, a \in A, t \in T \quad (27)$$

$$0 \leq Z_{ia\hat{a}t} \quad \forall i \in I, a \in A, \hat{a} \in A, t \in T \quad (28)$$

$$0 \leq S_{iat}^F \quad \forall i \in I, a \in A, t \in T \quad (29)$$

$$0 \leq G_{i\hat{i}at} \quad \forall i \in I, \hat{i} \in I, a \in A, t \in T \quad (30)$$

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos al aplicar el modelo de programación lineal propuesto a seis escenarios distintos, considerando variaciones en disponibilidad de materia prima, uso de traspasos, servicios externos y exigencias de cepillado. El modelo fue implementado en *Python 3.11* y resuelto con *Google OR-Tools 9.14*, y sus resultados se contrastaron con la planificación actual de CMPC Maderas.

4.1. Descripción de instancias

Se definen seis tipos de instancias basadas en datos reales. Las tres primeras corresponden a configuraciones basadas en las necesidades de la organización, considerando el mismo número de pedidos y enfocándose en productos centrales, que suelen ser los más demandados por los clientes. La diferencia entre estas instancias radica en el nivel de demanda solicitada y en ciertas modificaciones aplicadas al modelo.

La **primera instancia** corresponde a una planificación táctica basada en una combinación específica de pedidos, cuya demanda total asciende a **72.883 m³** de productos centrales, como se detalla en la **Tabla 6**. Esta demanda representa la capacidad estimada de producción conjunta de los tres aserraderos de CMPC (Mulchén, Bucalemu y Nacimiento) para el periodo correspondiente a los meses de **junio, julio y agosto** del año 2025, de acuerdo con el balance trimestral proporcionado por el área de planificación central de la empresa.

Cada uno de los productos solicitados de la instancia 1 está asociado a una ruta de producción predeterminada, la cual define la secuencia de procesos que debe seguir la materia prima

dentro de los aserraderos para transformarse en el producto final requerido. El detalle completo de las rutas asociadas a estos pedidos se presenta en la **Tabla A14**, donde se especifican los procesos implicados en cada una. Esta instancia representa un escenario base realista, que permite evaluar el desempeño del modelo bajo condiciones similares a las actuales de la empresa, considerando tanto restricciones operacionales como la disponibilidad de materia prima y equipos. Además, constituye una referencia para contrastar con otros escenarios experimentales que incorporan variaciones en las restricciones o en las condiciones de demanda.

Tabla 6: Pedidos instancia 1, 2, 3, 4 y 5.

Pedido	Producto	Ruta	Valor (m^3)
0	Central Revestimiento Seco	1	1.501
1	Central Remanufactura Seco (rustico y cepillado)	1	751
2	Central Embalaje Verde	4	16.201
3	Central Embalaje Verde	4	11.900
4	Central Embalaje Verde	4	14.225
5	Central Verde	4	13.143
6	Central Seco	1	15.167
Total			72.883

La **segunda instancia** no permite la realización de traspasos entre plantas ni el uso de servicios externos durante el horizonte de planificación, ya que busca planificar la producción sin depender de recursos externos ni de la coordinación entre plantas. Esta instancia utiliza la misma cantidad de pedidos y niveles de demanda definidos en la **Tabla 6**, y su principal diferencia respecto a la primera radica en que las variables $Z_{ia\hat{a}t}$ y $G_{i\hat{a}t}$, descritas en la **Tabla 5**, se restringen explícitamente a valor cero. Desde la perspectiva de CMPC, este escenario resulta particularmente útil ya que permite evaluar el desempeño autónomo de cada aserradero ante una demanda conocida, utilizando únicamente sus propios recursos (maquinaria, capacidades horarias y materia prima disponible). De esta forma, es posible identificar la capacidad real de respuesta de cada planta frente a sus cargas operativas, sin depender de la flexibilidad otorgada por los traspasos y servicios. Además, este escenario permite visualizar con mayor claridad el flujo interno de producción, así como identificar eventuales cuellos de botella al interior de cada aserradero. Es especialmente valioso para diagnosticar cuán eficiente es el uso de los recursos propios y para detectar oportunidades de mejora en términos de balance interno, distribución de procesos o requerimientos de inversión en infraestructura productiva.

La **tercera instancia** se diseña con el objetivo de maximizar la producción total del sistema,

sin que exista una presión específica por cumplir con una demanda predeterminada. Para ello, a cada uno de los pedidos definidos en la **Tabla 6** se les asigna un valor de demanda elevado y arbitrario. Este valor supera ampliamente la capacidad real de los aserraderos, lo que hace que dicha demanda sea imposible de cumplir en su totalidad. Esta configuración tiene como propósito principal evaluar el comportamiento del modelo en un escenario de producción sin restricciones de demanda, eliminando así el efecto de la **restricción de cumplimiento de demanda**. Al no existir una meta específica a alcanzar por cada pedido, el modelo queda libre de priorizaciones externas y puede asignar los recursos disponibles según criterios económicos definidos en la función objetivo.

La **cuarta instancia** es generada con el propósito de analizar la sensibilidad del modelo ante una disminución en el abastecimiento de materia prima. Esta situación refleja una condición recurrente que enfrenta CMPC especialmente en los meses de verano, donde la empresa suele experimentar dificultades para cumplir con el plan de abastecimiento forestal debido principalmente a la ocurrencia de incendios forestales, que afectan tanto a las plantaciones como a las rutas logísticas de transporte de trozos de madera. Para simular esta contingencia operativa, se impone una reducción del 25 % en el abastecimiento total de materia prima disponible para el horizonte de planificación de tres meses. De este modo, se fuerza al modelo a operar bajo un entorno más restringido en cuanto a disponibilidad de recursos, sin modificar la demanda ni las rutas de los pedidos.

La **quinta instancia** es similar a la primera, diferenciándose únicamente en el porcentaje mínimo de cepillado exigido en la planta de Mulchén, el cual se incrementa desde un 70 % a un 85 %. Esta modificación tiene como finalidad analizar la rentabilidad de aumentar la proporción de productos cepillados procesados internamente en dicha planta. Este escenario se enmarca en una situación real que enfrenta la empresa, ya que actualmente los productos cepillados son más valorados comercialmente que los productos rústicos. Por ello, desde una perspectiva estratégica, CMPC busca aumentar la participación de productos cepillados en su oferta, considerando que el porcentaje actual en Mulchén es considerado insuficiente. El porcentaje original de 70 % responde a limitaciones operativas derivadas de maquinaria obsoleta y fallas frecuentes, lo que ha obligado históricamente a recurrir a servicios externos para completar el proceso de cepillado. Evaluar este escenario permite explorar los efectos operativos y económicos de aumentar la exigencia de cepillado en planta, lo que puede entregar evidencia útil para justificar una eventual inversión en nueva maquinaria que permita reducir

la dependencia de servicios externos y mejorar la capacidad instalada.

La **sexta instancia** considera una serie ampliada de pedidos con una demanda significativamente mayor y es diseñada en base a la cantidad de producción establecida por el balance trimestral, es presentada en la **Tabla 7**. Esta incorpora una planificación extendida a lo largo de doce periodos, lo que equivale a un año completo de operación. Esta instancia busca evaluar el comportamiento del modelo en un escenario de planificación de mayor escala y exigencia computacional. Al aumentar tanto el horizonte temporal como la demanda total, se genera un entorno más desafiante para el modelo, permitiendo identificar la cantidad máxima de metros cúbicos que CMPC es capaz de producir en condiciones anuales. Además, este escenario entrega información relevante respecto al porcentaje de cumplimiento alcanzado frente a una demanda exigente y sostenida, lo que resulta útil para estimar la capacidad global del sistema y validar la robustez del modelo en contextos prolongados de planificación operativa.

Tabla 7: Pedidos de la sexta instancia.

N°	Pedido	Ruta	Valor (m^3)
1	Central Revestimiento Seco	1	12.000
2	Central Remanufactura Seco (rustico y cepillado)	1	8.500
3	Central Moldaje Verde	4	23.000
4	Central Estructural Seco	1	8.400
5	Central Revestimiento Seco	1	12.000
6	Central Remanufactura Seco (rustico y cepillado)	1	8.500
7	Central Estructural Seco	1	8.400
8	Central Seco	1	15.167
9	Central Revestimiento Seco	1	48.000
10	Central Remanufactura Seco (rustico y cepillado)	1	34.000
11	Central Estructural Seco	1	33.600
12	Central Verde	1	40.000
13	Central Seco	1	60.668
Total			312.235

4.2. Resultados del modelo

El modelo es resuelto por el *solver* con la información específica de cada instancia, y se obtuvieron los resultados generales que se resumen en la **Tabla 8**. Esta tabla presenta, para cada una de las seis instancias, el volumen total de demanda y producción alcanzada, el porcentaje de cumplimiento de la demanda, el valor de la función objetivo, los costos asociados a traspasos y servicios, y el tiempo de resolución del modelo a través del *solver*.

Tabla 8: Comparación de resultados entre instancias.

Indicador	Inst. 1	Inst. 2	Inst. 3	Inst. 4	Inst. 5	Inst. 6
Demanda total [m^3]	72.883	72.883	∞	72.883	72.883	312.235
Producción [m^3]	72.883	72.849	73.339	55.178	72.883	235.675
Cumplimiento [%]	100	99,9	–	75,7	100	75,5
Utilidad neta [\$]	18.427.251	18.414.000	18.763.170	14.440.311	18.295.689	65.815.573
Trasposos [\$]	92.942	0	209.163	123.766	25.016	1.127.775
Servicios [\$]	0	0	0	0	0	0
Tiempo solver [s]	0,49	0,30	0,38	0,72	0,43	3,8

Al analizar los resultados de la **Tabla 8**, se observa que el tiempo de ejecución del modelo es muy bajo en todas las instancias, resolviéndose en menos de un segundo en las cinco primeras instancias. Solo la instancia 6, que incorpora un horizonte anual, requiere un tiempo mayor de cómputo, aunque sigue siendo razonable, lo que confirma la eficiencia del modelo implementado.

El número de variables y restricciones en las cinco primeras instancias se mantiene constante en 6.585 variables y 4.497 restricciones, ya que las diferencias entre escenarios corresponden a restricciones lógicas o de parámetros, sin alterar la estructura matemática del modelo.

4.2.1. Resultados de la instancia 1

La instancia 1 corresponde al escenario base del modelo, en el cual se habilitan todos los componentes disponibles, incluyendo trasposos entre plantas y servicios externos. Bajo estas condiciones, el modelo logra un cumplimiento del 100 % de la demanda, con una producción total de 72.883 m^3 , igual al volumen solicitado. La utilidad neta alcanzada es de \$18.427.251, sin incurrir en costos por servicios y con un gasto moderado en trasposos (\$92.942), lo que refleja una adecuada coordinación operativa. Además, el tiempo de resolución es de apenas 0,49 segundos, evidenciando la eficiencia del modelo en un escenario sin restricciones adicionales. Este resultado sirve como referencia para evaluar el impacto de los ajustes realizados en las instancias posteriores.

4.2.2. Resultados de la instancia 2

En la instancia 2, se restringen completamente los trasposos y servicios entre plantas, lo que genera una leve disminución en el tiempo de resolución y una reducción en la utilidad neta. Esta disminución en los beneficios puede explicarse revisando la descomposición de la

función objetivo (ver anexo **Tabla A49**), donde se aprecia una menor generación de ingresos combinada con un ligero aumento en los costos de producción. Aunque en esta instancia no se incurre en gastos por traspasos o servicios, la eliminación de estas alternativas limita la flexibilidad del modelo y reduce su eficiencia global, evidenciando la importancia operativa que tienen los movimientos entre plantas en la realidad de CMPC.

4.2.3. Resultados de la instancia 3

La instancia 3, que elimina la restricción de cumplimiento de demanda al asignar una demanda infinita, permite al modelo maximizar libremente la producción, al contrario de las otras instancias. Esto se refleja en el mayor valor de utilidad neta obtenido, resultado de un mejor aprovechamiento de recursos y de una mayor cantidad de productos rentables fabricados. Esta instancia es útil para identificar el techo productivo del sistema en condiciones de máxima saturación, entregando una línea base otras comparaciones.

4.2.4. Resultados de la instancia 4

En la cuarta instancia, se simula una reducción del 25 % en el abastecimiento de materia prima, como representación de una instancia realista asociado a contingencias como incendios forestales. Esta condición se traduce en una caída importante del cumplimiento de la demanda, alcanzando solo 55.178 m^3 , equivalente a un 75,7 % del total solicitado, es decir, la reducción del abastecimiento impacta en el mismo porcentaje a la producción generada. El beneficio neto también se ve considerablemente afectada, disminuyendo a \$14.440.311, lo que representa una pérdida de más de cuatro millones respecto a la instancia base. Esta caída corresponde a una reducción menor al 25 % en las utilidades y se explica tanto por la menor producción como por el aumento en los costos logísticos.

El modelo responde a la falta de materia prima mediante un uso intensivo de traspasos entre plantas, especialmente desde el aserradero que aún dispone de stock hacia aquellos con capacidad de procesamiento disponible (ver anexo **Tabla A57**). Esta estrategia refleja una respuesta coherente del modelo, que prioriza cumplir con la mayor parte posible de la demanda utilizando los medios disponibles, aunque a costa de un aumento en los costos de traslado.

Esta instancia evidencia que, ante eventos de desabastecimiento, los traspasos se convierten en una herramienta crítica para mantener la continuidad operativa, aunque su uso intensivo

reduce la rentabilidad. Además, esta instancia permite a CMPC identificar los límites operacionales frente a problemas logístico y evaluar la necesidad de planes de contingencia más robustos.

4.2.5. Resultados de la instancia 5

La quinta instancia introduce un cambio en la política de producción de la planta Mulchén, aumentando el porcentaje mínimo de productos que deben ser cepillados desde un 70 % a un 85 %. Este ajuste busca simular una estrategia de mejora en la agregación de valor de los productos, ya que los materiales cepillados son más valorados comercialmente que los productos rústicos.

A nivel de resultados globales, la producción total se mantiene en 72.883 m^3 , cumpliendo completamente la demanda. Sin embargo, se observa una leve disminución en los ingresos y un pequeño aumento en los costos, lo que impacta negativamente en la utilidad neta, que alcanza \$18.295.689. Una diferencia notable se observa en el costo de trasposos, que disminuye considerablemente respecto a los escenarios anteriores. Esto se debe a que, al aumentar la capacidad interna de cepillado en Mulchén, ya no es necesario enviar productos a otras plantas para completar este proceso, reduciendo así el movimiento interplanta.

Esta instancia resulta valioso para CMPC, ya que permite evaluar el impacto económico de invertir en mejorar la capacidad de valor agregado dentro de cada planta. En particular, la reducción de los trasposos sugiere que una mejora tecnológica en Mulchén, por ejemplo, mediante la adquisición de una nueva línea de cepillado, podría generar eficiencias significativas y mejorar la autonomía productiva. Esto se alinea con los objetivos estratégicos de descentralizar procesos y reducir costos logísticos.

4.2.6. Resultados de la instancia 6

La sexta instancia, resumida en la **Tabla 9**, corresponde a un escenario de planificación extendido a 12 periodos, con una demanda total de 312.235 m^3 . Este aumento del horizonte temporal y del volumen de pedidos se traduce en un crecimiento considerable en la complejidad computacional del modelo, alcanzando 29.184 variables y 18.990 restricciones.

A pesar de este aumento, el modelo logra una resolución eficiente, con un tiempo de ejecución de solo 3,8 segundos utilizando el *solver*, lo que reafirma su capacidad de escalar a problemas

de mayor tamaño sin comprometer rendimiento. El sistema logra cumplir 9 de los 13 pedidos, alcanzando una producción total de 235.675 m^3 , lo que representa un 75,5 % de la demanda total. Esta cifra refleja una capacidad de respuesta razonablemente alta para un escenario de alta exigencia, y entrega a CMPC una proyección realista de producción anual considerando restricciones operativas.

Tabla 9: Resumen de resultados del escenario 6.

Componente	Escenario 6
Cumplimiento de Demanda (%)	75,5
Pedidos cumplidos	9
Tiempo de Ejecución (s)	3,8
Número de Variables	29.184
Número de Restricciones	18.990
Función Objetivo	65.815.573

4.2.7. Utilización de las máquinas en las instancias 1 a 5

En esta sección se analiza la utilización de las máquinas únicamente para las instancias 1 a 5, ya que todas comparten un mismo horizonte temporal de tres periodos, así como un volumen y especificaciones de demanda equivalentes, lo que permite realizar comparaciones directas entre ellas. La **Tabla 10** presenta el porcentaje de utilización de cada máquina en las plantas de Mulchén, Bucalemu y Nacimiento, desglosado por escenario y periodo. Este análisis permite observar el comportamiento interno del modelo respecto al uso de máquinas, así como identificar patrones de saturación o subutilización en función de las decisiones de planificación adoptadas en cada instancia.

Tabla 10: Porcentaje de utilización de cada máquina por planta, periodo y escenario.

Planta	Máquina	Escenario	P1 (%)	P2 (%)	P3 (%)
Mulchen	baño_Mulchen	1	62,68	59,51	60,28
		2	62,68	56,38	63,55
		3	28,72	87,35	65,70
		4	7,72	2,31	63,28
		5	39,40	78,63	62,53
	drymill_Mulchen	1	95,98	77,08	100,00
		2	75,63	94,42	100,00
		3	94,32	86,18	100,00
		4	62,63	44,88	100,00
		5	86,47	75,59	90,72
	impregnado_Mulchen	1	16,79	8,76	11,64
		2	16,79	8,76	11,64
		3	22,99	12,00	15,93
		4	23,00	12,00	15,94
		5	23,00	12,00	15,94
	linea500_Mulchen	1	100,00	100,00	100,00
		2	100,00	100,00	100,00
		3	100,00	100,00	100,00
		4	100,00	100,00	100,00
		5	100,00	100,00	100,00
	secado_Mulchen	1	100,00	100,00	100,00
		2	100,00	100,00	100,00
		3	100,00	100,00	100,00
		4	83,17	100,00	100,00
		5	94,24	100,00	92,98
	secadoimp_ply_Mulchen	1	100,00	100,00	100,00
		2	100,00	100,00	100,00
		3	100,00	100,00	100,00
		4	100,00	100,00	100,00
		5	100,00	100,00	100,00
Bucalemu	baño_Bucalemu	1	100,00	100,00	100,00
		2	100,00	100,00	100,00
		3	6,05	6,03	5,86
		4	100,00	100,00	100,00
		5	100,00	100,00	100,00
	clasificado_Bucalemu	1	78,13	72,85	100,00
		2	78,13	72,85	100,00
		3	100,00	100,00	100,00
		4	83,62	36,02	87,79
		5	100,00	100,00	100,00
	secado_Bucalemu	1	87,15	84,37	100,00
		2	87,33	84,71	99,50
		3	100,00	100,00	100,00
		4	48,44	26,21	73,44
		5	87,90	96,32	90,81
Nacimiento	baño_Nacimiento	1	100,00	100,00	100,00
		2	100,00	100,00	100,00
		3	100,00	100,00	100,00
		4	78,81	53,60	100,00
		5	100,00	100,00	100,00
	clasificado_Nacimiento	1	100,00	100,00	100,00
		2	100,00	100,00	100,00
		3	100,00	100,00	100,00
		4	100,00	100,00	100,00
		5	100,00	100,00	100,00
	drymill_Nacimiento	1	83,61	100,00	100,00
		2	91,39	100,00	100,00
		3	100,00	100,00	100,00
		4	56,59	56,15	88,88
		5	91,53	100,00	100,00
	secado_Nacimiento	1	85,97	100,00	94,25
		2	87,13	96,31	96,89
		3	100,00	100,00	96,53
		4	60,71	69,80	85,17
		5	85,21	100,00	94,45

En términos generales, se evidencia una alta utilización en los procesos de secado, clasificado y *drymill*, lo cual es consistente con la realidad operativa de CMPC. Estos procesos representan etapas clave en la transformación de la madera y suelen estar encadenados entre sí, por lo que su correcta sincronización es esencial para evitar cuellos de botella. De hecho, cualquier restricción en una de estas etapas puede generar atrasos en el flujo de producción global de una planta.

Comparando entre escenarios, se observa que la **instancia 1** —con traspasos y servicios permitidos— tiende a presentar una mayor utilización de las máquinas en comparación a la **instancia 2**, donde estas actividades están prohibidas. Esto demuestra que la posibilidad de mover productos entre plantas permite un mejor aprovechamiento de las capacidades disponibles, redistribuyendo cargas operativas y aliviando restricciones locales. En términos prácticos, esta flexibilidad reduce holguras en algunas máquinas y optimiza la continuidad del proceso productivo.

La **instancia 3**, que elimina las restricciones de demanda y permite maximizar libremente la producción, muestra en general los niveles más altos de utilización en la mayoría de las máquinas. Esta saturación es coherente con la lógica del modelo, que busca explotar al máximo la capacidad instalada cuando no hay limitaciones externas, lo que también se refleja en el mayor valor de la función objetivo registrado para esta instancia (ver **Tabla 8**). Un fenómeno interesante se observa en el bajo uso de la máquina de *baño* en la planta Bucalemu bajo la instancia 3, con valores por debajo del 7 %. Esto puede explicarse por la menor rentabilidad de los productos verdes que requieren ese proceso. Al igual que en la práctica, el modelo tiende a priorizar la producción de productos secos, que tienen mayor valor en el mercado, lo que implica que algunos equipos asociados a procesos menos rentables queden subutilizados, incluso cuando existe disponibilidad técnica.

En el caso de la **instancia 4**, que simula una reducción del 25 % en el abastecimiento de materia prima, se observa una disminución significativa en la utilización de máquinas en comparación con los escenarios base. Este comportamiento es coherente con la lógica productiva: al tener menos materia prima disponible, el modelo no puede mantener la misma intensidad de producción, lo que genera holguras en varias etapas de la producción. Esto es especialmente evidente en máquinas clave como *drymill_Mulchen*, donde los niveles de utilización caen por debajo del 65 %, reflejando una menor carga de trabajo en comparación con escenarios como el 1 o 3, donde se alcanzan niveles cercanos al 100 %. Del mismo modo,

la línea de *clasificado_Bucalemu* reduce drásticamente su uso en el periodo 2 (36,02 %), lo cual indica que el flujo de productos intermedios se ve interrumpido por la falta de *stock* en fases anteriores.

Estos resultados refuerzan la interpretación de que el modelo, ante restricciones severas de abastecimiento, opta por reorganizar la producción de forma localizada, priorizando algunas rutas y plantas sobre otras, y utilizando intensamente los trasposos como mecanismo de compensación. Sin embargo, esta estrategia no logra mantener la eficiencia global del sistema, lo que se refleja tanto en la caída del cumplimiento de demanda como en la menor utilización de recursos.

En la **instancia 5**, se incrementa el porcentaje mínimo de productos cepillados que deben ser procesados directamente en la planta de Mulchén, pasando de un 70 % a un 85 %. Este ajuste busca simular una estrategia orientada a aumentar el valor agregado de los productos terminados sin recurrir a servicios externos.

Contrario a lo que se podría esperar, la utilización de la máquina *drymill_Mulchen*, encargada del proceso de cepillado, no presenta un aumento significativo respecto a la instancia base. De hecho, en el periodo 1 se observa una leve disminución, aunque se mantiene en niveles operativos elevados. Este resultado sugiere que el cumplimiento del mayor porcentaje de cepillado requerido no se logra exclusivamente a través del uso intensivo de esta máquina, sino mediante una reconfiguración global del flujo de productos dentro del sistema.

Un aspecto particularmente relevante es el comportamiento del *clasificado_Bucalemu*, que presenta una utilización del 100 % en los tres periodos bajo la instancia 5, mientras que la instancia base solo alcanza un 78,13 % en el periodo 1 y 72,85 % en el periodo 2. Este aumento podría estar indicando que Bucalemu está recibiendo una mayor cantidad de productos intermedios desde otras plantas, posiblemente como consecuencia de ajustes en la estrategia de trasposos y distribución de carga. Aunque Mulchén realiza un mayor porcentaje de cepillado, eso no implica que procese todo el volumen de producción por completo, sino que concentra el cepillado en lo que puede manejar, liberando a otras plantas para completar procesos menos saturados, como el clasificado.

Desde una perspectiva operativa, la instancia 5 permite a CMPC analizar cómo el sistema se adapta cuando se imponen restricciones de calidad en una planta específica. La redistribución observada en la utilización de recursos sugiere que una mejora en el equipamiento de cepillado

en Mulchén podría no solo reducir costos logísticos por trasposos, sino también optimizar la asignación de recursos aguas abajo, generando una cadena de beneficios que impacta positivamente en la eficiencia global en la planificación de la producción en todas las plantas.

4.2.8. Utilización de las máquinas en la instancia 6

La instancia 6 se analiza por separado debido a que considera un horizonte de planificación extendido a doce periodos, equivalente a un año completo de operación, así como un volumen de pedidos significativamente mayor. La **Tabla 11** presenta el total de horas utilizadas, disponibles y porcentaje de utilización por máquina en cada planta. Se observa una alta saturación en la mayoría de los procesos críticos: secado, *drymill*, clasificado y línea 500 alcanzan un 100 % de utilización en todas las plantas. Esta situación confirma que, para alcanzar el 75,5 % de cumplimiento, el modelo exige el uso completo de la capacidad instalada en estos procesos, lo cual podría representar un punto de alerta para CMPC respecto a la sostenibilidad operativa si se mantuviera esta presión durante todo un año.

Tabla 11: Total de horas utilizadas, disponibles y porcentaje de utilización por máquina en el escenario 6.

Planta	Máquina	Usadas (hrs)	Disponibles (hrs)	Utilización (%)
Mulchen	baño_Mulchen	1026	5140	20
	drymill	4819	5220	92,3
	impregnado_Mulchen	828	4865	17
	linea500_Mulchen	2164	2164	100
	secado_Mulchen	6652	6652	100
	secadoimp_ply_Mulchen	480	480	100
Bucalemu	baño_Bucalemu	268	4500	6
	clasificado_Bucalemu	4294	4294	100
	secado_Bucalemu	7066	7066	100
Nacimiento	baño_Nacimiento	2405	6032	39,9
	clasificado_Nacimiento	2116	2116	100
	drymill_Nacimiento	5920	5920	100
	secado_Nacimiento	7244	7244	100

Por otro lado, se identifican procesos con baja utilización, como *baño_Bucalemu* (6 %) e *impregnado_Mulchen* (17 %), lo que sugiere la existencia de holguras operativas en ciertas líneas de producción. Este comportamiento es coherente con la realidad de CMPC, donde los productos verdes suelen tener menor demanda y un valor comercial inferior en comparación con los productos secos o cepillados, lo que se traduce en una baja prioridad estratégica para su producción.

Estas holguras, lejos de representar ineficiencia, pueden ser vistas como una oportunidad para flexibilizar el uso de la capacidad instalada o reconfigurar el mix productivo de acuerdo con las condiciones del mercado. Para CMPC, esto podría significar redirigir recursos y esfuerzos hacia procesos más críticos o rentables, como el secado y el cepillado, optimizando así la rentabilidad global del sistema productivo.

4.2.9. Ejemplo de cumplimiento de un pedido en la instancia 6

Con el fin de ilustrar en detalle el comportamiento dinámico del modelo en un horizonte anual, se presenta a un ejemplo simple de cumplimiento de un pedido específico en la instancia 6. Este caso permite visualizar cómo se coordinan la producción, el *stock* y los trasposos entre plantas a lo largo de varios periodos. Desde una perspectiva práctica, este análisis permite a CMPC comprender cómo la planificación interperiodo contribuye a evitar cuellos de botella y optimizar el uso de los recursos disponibles, sin necesidad de sobredimensionar la capacidad operativa.

La **Tabla 12** muestra el detalle de producción del pedido 10, uno de los más exigentes del escenario, permitiendo analizar la trazabilidad interperiodo y la interacción entre procesos. Se observa que la producción comienza en el periodo 2, apoyada por un *stock* inicial en el proceso de aserrío, el cual permite abastecer secado y posteriormente el proceso de *drymill*. Este patrón se repite en los periodos 6, 7 y 8, aunque con variantes interesantes.

Tabla 12: Producción por periodo y proceso del pedido 10.

Periodo	Proceso	Stock inicial	Traspaso	Producción contra pedido
2	aserrío	555	0	6975
	secado	0	0	6929
	drymill	0	0	6721
6	aserrío	6196	428	6677
	secado	0	0	10621
	drymill	0	0	10302
7	aserrío	0	5101	6460
	secado	0	0	10636
	drymill	0	0	10317
8	aserrío	0	2109	6960
	secado	0	0	8344
	drymill	0	0	8093

En el periodo 6, el aserradero recibe un traspaso desde otra planta que, junto con el *stock* inicial, permite completar el volumen requerido. En los periodos 7 y 8, el modelo sigue

utilizando traspasos estratégicos, pero no en su totalidad, generando excedentes que quedan disponibles como *stock* o pueden ser destinados a otros pedidos. Esta dinámica evidencia el valor del modelo para planificar de forma flexible la producción, considerando no solo el cumplimiento de un pedido específico, sino también la eficiencia del sistema en su conjunto.

4.2.10. Comparación con balance trimestral

Es esencial contrastar los resultados del modelo con los resultados del balance trimestral realizado por las plantas y el área de planificación central de CMPC. Las primeras cinco instancias están basadas en este balance, por lo que los resultados de producción para los productos centrales demandados son relativamente consistentes en cuanto a volumen (ver **Tabla 8**), con ligeras variaciones entre las instancias debido a las modificaciones en los parámetros del modelo. La excepción es la **instancia 4**, que presenta una reducción en el abastecimiento de materia prima, lo que impacta directamente la capacidad de producción.

Una parte fundamental de este análisis es comparar la generación de productos laterales, que son fabricados como resultado de la producción de los productos centrales. Aunque no son el foco principal de la demanda, los productos laterales dependen directamente de los esquemas de corte aplicados a la materia prima disponible. Los esquemas de corte determinan cómo se maximiza el uso de cada trozo de madera, generando productos secundarios que, aunque de menor valor comercial, son esenciales para mantener una operación eficiente. Además, esta producción afecta la utilización de las máquinas y por lo tanto la capacidad productiva de las plantas.

La **Tabla 13** presenta los productos laterales y las cantidades generadas en cada instancia, derivadas de la producción de productos centrales en los distintos escenarios. Se observa que la producción de productos laterales se mantiene relativamente constante entre las distintas instancias. Esto está principalmente relacionado con la falta de variación en las opciones de esquemas de corte disponibles y el abastecimiento de materia prima a lo largo de las instancias. La excepción se encuentra en la instancia 3, donde una reducción en el abastecimiento afecta directamente la cantidad de productos laterales generados.

Tabla 13: Balance y Capacidad por Producto.

Producto	Balance	Ins. 1	Ins. 2	Ins. 3	Ins. 4	Ins. 5
Col	1.737	1.757	1.757	1.757	1.318	1.757
Finger Out	4.477	4.350	4.217	4.104	3.297	4.159
Mueblería	34.349	33.931	33.778	33.330	27.465	33.393
Remanufactura	71.173	71.735	71.839	72.589	55.311	71.614
Total general	111.736	111.773	111.716	111.780	87.391	110.923

Los esquemas de corte utilizados en el modelo fueron calculados por *CAPACITY* y se consideran como una muestra representativa de todos los posibles esquemas. Sin embargo, estos esquemas permanecen constantes en todas las instancias, lo que limita las opciones para diversificar la producción de productos laterales. Además, las dimensiones de los trozos de madera y el abastecimiento de materia prima no cambian entre las instancias, lo que restringe aún más la capacidad de generar más productos secundarios. Esta constancia en los parámetros de entrada contribuye a que la producción de productos laterales siga un patrón predecible y estable, sin grandes fluctuaciones en su generación.

Capítulo 5

Conclusión

La presente memoria de título tuvo como finalidad implementar una mejora al modelo de programación lineal utilizado por CMPC Maderas para la planificación táctica de su producción. A lo largo del desarrollo de esta memoria, se abordaron de manera sistemática los objetivos definidos inicialmente.

Con estos antecedentes, se procedió a diseñar y construir una mejora significativa al modelo de programación lineal preexistente, incorporando variables que representan la dinámica operativa real de los aserraderos, como la producción contra pedido, inventario, traspasos entre plantas, aplicación de esquemas de corte y uso de servicios externos. La formulación del modelo incluye restricciones que consideran tanto condiciones técnicas como logísticas, lo que permitió representar de forma precisa las limitaciones productivas y operacionales de CMPC Maderas. Además, se definió una función objetivo orientada a maximizar el beneficio neto, integrando tanto los ingresos por ventas como los costos de producción, transporte, servicios y consumo de materia prima.

El desempeño del modelo fue evaluado a través de seis escenarios distintos, diseñados para simular situaciones reales de operación y contingencia, como la falta de abastecimiento, el aumento en los requerimientos de valor agregado o la restricción de traspasos y servicios. Los resultados evidencian que el modelo es capaz de adaptarse a diferentes condiciones, manteniendo altos niveles de cumplimiento de demanda, eficiencia en el uso de recursos y mejoras en la rentabilidad. Asimismo, su tiempo de ejecución fue razonable, incluso en escenarios de planificación anual, lo que demuestra su escalabilidad y aplicabilidad práctica.

Por otra parte, se contrastaron los resultados obtenidos con la planificación desarrollada

tradicionalmente por el área de planificación central de la empresa. Este análisis comparativo permitió validar la solución del modelo, confirmando que alcanza un desempeño superior o equivalente en términos de producción, pero con una mayor trazabilidad y control sobre el uso de recursos. Además, el modelo permite identificar oportunidades de mejora específicas, como la conveniencia económica de traspasos interplanta o la justificación de invertir en capacidades internas de cepillado.

Sin embargo, es importante señalar que el modelo desarrollado presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, asume certeza en los parámetros de entrada, como la demanda y el suministro de materia prima, sin considerar escenarios de incertidumbre. Además, no se incluyeron aspectos energéticos ni variables ambientales, que pueden ser relevantes en decisiones de planificación sostenible. En trabajos futuros, se propone abordar estas limitaciones mediante la incorporación de incertidumbre a través de enfoques de optimización robusta o estocástica, la inclusión de indicadores ambientales y energéticos en la función objetivo. Estas extensiones permitirían enriquecer el modelo y aumentar su aplicabilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en contextos industriales complejos y dinámicos.

Bibliografía

- Chabanet, S., El-Haouzi, H. B., Morin, M., Gaudreault, J., & and, P. T. (2023). Toward digital twins for sawmill production planning and control: benefits, opportunities, and challenges. *International Journal of Production Research*, 61(7):2190–2213.
- Diaz-Madronero, M., Mula, J., & Peidro, D. (2014). A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. *International Journal of Production Research*, 52(17):5171–5205.
- Dumont, L. B., Marier, P., Lehoux, N., Gosselin, L., & Fortin, H. (2019). Integrating electric energy cost in lumber production planning. *IFAC Papersonline*, 52(13):2249–2254. 9th IFAC/IFIP/IFORS/IISE/INFORMS Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM), Berlin, Germany, 28-30, 2019.
- Instituto Forestal (2024). Información del sector forestal en chile. <https://wef.infor.cl/>. Recuperado el 17 de marzo de 2025.
- Lobos, A. & Vera, J. R. (2016). Intertemporal stochastic sawmill planning: Modeling and managerial insights. *Computers Industrial Engineering*, 95:53–63.
- Maturana, S. & Pizani, E. (2009). Scheduling and production planning for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pages 124–128. IEEE.
- Matus, E. I. (2024). Optimización del plan de producción en plantas de madera en cmpc maderas spa. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial.
- Memoria Anual Inversiones CMPC (2023). Memoria anual 2023. <https://www.cmpc.com/wp-content/uploads/2024/03/Memoria-Anual-CMPC-2023.pdf>. Recuperado el 17 de marzo de 2025.
- Singer & Donoso (2007). Internal supply chain management in the chilean sawmill industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 27(5):524–541.
- Vanzetti, N., Broz, D., Corsano, G., & Montagna, J. M. (2018). An optimization approach for multiperiod production planning in a sawmill. *Forest Policy and Economics*, 97:1–8.
- Varas, M., Maturana, S., Pascual, R., Vargas, I., & Vera, J. (2014). Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 150:37–51.
- Vergara, F. P., Palma, C. D., & Sepulveda, H. (2015). A comparison of optimization models for lumber production planning. *Bosque (Valdivia)*, 36:239 – 246.

Apéndice A

Resultados

Tabla A14: Ruta de procesos.

Ruta	S1	S2	S3	S4	S5
1	drymill	secado	aserradero		
2	impregnado	drymill	secado	aserradero	
3	clasificado	secado	aserradero		
4	baño	aserradero			
5	clasificado	secado	aserradero		
6	cepillado	secado	aserradero		
7	servicio	cepillado	secado	aserradero	
8	secadoimp	impregnado			
9	secadoimp	impregnado	drymill	secado	aserradero

Tabla A15: Abastecimiento en Bucalemu de materia prima en m^3

Planta	Diámetro	Largo	Precio	1	2	3
Bucalemu	18.0	4.0	42.0	1.295	1.136	1.113
Bucalemu	20.0	4.0	42.0	2.885	2.530	2.478
Bucalemu	22.0	4.0	45.9	1.906	1.672	1.638
Bucalemu	23.0	4.0	45.9	1.514	1.327	1.300
Bucalemu	24.0	4.0	47.6	2.735	2.491	2.440
Bucalemu	25.0	4.0	47.6	2.687	2.448	2.398
Bucalemu	26.0	4.0	47.6	2.869	2.613	2.560
Bucalemu	27.0	4.0	47.6	2.558	2.330	2.283
Bucalemu	28.0	4.0	49.8	2.122	1.933	1.893
Bucalemu	29.0	4.0	49.8	1.637	1.491	1.461
Bucalemu	30.0	4.0	49.8	1.270	1.157	1.134
Bucalemu	31.0	4.0	49.8	731	666	653
Bucalemu	32.0	4.0	52.5	589	536	525
Bucalemu	33.0	4.0	52.5	380	347	339
Bucalemu	34.0	4.0	52.5	522	476	466
Bucalemu	22.0	4.0	52.5	309	309	303
Bucalemu	24.0	4.5	45.9	1.924	1.927	1.887
Bucalemu	26.0	4.5	47.6	2.426	2.429	2.380
Bucalemu	28.0	4.5	47.6	1.671	1.673	1.639
Bucalemu	30.0	4.5	47.6	885	887	868
Bucalemu	32.0	4.5	52.5	468	468	459

Tabla A16: Abastecimiento en Mulchen de materia prima en m^3

Planta	Diámetro	Largo	Precio	1	2	3
Mulchen	18.0	4.0	42.0	26	28	28
Mulchen	20.0	4.0	42.0	1.118	1.208	1.172
Mulchen	22.0	4.0	45.9	6.466	6.991	6.779
Mulchen	24.0	4.0	47.6	3.093	3.344	3.242
Mulchen	25.0	4.0	47.6	1.775	1.918	1.860
Mulchen	26.0	4.0	47.6	1.504	1.626	1.577
Mulchen	27.0	4.0	47.6	1.419	1.535	1.488
Mulchen	28.0	4.0	49.8	1.126	1.217	1.180
Mulchen	30.0	4.0	49.8	1.242	1.343	1.302
Mulchen	32.0	4.0	52.5	464	502	486
Mulchen	34.0	4.0	52.5	247	268	259
Mulchen	22.0	4.9	45.9	2.936	3.174	3.078
Mulchen	23.0	4.9	47.6	3.866	4.180	4.053
Mulchen	24.0	4.9	47.6	4.292	4.641	4.500
Mulchen	25.0	4.9	47.6	2.731	2.953	2.863
Mulchen	26.0	4.9	47.6	1.961	2.120	2.056
Mulchen	28.0	4.9	49.8	2.731	2.953	2.863
Mulchen	32.0	4.9	52.5	3.866	4.180	4.053

Tabla A17: Abastecimiento en Nacimiento de materia prima en m^3

Planta	Diámetro	Largo	Precio	1	2	3
Nacimiento	18.0	3.4	42.0	2.880	3.120	3.000
Nacimiento	20.0	3.4	42.0	7.800	8.450	8.125
Nacimiento	22.0	3.4	45.9	8.400	9.100	8.750
Nacimiento	24.0	4.0	47.6	4.896	5.304	5.100
Nacimiento	25.0	4.0	47.6	4.493	4.867	4.680
Nacimiento	26.0	4.0	47.6	3.571	3.869	3.720
Nacimiento	28.0	4.0	49.8	292	316	304
Nacimiento	30.0	4.0	52.5	146	159	152
Nacimiento	32.0	4.0	52.5	40	43	42
Nacimiento	34.0	4.0	52.5	15	16	16
Nacimiento	36.0	4.0	54.0	6	6	6
Nacimiento	38.0	4.0	54.0	3	3	3
Nacimiento	42.0	4.0	54.0	6	6	6
Nacimiento	24.0	4.9	47.6	1.933	2.095	2.014
Nacimiento	26.0	4.9	47.6	3.342	3.620	3.481
Nacimiento	28.0	4.9	49.8	3.210	3.478	3.344
Nacimiento	30.0	4.9	52.5	2.074	2.247	2.161
Nacimiento	32.0	4.9	52.5	1.260	1.365	1.312
Nacimiento	34.0	4.9	52.5	667	723	695
Nacimiento	36.0	4.9	54.0	195	209	191
Nacimiento	38.0	4.9	54.0	54	58	51
Nacimiento	40.0	4.9	54.0	19	20	19
Nacimiento	42.0	4.9	54.0	6	6	6

Tabla A18: Producción en aserradero por planta y período escenario real

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	30152	31905	31237	93294
Mulchen	43560	47310	46520	137391
Nacimiento	43386	46906	45291	135583

Tabla A19: Stock final en aserradero por planta y período escenario real

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	4237	1523	223	5983
Mulchen	5123	3493	0	8616
Nacimiento	0	1201	1376	2577

Tabla A20: Producción en proceso de secado por planta y período escenario real

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	13428	15386	15032	43845
Mulchen	22495	25336	22875	67906
Nacimiento	17598	17665	16772	52035

Tabla A21: Stock final en proceso de secado por planta y período escenario real

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	223	0	0	223
Mulchen	1593	0	0	1593
Nacimiento	844	286	0	1130

Tabla A22: Producción en el proceso de baño por planta y período escenario real

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	239	4290	2842	7371
Mulchen	2069	10844	12840	25752
Nacimiento	7514	8475	9443	25432

Tabla A23: Producción en proceso Drymill por planta, máquina y período escenario real

Planta	Máquina	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	clasificado_Bucalemu	11823	12827	12342	36992
Mulchen	drymill	15206	17987	16076	49269
Mulchen	linea500_Mulchen	2565	2656	2775	7996
Nacimiento	clasificado_Nacimiento	3485	3875	3485	10845
Nacimiento	drymill_Nacimiento	11311	12133	11556	34999

Tabla A24: Detalle de trasposos de material entre plantas escenario real

Material	Origen	Destino	P1	P2	P3
Central por banar	Bucalemu	Mulchen	1500	1500	1500
Remanufactura_24_100_Seco_Lateral	Bucalemu	Mulchen	1030	1030	1030

Tabla A25: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Mulchen escenario real

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Mulchen	69	363	427	410	447	428	341	84	1
drymill	354	417	373	398	467	440	44	50	67
impregnado_Mulchen	92	46	69	548	525	593	456	479	524
linea500_Mulchen	171	177	185	171	185	185	0	8	0
secado_Mulchen	507	552	539	507	552	539	0	0	0
secadoimp_ply_Mulchen	60	20	40	60	20	40	0	0	0

Tabla A26: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Bucalemu escenario real

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Bucalemu	22	390	258	360	390	375	338	0	117
clasificado_Bucalemu	343	372	358	343	372	358	0	0	0
secado_Bucalemu	519	595	581	576	595	595	57	0	14

Tabla A27: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Nacimiento escenario real

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Nacimiento	397	444	497	485	526	497	88	82	0
clasificado_Nacimiento	170	189	170	170	189	170	0	0	0
drymill_Nacimiento	476	517	487	476	517	487	0	0	0
secado_Nacimiento	606	596	578	606	596	609	0	0	31

Tabla A28: Componentes de la función objetivo escenario real

Componentes	Valor
Ingreso	40.056.043
Costos de producción	2.267.248
Costos de traspaso (procesos)	30.900
Costos de traspaso (aserradero)	45.000
Costos de servicio	159.278
Costos de materia prima	19.360.09
Total	18.193.528

Tabla A29: Producción en el proceso de aserradero escenario 1

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	30150	31923	31221	93294
Mulchen	43610	47365	46416	137391
Nacimiento	42875	47247	45461	135583

Tabla A30: Stock final en aserradero por período escenario 1

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	239	1473	0	1712
Mulchen	0	0	0	0
Nacimiento	259	17	0	276

Tabla A31: Producción en el proceso de secado escenario 1

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	12982	12971	15386	41339
Mulchen	22492	21304	22875	66671
Nacimiento	15538	17756	17045	50339

Tabla A32: Stock final en secado por período escenario 1

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	0	729	0	729
Mulchen	0	2016	0	2016
Nacimiento	897	0	0	897

Tabla A33: Producción en el proceso de baño escenario 1

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	3960	4290	4125	12375
Mulchen	7704	7978	7739	23420
Nacimiento	9215	9994	9434	28652

Tabla A34: Producción en el proceso de drymill escenario 1

Planta	Máquina	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	clasificado_Bucalemu	9223	9352	12342	30917
Mulchen	drymill	16457	15528	18969	50954
Mulchen	linea500_Mulchen	2565	2775	2775	8115
Nacimiento	clasificado_Nacimiento	3485	3875	3485	10845
Nacimiento	drymill_Nacimiento	9429	12067	11453	32949

Tabla A35: Traspasos de salida por material y período escenario 1

Material	Origen	Destino	P1	P2	P3
Lateral por secar_24_115 - 159	Bucalemu	Mulchen	391	184	0
Remanufactura_24_100_Seco_Lateral	Bucalemu	Mulchen	1964	1655	1865
Remanufactura_24_115-159_Seco_Lateral	Bucalemu	Mulchen	499	637	865
Central Embalaje Seco_Cent_Embalaje_Seco	Mulchen	Bucalemu	0	369	377
Central Embalaje Seco_Cent_Embalaje_Seco	Nacimiento	Bucalemu	0	457	31

Tabla A36: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Mulchen escenario 1

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Mulchen	257	266	258	410	447	428	153	181	170
drymill	382	360	440	398	467	440	16	107	0
impregnado_Mulchen	92	46	69	548	525	593	456	479	524
linea500_Mulchen	171	185	185	171	185	185	0	0	0
secado_Mulchen	507	552	539	507	552	539	0	0	0
secadoimp_ply_Mulchen	60	20	40	60	20	40	0	0	0

Tabla A37: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Bucalemu escenario 1

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Bucalemu	360	390	375	360	390	375	0	0	0
clasificado_Bucalemu	268	271	358	343	372	358	75	101	0
secado_Bucalemu	502	502	595	576	595	595	74	93	0

Tabla A38: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Nacimiento escenario 1

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Nacimiento	485	526	497	485	526	497	0	0	0
clasificado_Nacimiento	170	189	170	170	189	170	0	0	0
drymill_Nacimiento	398	517	487	476	517	487	78	0	0
secado_Nacimiento	521	596	574	606	596	609	85	0	35

Tabla A39: Componentes de la función objetivo escenario 1

Componentes	Valor
Ingreso	40.366.667
Costos de producción	2.201.390
Costos de traspaso (procesos)	87191
Costos de traspaso (aserradero)	5751
Costos de servicio	0
Costos de materia prima	19.645.084
Total	18.427.251

Tabla A40: Producción en el proceso de aserradero escenario 2

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	30150	31907	31237	93294
Mulchen	43663	43712	46416	137791
Nacimiento	43037	46931	45615	135583

Tabla A41: Stock final en aserradero por período escenario 2

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	239	1358	0	1597
Mulchen	0	410	0	410
Nacimiento	125	397	0	522

Tabla A42: Producción en el proceso de secado escenario 2

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	13595	14704	14170	42468
Mulchen	21449	22337	22891	66677
Nacimiento	15788	17536	17015	50339

Tabla A43: Stock final en secado por período escenario 2

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	1965	1693	0	3658
Mulchen	2095	889	0	2984
Nacimiento	606	0	0	606

Tabla A44: Producción en el proceso de baño escenario 2

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	3662	3539	3656	10857
Mulchen	6871	7419	7248	21538
Nacimiento	8554	9277	8676	26506

Tabla A45: Producción en el proceso de drymill escenario 2

Planta	Máquina	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	clasificado_Bucalemu	11689	12647	12178	36514
Mulchen	drymill	13419	14822	15810	44051
Mulchen	linea500_Mulchen	2462	2664	2664	7790
Nacimiento	clasificado_Nacimiento	3485	3875	3485	10845
Nacimiento	drymill_Nacimiento	10346	11500	11399	33245

Tabla A46: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Mulchen escenario 2

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Mulchen	257	252	272	410	447	428	153	195	156
drymill	301	441	440	398	467	440	97	26	0
impregnado_Mulchen	92	46	69	548	525	593	456	479	524
linea500_Mulchen	171	185	185	171	185	185	0	0	0
secado_Mulchen	507	552	539	507	552	539	0	0	0
secadoimp_ply_Mulchen	60	20	40	60	20	40	0	0	0

Tabla A47: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Bucalemu escenario 2

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Bucalemu	360	390	375	360	390	375	0	0	0
clasificado_Bucalemu	268	271	358	343	372	358	75	101	0
secado_Bucalemu	503	504	592	576	595	595	73	91	3

Tabla A48: Horas usadas, disponibles y holguras en la planta Nacimiento escenario 2

Máquina	Usadas			Disponibles			Holguras		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
baño_Nacimiento	485	526	497	485	526	497	0	0	0
clasificado_Nacimiento	170	189	170	170	189	170	0	0	0
drymill_Nacimiento	435	517	487	476	517	487	41	0	0
secado_Nacimiento	528	574	590	606	596	609	78	22	19

Tabla A49: Componentes de la función objetivo escenario 2

Componentes	Valor
Ingreso	40.265.502
Costos de producción	2.206.418
Costos de traspaso (procesos)	0
Costos de traspaso (aserradero)	0
Costos de servicio	0
Costos de materia prima	19.645.084
Total	18.414.000

Tabla A50: Producción en el proceso de aserradero escenario 3

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	30198	31923	31221	93294
Mulchen	43610	47365	46416	137391
Nacimiento	42875	47247	45461	135583

Tabla A51: Stock final en aserradero por periodo escenario 3

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	239	1473	0	1712
Mulchen	0	0	0	0
Nacimiento	259	17	0	276

Tabla A52: Producción en el proceso de secado escenario 3

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	12982	12971	15386	41339
Mulchen	22492	21304	22875	66671
Nacimiento	15538	17756	17045	50339

Tabla A53: Stock final en secado por periodo escenario 3

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	0	729	0	729
Mulchen	0	2016	0	2016
Nacimiento	897	0	0	897

Tabla A54: Stock final en secado por periodo escenario 3

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	0	729	0	729
Mulchen	0	2016	0	2016
Nacimiento	897	0	0	897

Tabla A55: Producción en el proceso de baño escenario 3

Planta	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	3960	4290	4125	12375
Mulchen	7704	7978	7739	23420
Nacimiento	9215	9994	9434	28652

Tabla A56: Producción en el proceso de drymill escenario 3

Planta	Máquina	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Total
Bucalemu	clasificado_Bucalemu	9223	9352	12342	30917
Mulchen	drymill	16457	15528	18969	50954
Mulchen	linea500_Mulchen	2565	2775	2775	8115
Nacimiento	clasificado_Nacimiento	3485	3875	3485	10845
Nacimiento	drymill_Nacimiento	11347	12167	11567	35081

Tabla A57: Componentes de la función objetivo escenario 4

Componentes	Valor
Ingreso	31.057.825
Costos de producción	1.707.736
Costos de traspaso (procesos)	59.922
Costos de traspaso (aserradero)	63.844
Costos de servicio	0
Costos de materia prima	14.786.013
Total	14.440.311