



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
EN UN ASERRADERO:
COMPARACIÓN ENTRE UN MODELO
MATEMÁTICO Y UNA HEURÍSTICA**

ENZO ALEJANDRO PIZANI ZANETTI

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
SERGIO MATURANA V.

Santiago de Chile, Septiembre, 2009

© 2009, Enzo Pizani Zanetti



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
EN UN ASERRADERO:
COMPARACIÓN ENTRE UN MODELO
MATEMÁTICO Y UNA HEURÍSTICA**

ENZO ALEJANDRO PIZANI ZANETTI

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

SERGIO MATURANA V.

JORGE VERA

MARCOS GOYCOOLEA

HUGH RUDNICK

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Septiembre, 2009

*A mis Padres por su ejemplo;
a mi padre por su estímulo y tenacidad;
a mi madre por su preocupación y cariño;
a mis hermanos por su compañía y apoyo;
y a Paulina, por iluminar mis pensamientos
y alegrar mi corazón.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos y cada uno de quienes me han acompañado a lo largo del desarrollo del presente trabajo y durante el desarrollo de mi carrera.

En primer lugar a mi Familia, por su confianza, por el apoyo incondicional y por el cariño que me han dado a lo largo de mi vida.

Agradezco a todos mis amigos, de manera especial a Patricio Flores, Leonardo Gálvez, Víctor Molina y a Raúl Benavente, cuya amistad hizo más alegre mi paso por la universidad.

Agradezco especialmente a mi profesor supervisor, don Sergio Maturana, por su aporte académico y material al desarrollo de mi trabajo, y sobre todo, por la diligencia y buena voluntad con que siempre me atendió.

Finalmente, agradezco a mi polola, Paulina, por su infinita paciencia, por todo su apoyo y por todo ese amor capaz de superar cualquier distancia.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3 OPERACIÓN BÁSICA DE UN ASERRADERO.....	12
4 ENFOQUES DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA.....	18
4.1 El modelo.....	18
4.2 La heurística.....	24
5 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	28
5.1 Pruebas previas.....	28
5.2 Análisis del escenario ideal.....	29
5.3 El escenario ideal forestal.....	31
5.4 Perturbaciones aplicadas al escenario ideal.....	35
5.4.1 Disponibilidad de materia prima:	35
5.4.2 Distribución de la demanda en el set de productos:	35
5.4.3 Distribución inter-temporal de la demanda:	36
5.4.4 Demanda excesiva:	37
6 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	38
6.1 El caso ideal	38

6.2	Disponibilidad de materia prima.....	44
6.3	Distribución de la demanda en el set de productos.....	45
6.4	Distribución inter-temporal de la demanda:.....	49
6.5	Demanda excesiva:.....	51
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
7.1	Análisis de las instancias.....	52
7.1.1	Disponibilidad de materias primas.....	53
7.1.2	Distribución de la demanda en el set de productos.....	53
7.1.3	Distribución inter-temporal de la demanda.....	55
7.1.4	Demanda excesiva.....	57
7.2	Análisis de las perturbaciones.....	58
7.2.1	Disponibilidad de materias primas.....	58
7.2.2	Distribución de la demanda en el set de productos.....	58
7.2.3	Distribución inter-temporal de la demanda.....	59
7.2.4	Demanda excesiva.....	60
7.3	Análisis general del desempeño de ambos métodos.....	60
7.3.1	La heurística.....	60
7.3.2	El modelo.....	61
7.4	Análisis final.....	61
8	CONCLUSIONES.....	63
8.1	La metodología de análisis y los métodos propuestos a la luz de las prácticas utilizadas en la actualidad.....	63
8.2	Desempeño Gral. Del Modelo v/s Heurística.....	64
8.3	Implicancias.....	64
8.4	Posibles aplicaciones.....	66
8.5	Trabajo futuro.....	66
8.6	Conclusiones finales.....	67
	BIBLIOGRAFIA.....	69
	A N E X O S.....	72
	ANEXO A: VERIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE AMBOS MÉTODOS.....	73

ANEXO B: DETERMINACIÓN DE VALORES ADECUADOS PARA *IC* Y *BC*. 75

ANEXO C: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES..... 80

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 5.1: Tasas de conversión extraídas de Carrasco (2003).....	32
Tabla 5.2: Parámetros de productividad extraídos de Carrasco (2003).	32
Tabla 5.3: Valores ideales para el escenario forestal.	33
Tabla 5.4: Clasificación de productos de acuerdo a su rendimiento de conversión.	34
Tabla 5.5: Escenario ideal utilizado como caso base.....	34
Tabla 5.6: Descripción del caso ideal.	37
Tabla 6.1: Procesamiento de trozas programado por el modelo propuesto.	39
Tabla 6.2: Producción programada por el modelo propuesto.	39
Tabla 6.3: Inventario programado por el modelo propuesto.....	40
Tabla 6.4: Retraso en entregas programado por el modelo propuesto.....	40
Tabla 6.5: Procesamiento de trozas programado por la heurística propuesta.....	41
Tabla 6.6: Producción programada por la heurística propuesta.....	41
Tabla 6.7: Inventario programado por la heurística propuesta.	42
Tabla 6.8: Retraso en entregas programado por la heurística propuesta.....	42
Tabla 6.9: Indicadores del resultado obtenido para el caso ideal.....	43
Tabla 6.10: Indicadores de desempeño de los métodos frente a restricción en la disponibilidad de materias primas.....	44
Tabla 6.11: Indicadores de los resultados obtenidos para instancias con diversa distribución relativa de la demanda entre productos.	48
Tabla 6.12: Indicadores de los resultados obtenidos para instancias con diversa distribución inter-temporal de la demanda.....	50
Tabla 6.13: Indicadores del resultado obtenido para la dieciseisava instancia.	51

Tabla 7.1: Parámetros de medición del desempeño de cada método para instancias con diversa distribución relativa de la demanda entre productos.	54
Tabla 7.2: Parámetros de medición del desempeño de cada método, para instancias con diversa distribución inter-temporal de la demanda.	56
Tabla 7.3: Parámetros de medición del desempeño de los métodos, para instancia perturbada con demanda excesiva.....	58
Tabla 7.4: Promedio de los indicadores de desempeño de los métodos para cada tipo de perturbación.	60
Tabla A.1: Instancia de prueba	73
Tabla A.2: Resultados experimentales para la instancia de prueba	74
Tabla B.1: Instancia "extrema"	75
Tabla B.2: Resultados experimentales para escenario extremo	76
Tabla B.3: Escenario "abierto"	77
Tabla B.4: Tamaño relativo de cada producto respecto al total de su tipo	78
Tabla B.5: Resultados experimentales para escenario "abierto".....	79
Tabla C.1: Archivos correspondientes a la implementación de las instancias	80

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1: Etapas del proceso de aserrado.....	14
Figura 3.2: Ejemplos de patrones de corte alternativos para cierta troza.....	16

RESUMEN

La programación de la producción en un aserradero presenta diversos desafíos, ya que, el suministro de trozas es de diámetros y características muchas veces no conocidas con exactitud al momento de programar. De dichas características dependen: los patrones de corte factibles para cada troza, los productos obtenidos de éstas y sus respectivos rendimientos. Además, el procesamiento de cada troza involucra la producción de todo el set de productos asociados a ella, los cuales son obtenidos con rendimientos inciertos. Parte de las investigaciones han enfrentado el problema de forma indirecta, proponiendo soluciones a las dificultades antes mencionadas, usando para ello: simulación, programación matemática y una combinación de ambos métodos. Además, algunos de ellos, ofrecen soluciones de carácter comercial, carentes de detalles técnicos o matemáticos. Esta investigación aborda el problema mediante dos enfoques. Primero, se presenta un modelo matemático, que calcula simultáneamente el tamaño de lote y la programación de los diversos tipos de trozas. En segundo lugar, desarrolla una heurística, que resuelve el problema, aplicando de forma sistemática los criterios usados comúnmente por el programador de un aserradero del sur de Chile. Se prueban ambos enfoques bajo diversos escenarios, en un horizonte de planificación de seis semanas, notándose que el modelo matemático muestra un desempeño superior en todas las instancias. Además, se analiza, para cada método, la incidencia de los diversos parámetros sobre el desempeño de un aserradero.

Palabras Claves: Programación de la producción; Proceso de aserrado; Modelación matemática; Heurística; Horizonte rodante; Sub-periodos.

ABSTRACT

Production scheduling for sawmills presents several challenges, since the supply of logs has diameters and characteristics often unknown at scheduling time. Such characteristics depend on: the feasible cutting patterns for each log, the products obtained from them, and their respective yields. Furthermore the processing of each log involves obtaining a set of products associated to it, with unknown yields. Part of the research has faced the problem indirectly, by proposing solutions to the difficulties mentioned above, using for this: simulation, mathematical programming and a combination of both. Moreover, some of them offer solutions of commercial nature with no mathematical or technical details. The present research addresses the problem through two approaches. First, it presents a mathematical model, which calculates both the batch size and the schedule of various types of logs. Secondly, it develops a heuristic method that solves the problem by systematically applying the criteria used by a sawmill programmer in southern Chile. Both approaches are tested under various scenarios in a six week planning horizon, with the mathematical model showing a superior performance in all instances. Furthermore, it analyzes, for each method, the incidence of various parameters on the sawmill performance.

Keywords: Production scheduling; Sawing process; Mathematical modeling; Heuristic; Rolling horizon; Sub-periods.

1 INTRODUCCIÓN

La industria forestal, es parte fundamental de la economía de Chile, con una participación cercana al 3% del Producto Interno Bruto nacional, durante los últimos años.

En Chile existen dos grandes empresas que dominan ésta industria. Estas operan en todas las etapas del proceso productivo, dedicándose a la plantación, cosecha y aprovechamiento de bosques, principalmente de Pino Radiata, especie que representa alrededor de un 71,6% del consumo de trozas¹ de la industria.

Los principales productos provenientes del procesamiento de este recurso natural renovable son: madera aserrada, celulosa, los cuales son responsables de más del 80% del consumo de trozas del país.

Durante los últimos años, las compañías mencionadas, han aumentado su habilidad para exportar productos a diversos mercados, tanto, por el establecimiento de diversos tratados de libre comercio entre Chile y otros países, como por la mayor utilización que han dado a la investigación de operaciones (IO), para apoyar sus procesos de gestión.

En este contexto, la producción de madera aserrada ha cobrado especial importancia, aumentando, tanto su rentabilidad, como el nivel de complejidad de sus operaciones.

Una de las tareas más complejas y de mayor impacto en las operaciones de un aserradero, es la programación de la producción (PP).

El encargado de esta tarea, debe programar el procesamiento de trozas de diversas clases (diámetros), en la cantidad y en el momento apropiado, para satisfacer a tiempo los pedidos de maderas comprometidos por la empresa, considerando que los patrones

¹ Consumo de trozas de la I. forestal, para el año 2007, fue de 38,4 millones de m^3 , de los cuales 15,9 millones fueron aserrados (Anuario Forestal, 2008).

de corte² factibles de ser usados, dependen del diámetro de la troza procesada y, que del patrón de corte elegido, depende el set de productos complementarios (PC) obtenidos tras el procesamiento de cada troza.

En general, los aserraderos tratan de usar solo patrones de corte óptimos, de acuerdo a cierto criterio, como por ejemplo, los patrones que maximicen el rendimiento de conversión (Processes Yields) de cada troza. Esto es, los patrones que permitan generar el mayor volumen de productos finales para un volumen dado de materia prima.

Sin embargo, la elección del patrón de corte adecuado es altamente compleja, ya que el programador, por una parte, desconoce las cantidades exactas que obtendrá de cada producto y en segundo lugar, los patrones de corte utilizados, pueden generar productos que tienen baja prioridad de producción.

Lo primero se debe a que la variación de los rendimientos de conversión obtenidos para los diversos productos, dependen de las características físicas de las trozas, cada una de las cuales, tiene características y defectos únicos e impredecibles. Por otra parte, como al procesar una troza, se obtiene un set de PC fijo, es fácil ver que algunos de los productos del set podrían no estar siendo demandados en el corto plazo.

Este trabajo estudia el problema descrito, basado en las operaciones de un aserradero del sur de Chile, perteneciente a una de las compañías mencionadas, en el cual el objetivo primario detrás de la programación, es el mantener un alto nivel de cumplimiento de las ordenes de sus clientes, debiendo procurar además, la utilización eficiente de los recursos disponibles.

En dicha instalación, las órdenes de los clientes son recibidas con una antelación mínima de una semana, en la cual la demanda es absolutamente conocida, por lo que la demanda esperada para periodos posteriores a la primera semana, es estimada mediante un sistema de planificación operativa que posee la empresa, el que entrega una planificación para un horizonte de seis semanas, que es actualizado semanalmente.

² Cada patrón de corte, es una combinación fija de cortes, la cual es ejecutada en una o más máquinas, para procesar una troza seleccionada.

El programador del aserradero, realiza su trabajo de programación, mediante el uso de heurísticas y de su criterio altamente experimentado, para lo que cuenta con la información de la demanda mencionada y con el apoyo del sistema de planificación operativa, que le sugiere un plan de producción de acuerdo sus estimaciones, tanto de la demanda, como del suministro de trozas, para un horizonte de planificación (HP) confiable, de seis semanas.

En esta investigación, se presenta un modelo matemático, que considera la mayoría de las complejidades que involucra la PP en un aserradero. Dicho modelo, permite calcular simultáneamente el tamaño de lote y la programación de la producción diaria, para la primera semana del HP y la programación semanal, para el resto del HP de seis semanas.

El modelo, permite administrar el HP mediante una estructura de dos niveles de tiempo, en la cual cada periodo, puede ser dividido en cierto número fijo de sub periodos no superpuestos. En este caso, se propone manipular esta estructura a través de la definición de periodos semanales, de los cuales solo se divide el primer periodo, en siete sub periodos de un día.

Esto posibilita al modelo, calcular programas de producción que consideran simultáneamente las estimaciones obtenidas de la planificación de la producción para los próximos seis periodos semanales, con la información real a nivel diario, tanto del suministro de trozas disponibles y la capacidad productiva diaria de la línea de aserrío, como de los pedidos reales comprometidos para la semana en curso.

El modelo mencionado, su génesis, desarrollo, prueba y análisis, se presenta siguiendo la siguiente estructura: En la sección 2, se analizan las investigaciones previas, tanto del área forestal, como las orientadas al desarrollo de métodos de PP. En la sección 3, se ahonda en el proceso de aserrado y sus características. La Sección 4, se presenta el modelo matemático mencionado y se discuten los alcances de éste. Además, se presenta una heurística para realizar la PP que, basada en la metodología utilizada en la actualidad, permite comparar el modelo propuesto. En la sección 5, se presenta la metodología utilizada para diseñar y analizar los escenarios experimentales propuestos.

En la sección 6, se presentan los experimentos realizados, definiendo las instancias y presentando los resultados obtenidos por ambos métodos para cada una de ellas. En la sección 7, se realiza un análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 8, se presentan las conclusiones de este trabajo.

2 REVISIÓN DE LITERATURA.

La planificación y programación de la producción (PP) en la industria forestal, ha impulsado numerosas investigaciones en las diversas áreas de la cadena de suministro (CS) forestal, la que es descrita, para el caso de Chile, por Weintraub & Epstein (2005), quienes además discuten el uso, pobremente coordinado, de modelos y de sistemas computacionales en diversas etapas de dicha cadena. Paralelamente, Carlsson & Rönnqvist (2005), describen la CS forestal Sueca, para el caso de una compañía involucrada en todas las etapas de ésta.

Existen revisiones bibliográficas más focalizadas. Gunn (2007), revisa la literatura respecto a modelos de apoyo para la toma de decisiones de nivel estratégico. Por otra parte, Church (2007), menciona que las decisiones estratégicas, pudieran no ser factibles en la práctica y describe modelos de nivel táctico, tanto para decisiones a nivel de la cosecha, como para decisiones orientadas al cuidado del ecosistema, haciendo énfasis, en su utilidad para la coordinación de las decisiones de nivel estratégico, con las decisiones de nivel operativo.

La enorme cantidad de desafíos a nivel operativo, resulta en revisiones bibliográficas más focalizadas aún, las que desde la perspectiva del impacto de la IO, revisan las soluciones propuestas a problemas asociados, por ejemplo, a la cosecha de trozas (Epstein, Karlsson, Rönnqvist, & Weintraub, 2007), al alto costo que el transporte representa dentro de las operaciones (Epstein, Rönnqvist, & Weintraub, 2007) y al uso de metodologías como la programación entera (Weintraub, 2007) para resolver problemas como los antes aludidos.

El problema de PP en un aserradero, ha sido estudiado en diversas investigaciones, en la mayoría de las cuales es tratado indirectamente, abordando las complejidades inherentes a éste y la naturaleza impredecible del suministro de materia prima.

Por una parte, los diversos trabajos de Epstein, Rönnqvist y Weintraub, mencionados anteriormente, revisan procesos de los que depende el suministro de trozas

y cuya resolución repercute en el nivel de control que el programador tiene, sobre los tipos de trozas recibidos.

Por otro lado, la variabilidad natural de la morfología y por tanto del rendimiento de conversión de las trozas, ha sido enfrentada en diversas investigaciones, utilizando métodos de simulación, modelación matemática y una mezcla de ambos (Mendoza, Meimban, Luppold, & Araman, 1991).

Entre estos desarrollos, destaca el uso de trozas virtuales³, que simulan digitalmente las características y defectos de las trozas, lo que permite examinar los efectos de diversos patrones de corte, usados sobre una misma troza (Occeña & Schmoltdt, 1996).

Valiéndose de esta técnica de experimentación no destructiva, varias investigaciones (Steele, Wagner, Kumar, & Araman, 1993; Occeña & Schmoltdt, 1996; Noble, Orr, Araman, Baumgras, & Pickens, 2000; Winn, Wynne, & Araman, 2004) utilizan métodos de simulación y ciertas heurísticas, para probar los diversos patrones de corte factibles para cierta troza y así encontrar el “óptimo” entre ellos.

Estos trabajos, basados en métodos de simulación, no resuelven el problema de PP, presentando soluciones, de cuestionable optimalidad (Todoroki & Rönnqvist, 1997), a problemas adyacentes a éste.

Por otra parte y valiéndose también del uso de la experimentación no destructiva, Todoroki (1994) y Todoroki & Rönnqvist (1997), plantean modelos de optimización, para la elección del patrón de corte en el proceso de corte secundario. Luego, Todoroki & Rönnqvist, (1999) utiliza programación dinámica, para incluir en el modelo, la elección en el proceso de aserrado primario. Asimismo, Carnieri & Mendoza (2000) y Schmoltdt, Song, & Araman (2001), plantean modelos para la optimización del corte de

³ Las trozas virtuales pueden ser descritas a partir del escaneo de trozas reales mediante Tomografía Computarizada (CT Scan), a través de la digitalización manual de la troza, tras ser sometida a sucesivos procesos de corte o mediante la generación de trozas con características y defectos aleatorios.

tablas virtuales, el primero, para la re-manufactura de tablas para muebles y el segundo, para los procesos de recorte de los bordes (Edging) y puntas (Trimming). Posteriormente, Todoroki & Rönnqvist (2002) amplían su trabajo anterior, modificando los parámetros de la función objetivo, para cambiar, de acuerdo a su conveniencia, la prioridad entre optimizar el volumen o el valor del set de productos obtenido.

Estos trabajos, basados en modelos, si bien tampoco resuelven el problema de PP, presentan soluciones de mucha utilidad para la resolución del problema de programación, las que son más confiables que las obtenidas por los métodos de simulación.

Asimismo, Mendoza et al. (1991) y Weintraub, Zozom, Hodgson, & Cormier (1997) tratan el problema de planificación y PP, mezclando las metodologías de simulación con la modelación matemática.

El primero, propone un modelo de administración de inventario, que soluciona el problema de asignación de trozas a nivel de planificación. Tras lo anterior, se utiliza el modelo de simulación para encontrar un programa de producción factible, cercano a los objetivos presentados por el modelo de planificación.

Similarmente, el segundo trabajo, utiliza la simulación de eventos discretos orientada a objetos, para encontrar un programa factible, siguiendo para ello un plan de producción determinado por un software MRP.

En ambos casos, ni el modelo, ni el software MRP, consideran las restricciones físicas de la instalación, ni las restricciones respecto a la relación de complementariedad de los productos provenientes de una misma troza, y si bien, los métodos de simulación del proceso de aserrado pueden ser de utilidad para encontrar programas de producción factibles, no aseguran la calidad de la solución.

Posteriormente, Wessels, Price, Turner, & Dell (2006) propone un sistema de planificación de la producción para un aserradero, que integra el proceso de cosecha. Para esto, propone la integración de tres software. Uno, que mediante el análisis de muestras de los rodales cosechados, permite predecir el suministro de trozas, un segundo sistema, que permite simular el procesamiento de las trozas y las restricciones asociadas

a éste. Ambos software, integrados a un sistema de planificación de la producción, que utilizando programación lineal y entera mixta, es usado para determinar el plan de producción óptimo, sujeto al mercado y a las restricciones forestales.

Este trabajo, al igual que algunos de los antes mencionados, carece de detalles técnicos y matemáticos, los que probablemente son omitidos por motivos comerciales.

Últimamente, Kazemi, Ait, & Nourelfath (2009), aborda el problema de planificación, enfrentando la incertidumbre en los rendimientos productivos, inherente al suministro de trozas, a través de la búsqueda de soluciones robustas para éste problema. Este trabajo, describe con exactitud el escenario que debe enfrentar el planificador de la producción, el cual es muy similar al enfrentado por el programador. Específicamente, busca planificar la producción de múltiples productos para múltiples periodos, considerando como variable aleatoria, el rendimiento de conversión de las materias primas.

En conclusión, los métodos que hasta la fecha han abordado la PP en aserraderos, presentan soluciones más orientadas a la planificación operativa de la producción, por lo que si bien, facilitan enormemente la tarea de programador, no solucionan el problema que éste enfrenta día a día, con el suministro de trozas que efectivamente llega a la instalación, el cual, no cumplirá con las estimaciones realizadas al momento de planificar.

Tras la revisión de la literatura forestal, es interesante explorar otras líneas de investigación, que proponen metodologías de PP, adaptables al problema forestal.

En dicha búsqueda, se debe considerar la existencia de diversas metodologías para la PP, las que dependen de la naturaleza del proceso analizado, dentro de los cuales se pueden distinguir dos problemas de producción de distinta naturaleza, los problemas del tipo Job Shop y los del tipo Flow Shop (Meyr, 2000).

Los primeros, tratados en diversas investigaciones (Tan & Khoshnevis, 2000; Gan & Lee, 2002; Zhang, Saravanan, & Fuh, 2003; Moon, Lee, Jeong, & Yun, 2008), son aquellos en los que se debe programar la realización de una serie de tareas no

necesariamente secuenciales para producir un producto, como por ejemplo, la fabricación de los diversos componentes de un auto.

Por otra parte, en los problemas del tipo Flow Shop, se debe programar la realización de procesos, realizados por una (o unas pocas) líneas de producción altamente utilizadas.

De acuerdo a las definiciones anteriores, mencionadas por Meyr (2000), el aserrado es un caso particular de un problema del tipo Flow Shop, el cual ha sido enfrentado por diversos autores, que proponen métodos de loteo y programación simultánea de la producción para este tipo de sistemas.

En dicho contexto, el trabajo de Fleischmann & Meyr (1997), define el “General Lot Sizing And Scheduling Problem” (GLSP), para el que busca determinar tamaños de lote continuos, para varios productos que deben ser programados, en una sola máquina, sujeta a restricciones de capacidad. Esto, con el objetivo de satisfacer, sin permitir retrasos en la entrega, una demanda determinística y dinámica, dado un horizonte finito de planificación, a fin de minimizar el costo de inventario más el costo de “cambio de configuración dependiente de la secuencia de producción” (sequence-dependent set up cost).

En este trabajo, los autores utilizan una estructura de modelación, que divide el HP en dos niveles de tiempo. En un primer nivel, definen macro-periodos de largo fijo, que representan intervalos de tiempo discretos, similares a los utilizados tradicionalmente para dividir cierto HP, por ejemplo, en semanas. En el segundo nivel temporal, subdividen cada macro-periodo, en cierto número fijo de micro-periodos donde se podía producir un solo producto, por lo que la duración de cada uno, representa el tiempo de producción de cada producto, siendo éste tiempo, una de las variables de decisión del problema.

Posteriormente, Meyr en 2000, extiende el alcance del GLSP, tomando además en consideración, los “tiempos de cambio de configuración dependiente de la secuencia de producción” (sequence-dependent set up times).

A continuación, Clark (2003), propone un modelo de planificación para una línea de enlatado de bebidas. En dicho trabajo, utiliza las técnicas de modelación desarrolladas en los trabajos anteriores, que le permiten modelar cambios de configuración (set ups) en la línea de producción, prescindiendo de la utilización de la estructura de dos niveles de tiempo.

En este trabajo, el autor propone permitir al modelo, la posibilidad de retraso en la entrega de productos (Backlogging), para poder considerar una demanda propensa a errores de pronóstico. Para esto, redefine la función objetivo del problema, en la cual, minimiza la suma ponderada del inventario más el retraso en las entregas, utilizando dicho ponderador, para penalizar el inventario o el retraso, de acuerdo a lo indeseable que cada uno sea con respecto al otro. La relajación anterior, acrecienta enormemente el número de soluciones factibles al problema.

Más adelante, Clark (2005), compara diversas alternativas de solución al problema antes expuesto, basadas en la implementación, solo de las soluciones para los primeros períodos, de un horizonte rodante. Con esto, el autor une la investigación del GLSP, con la extensa línea de investigación desarrollada por autores como Sridharan, Berry, & Udayabhanu (1987) o posteriormente por Xie, Zhao, & Lee (2003), sobre estrategias de intervalos de tiempo para un plan maestro de producción calculado bajo horizonte rodante, todos los cuales analizan diversos parámetros, para el mencionado problema del Job Shop.

El principal acierto de éste trabajo es el valerse de la metodología de horizonte rodante para corregir los errores en el programa de producción generados tanto por los errores de estimación de la demanda, como los posibles errores inducidos por cambios en los escenarios de producción.

En un trabajo posterior, Araujo, Arenales, & Clark (2007), modifican el modelo planteado inicialmente por Clark en 2003, para calcular el tamaño de lote y la PP en una línea de fundición de una compañía metalúrgica, para lo que utilizan una estrategia de dos niveles de tiempo, en la que el HP es dividido en macro-períodos, los cuales a su vez, se dividen en sub-períodos.

Al igual que en 2005, dicha formulación es implementada rodando el HP en cada macro-periodo, por lo que solo se implementa la solución obtenida para el primer macro-periodo de la planificación, corrigiendo así, cualquier error en el programa.

Valiéndose de lo anterior, los autores proponen dividir solo el primer macro-periodo, en cierta cantidad de sub-periodos, los cuales le permiten planificar detalladamente solo para el período que será implementado.

A diferencia de los trabajos de Fleischmann & Meyr (1997) y Meyr (2000), Araujo et al. (2007), fija la duración de los sub periodos, en función del tiempo que toma procesar cierta carga de metal fundido, la que depende solo del tamaño de un horno de fundición. Esto permite la producción de cualquier tipo de producto en cada sub periodo, siempre y cuando estos estén fabricados con el mismo material.

En los trabajos antes mencionados, los autores centran su atención en el desarrollo de métodos de resolución para las diversas formulaciones del GLSP presentadas. Éste es un problema altamente complejo para el cual inclusive encontrar una solución factible es un problema NP completo (Fleischmann & Meyr, 1997).

Si bien la formulación matemática propuesta en ésta investigación, está fuertemente inspirada por el trabajo de los autores mencionados, el foco de éste trabajo, esta puesto en demostrar que la formulación propuesta, permite encontrar soluciones de mejor calidad que las usadas en la actualidad.

Ahora, antes de presentar la metodología propuesta, se ahonda en diversos aspectos del proceso de aserrado, lo que permitirá al lector comprender el contexto y las complejidades que enfrenta la aplicación de dicha metodología.

3 OPERACIÓN BÁSICA DE UN ASERRADERO.

La extracción del suministro de materia prima para un aserradero comienza en los bosques, donde los arboles son derribados en el proceso de cosecha (Harvesting).

Luego, los troncos, libres de sus ramas y raíces, pasan al proceso de tronzado (Bucking), donde cada tronco es dividido en trozas de diverso largo.

Dichas trozas constituyen la materia prima del proceso de aserrado, en el cual se ahonda a continuación.

El número de procesos realizados en un aserradero en particular, es variable y depende de muchos factores, como el nivel de tecnología y la habilidad de procesar trozas de diversos diámetros y la localización de los bosques, los centros de consumo, entre otros (Weintraub & Epstein, 2005), pero más allá de cualquier diferencia, la mayoría de los aserraderos comparten una estructura básica similar, dispuesta con la finalidad de transformar trozas en tablas.

Cuando las trozas llegan al patio de trozas, estas son clasificadas en diferentes clases, después, una vez programada la producción, las trozas son descortezadas, lo que ayuda a mantener el filo de la sierra y mejorar la calidad de los chips producidos con la madera de desecho (Todoroki & Rönnqvist, 1999).

Luego, estas pasan al proceso de aserrado primario, en el cual, las trozas son divididas en tablas de diversas dimensiones mediante el uso de ciertos patrones de corte⁴ (Kazemi et al., 2009).

Todoroki & Rönnqvist (1999) expone la existencia de diversos métodos de aserrado primario, pero cualquiera sea el método utilizado, los productos provenientes de éste, pasarán al proceso de recorte (Edging) y despunte (Trimming), donde se toman

⁴ Cada patrón de corte, es una combinación fija de cortes, la cual es ejecutada en una o más máquinas, para procesar una troza seleccionada.

las tablas semi-terminadas (Flitches) y se le recortan todos los bordes irregulares de las cuatro caras restantes.

Los productos resultantes del proceso primario, pueden clasificarse en dos tipos, los productos laterales, que son aquellos extraídos de la parte exterior de la troza y los productos centrales, provenientes del centro de la misma (Weintraub & Epstein, 2005).

Las tablas laterales, tienen mejor fibra, lo que resulta en una mejor apariencia y desempeño mecánico, por lo que son las más valiosas. Estas pueden ser vendidas tal como están o pueden ir a procesos de secado, cepillado y pulido. Además, algunas de ellas (las de más alta calidad), pueden ir a una planta de re-manufactura, para producir productos de mayor valor agregado, como partes para muebles o puertas.

Las piezas centrales pueden ser vendidas tal como están o pueden ir a un proceso de aserrado secundario donde estas son cortadas en tablas delgadas, las cuales nuevamente pueden ser vendidas tal como están o ser enviadas a los procesos de secado, cepillado y pulido. Por último, estas piezas pueden ser guardadas como inventario en proceso, para dar flexibilidad a la producción de productos terminados.

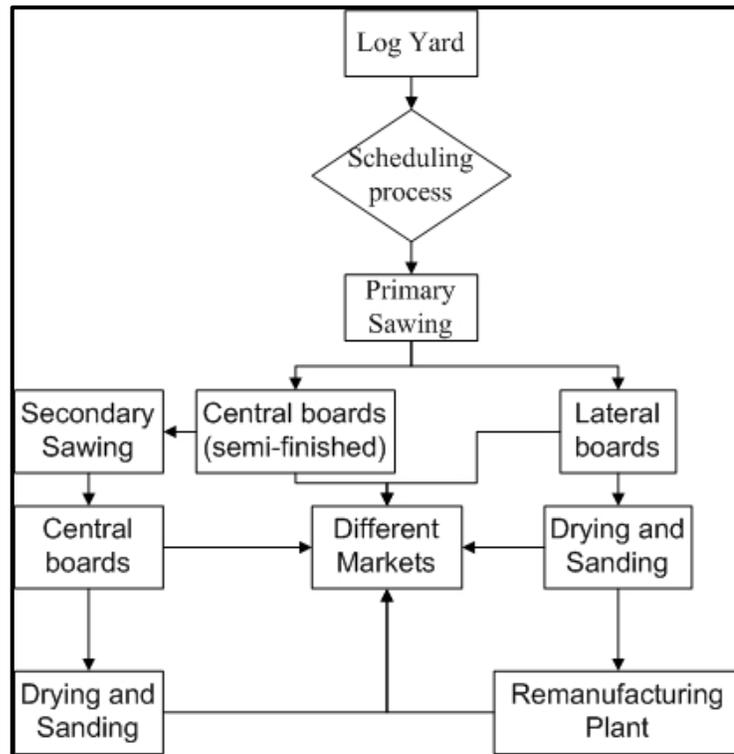


Figura 3.1: Etapas del proceso de aserrado.

La Figura 3.1 resume las etapas del proceso antes descrito, independientemente del comportamiento de la demanda, la que en la etapa de programación de la producción es en gran medida conocida, dado que una alta proporción de los productos centrales se producen contra pedido.

El escenario descrito plantea una serie de desafíos para la programación de la producción, entre los que se cuentan los siguientes:

En primer lugar, las características impredecibles del suministro de trozas, tanto en diámetros como en su calidad, dada por la presencia de curvaturas o defectos como nudos, dependen de muchos factores, como el lugar y las condiciones en las cuales creció el árbol del cual se extrajo la troza (Kazemi et al., 2009) y aunque es posible

seleccionar un rodal que privilegie la producción de trozas de cierta clase, éste tendrá también trozas de todo tipo, todas las cuales serán enviadas desde el bosque.

Lo anterior, además de inducir aleatoriedad en el rendimiento de conversión obtenido tras el proceso de corte, dificulta que la división encargada de la cosecha cumpla con los pedidos de trozas realizados por el programador, los cuales, en general, se cumplen en términos de volumen, pero generalmente no satisfacen los requerimientos del programador en cuanto a la proporción de cada tipo de producto.

Por otro lado, hay que considerar que los patrones de corte factibles a ser usados dependen, principalmente, del diámetro de la troza a ser procesada. Pero además, para cada clase diamétrica, existen diversos patrones factibles, como se aprecia en la Figura 3.2.

En general los aserraderos tratan de procesar cada troza solo mediante patrones de corte óptimos, por lo que la producción de los productos demandados, requiere contar con la troza óptima, de lo contrario, se utilizan trozas sub óptimas, práctica conocida como “downgrading”.

Es por esto que una de las principales preocupaciones de un programador es siempre tener cierto nivel de inventario de trozas, ya que mientras haya más inventario disponible, es más fácil encontrar la troza más adecuada para el patrón de corte utilizado para generar los productos que están siendo ordenados. Pero claramente, mientras más alto el nivel de inventario, más alto es el costo de operación de la instalación.

Ahora, la optimalidad de cierto patrón de corte depende del objetivo a ser optimizado. Generalmente se opta por maximizar el rendimiento volumétrico o de conversión de cada troza, tarea que puede ser realizada directamente por el encargado del aserradero, sin información del mercado, pero existe una tendencia creciente de la industria hacia la maximización del valor del set de productos obtenidos de cada troza.

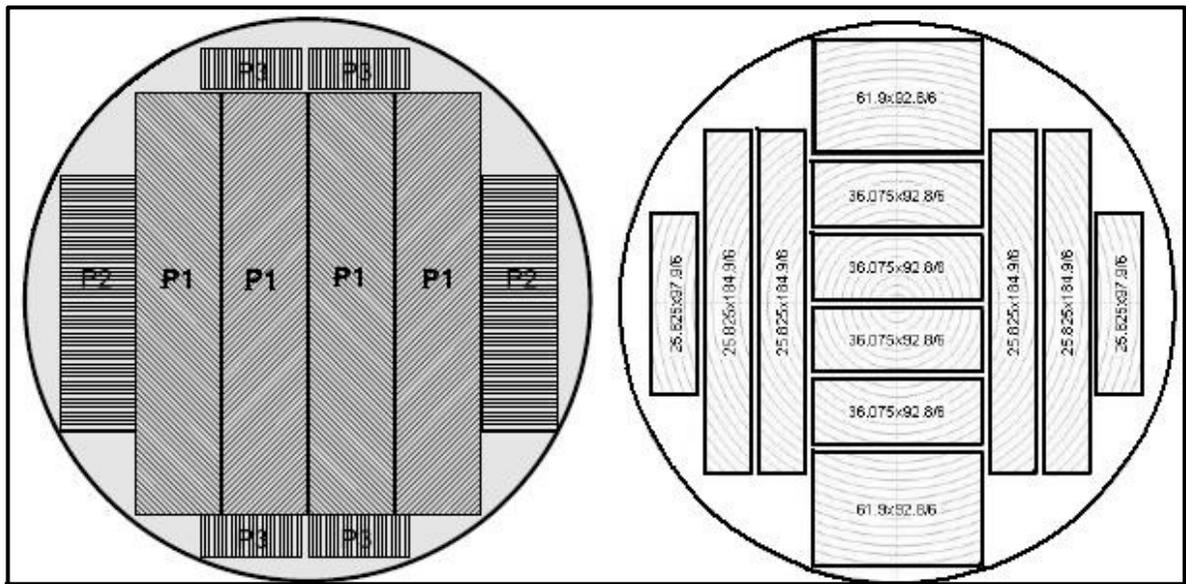


Figura 3.2: Ejemplos de patrones de corte alternativos para cierta troza.

Lo anterior, avalado por trabajos como los de Steele et al. (1993) y Todoroki & Rönnqvist (1997), que demuestran que la maximización del rendimiento volumétrico y la del valor, son objetivos en cierta medida contrapuestos, obteniéndose los mayores beneficios económicos al maximizar el valor del set de productos obtenidos.

Otro punto a considerar a la hora de programar, es que la producción de un producto en particular implica la producción de un set de PC asociados a la elección de troza y al patrón de corte utilizado para procesarla. El proceso puede generar productos que tienen una baja prioridad, posiblemente dada por una baja o nula demanda en el corto plazo.

Lo anterior, en líneas de producción altamente utilizadas, impacta directamente en la capacidad de la línea de aserrado.

Si a las dificultades anteriores, se agrega el problema de secuenciamiento, se está en presencia de un problema de naturaleza combinatorial, altamente complejo.

Además, es importante recordar que el aserradero, debe maximizar el nivel de servicio a sus clientes y simultáneamente, debe mantener un buen desempeño productivo en cada proceso, lo que es fundamental a la hora de programar.

Ahora, dada la complejidad del problema planteado cabe preguntarse lo siguiente:

¿Es factible la utilización de un modelo matemático para optimizar la programación de un aserradero como el descrito?

¿Es práctica la utilización de un modelo matemático en un problema altamente dinámico?

En adelante se intentará responder dichas preguntas, abordando una versión conceptualizada del problema descrito.

El modelo conceptual de un aserradero, se basa en los siguientes supuestos:

- Todos los procesos realizados tras el aserrado primario, son considerados como clientes internos de dicho proceso, sin hacer diferencia entre éstos y los clientes externos.
- El set de trozas disponibles pertenece a la misma clase diamétrica, por lo que la línea de aserrío no requiere “cambios de configuración” (set ups).
- Se considera, un solo patrón de corte factible para cada tipo de troza disponible, utilizando para ello el patrón que optimiza el rendimiento de conversión de dicha troza.

De lo anterior se desprende que, cada troza puede producir un solo set de productos, pero cada producto, puede ser obtenido del procesamiento de una o más tipos de troza.

Habiendo delimitado el campo de trabajo, se procede a presentar los métodos propuestos para solucionar el problema del programador.

4 ENFOQUES DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA.

Para enfrentar el problema propuesto, se proponen dos enfoques de solución.

En primer lugar, un modelo matemático capaz de calcular simultáneamente el tamaño de lote y la PP de un aserradero.

En segundo lugar, se propone una heurística para realizar la misma tarea que, basada en la metodología utilizada en la actualidad, entrega un punto de comparación para el modelo propuesto.

Antes de presentar cada método, se exponen los supuestos que ambos comparten:

- El cambio de configuración (Set Up) requerido para procesar materias primas diferentes no consume tiempo de proceso.
- El costo de cualquier cambio de configuración (Set Up) en la línea de aserrío es despreciable.
- Los tiempos de procesamiento de cada clase de troza son iguales.
- El monto total de materias primas procesadas es idéntico al monto total de productos obtenidos.
- El nivel de inventario de cada producto al comienzo del primer periodo es conocido y considerado igual a cero.

Tras los supuestos mencionados, se procede a presentar los métodos propuestos.

4.1 El modelo.

La formulación del modelo matemático, basado en la línea de investigación mencionada, utiliza los siguientes índices y datos.

Índices: $i = 1, \dots, M$ Materias primas.
 $p = 1, \dots, P$ Productos.
 $t = 1, \dots, T$ Periodos.

	$n = 1, \dots, N$	Sub-periodos.
Parámetros:	C_n	Capacidad disponible en la línea en el sub-periodo n .
	a	Tiempo requerido para producir una unidad de materia prima.
	d_{pt}	Demanda del producto p en el periodo t .
	R_{it}	Disponibilidad de materia prima tipo i en el periodo t .
	d_{pt}	Demanda por el producto p en el periodo t .
	Y_{ip}	Porcentaje del producto p obtenido tras procesar materia prima tipo i .
	I^C	Penalidad (o costo) de inventario por mantener una unidad del producto p en el periodo t .
	B^C	Penalidad (o costo) de retraso por retrasar la entrega de una unidad de producto p en el periodo t .
Variables:	x_{pn}	Cantidad del producto p a ser producida en sub-periodo n .
	I_{pt}	Inventario del producto p al final del periodo t , donde I_{p0} es el inventario inicial, al comienzo del periodo 1.
	b_{pt}	Retraso del producto p al final del periodo t , donde b_{p0} es el retraso inicial, al comienzo del periodo 1.
	m_{in}	Cantidad de materia prima i a procesar en el sub-periodo n
	y_{ipn}	Cantidad de producto p obtenido tras procesar toda la materia prima tipo i usada durante sub-periodo n .

De las variables definidas, solo se podría considerar entera a m_{it} , ya que por la naturaleza fraccionaria de los rendimientos productivos, al restringir a cantidades enteras las demás variables, se estaría introduciendo una restricción errada que dificultaría la obtención de soluciones factibles al problema. Además, los órdenes de magnitud de los montos procesados no justifican dicha restricción.

Adicionalmente, se utilizan las siguientes definiciones, las que provenientes del “General Lot-Sizing and Scheduling Problem” (GLSP), son usadas por Clark en sus trabajos de 2005 y 2007.

N_t Número de sub-periodos en el periodo t .

$F_t = 1 + \sum_{\tau=1}^{t-1} N_{\tau}$ Índice del primer sub-periodo en el periodo t . Con $F_1 = 1$.

$L_t = F_t + N_t - 1$ Índice del último sub-periodo en el periodo t . Con $L_1 = N_1$.

$N = \sum_{t=1}^T N_t$ Número total de sub-periodos sobre los periodos $1, \dots, T$.

En este caso, un periodo t corresponde a una semana de trabajo, y el número de sub-periodos en que se podrá dividir cada periodo será $N_t = 7$, días de trabajo.

A continuación se presenta el modelo matemático, inspirado en las investigaciones antes mencionadas.

$$\text{Mínimo } \sum_p^P \sum_{t=1}^T [I^C \cdot I_{pt} + B^C \cdot b_{pt}] + \sum_i^M \sum_{n=F_1}^{L_t} [I^C \cdot m_{in}] \quad (4.1)$$

$$\text{Sujeto a } Y_{ip} \cdot m_{in} = y_{ipn} \quad \forall i, p, n \quad (4.2)$$

$$\sum_i^M [y_{ipn}] = x_{pn} \quad \forall p, n \quad (4.3)$$

$$I_{p,t-1} - b_{p,t-1} + \sum_{n=F_t}^{L_t} x_{pn} - I_{p,t} + b_{p,t} = d_{pt} \quad \forall p, t \quad (4.4)$$

$$\sum_i^M a \cdot m_{in} \leq C_n \quad \forall n \quad (4.5)$$

$$\sum_{n=F_t}^{L_t} m_{in} \leq R_{it} \quad \forall i, t \quad (4.6)$$

$$x_{pn}, I_{pt}, b_{pt}, m_{in}, y_{ipn} \geq 0 \quad \forall i, p, n, t \quad (4.7)$$

La función objetivo (4.1) minimiza simultáneamente, la suma ponderada de los costos o penalidades por inventario y por retrasos en la entrega de productos, más la penalidad originada por el inventario de materias primas. El primer término, similar al de las funciones objetivos usadas por Clark en 2003, 2005 y 2007, permite asignar penalidades que representen en grado de indeseabilidad relativos entre el inventario y el retraso en el cumplimiento de pedidos. Adicionalmente, se agrega una penalidad similar al inventario de materias primas con el fin de inducir al modelo a escoger aquellas trozas de mejor rendimiento, para satisfacer la demanda manteniendo el mínimo nivel de inventario de estas.

La restricción (4.2) obliga a registrar cuantos productos tipo p son obtenidos como resultado de procesar una troza tipo i , en el sub-periodo n , de acuerdo con los rendimientos de conversión dados para cada tipo de troza por la matriz Y_{ip} .

La segunda restricción (4.3), fuerza a que la cantidad total de producto p producido en el sub-periodo n , sea igual a la suma de todas las cantidades de p producidas como resultado de procesar todas las trozas i que, programadas para ser procesadas en el sub-periodo n , generan producto tipo p .

En conjunto, (4.2) y (4.3) constituyen la principal modificación efectuada a los modelos en los cuales este trabajo se basa. De esta forma, es posible abordar la complementariedad de los sets de productos.

La restricción (4.4), también ha sido ampliamente utilizada en el pasado. Ésta, balancea los niveles de producción, inventario y retraso, con las demandas de los diversos productos para cada periodo. Adicionalmente, y considerando que tanto I_{pt} , como b_{pt} tienen valores estrictamente positivos en (4.1), esta restricción asegura que el nivel de inventario y de retraso para un producto no sean simultáneamente positivos en algún periodo (Clark, 2005). Además, cabe recordar que, tanto b_{p0} , como I_{p0} se consideran iguales a cero.

La restricción (4.5) asegura que el total de materia prima procesada en cada sub-periodo, no supere la capacidad productiva de la instalación.

Finalmente (4.6), impone un límite simple al monto total de materia prima utilizado en cada periodo. Esto permite reflejar de forma simplificada la disponibilidad de materia prima en el patio de trozas, la cual si bien puede ser mayor a sub-periodo de inventario es limitada.

Otro punto a destacar, es la ya mencionada eliminación de los costos y tiempos de cambio de configuración (setup), dado que para este problema son poco relevantes.

Ahora, para la aplicación de la estructura de niveles de tiempo a este problema, se adapta la técnica utilizada por Araujo et al. (2007), el cual divide en sub periodos solo el primer periodo de la planificación, lo que en la práctica se realiza definiendo $N_1 = 7$ y $N_t = 1 \quad \forall t = 2 \dots T$.

La idea detrás de esta técnica es el modelar procesos dinámicos, utilizando los periodos fijos, con intervalos discretos, que permitan reflejar la dinámica de los datos externos al proceso productivo (Fleischmann & Meyr, 1997), por ejemplo, la demanda estimada para cada semana.

Por otra parte, la lógica detrás de los sub periodos, es el poder modelar la dinámica de los datos internos de la instalación. Es por esto, que diversos autores, los han manipulado de formas diversas, por ejemplo Fleischmann and Meyr (1997) los utilizan como variables de decisión del problema, o como Araujo et al. (2007), que fija su duración en función del tiempo que toma procesar cierta carga de metal fundido, la que depende solo del tamaño de un horno de fundición.

Ante lo anterior, la lógica bajo la cual se define la estrategia de niveles de tiempo, es funcional al problema.

Por una parte, se definen periodos semanales, que permiten reflejar, la dinámica de la demanda y el suministro de trozas esperado por el aserradero para el HP de seis semanas.

Por otro lado, se definió arbitrariamente, que el primer periodo sería dividido en siete sub periodos de 24 horas de duración, lo que permite reflejar apropiadamente, los cambios internos de la instalación con datos reales, por ejemplo, del suministro de trozas disponible día a día.

Dada la estrategia de dos niveles de tiempo, el modelo utiliza información real, tanto de la demanda del periodo, como de la disponibilidad de trozas y otros parámetros internos, para cada sub periodo del primer periodo. En cambio, en los periodos restantes, se utiliza información estimada de acuerdo a la planificación operativa actualmente usada, la que, por su nivel de agregación, no justifica la división de los periodos posteriores en más de un solo sub periodo (esto es equivalente a aplicar sub periodos solo en el periodo 1).

Este esquema de aplicación del modelo, al ser implementado en un horizonte rodante con actualizaciones semanales, permite tener semana a semana un programa de producción que integra la realidad de la operación de aserradero con los planes y estimaciones realizadas por el departamento de planificación.

El sugerir que la actualización o rodado del horizonte se realice semanalmente, responde a dos motivos fundamentales.

En primer lugar, para permitir que se puedan integrar nuevas órdenes de producción al programa, con una anticipación de solo una semana. Esto flexibiliza el programa desde la segunda semana del horizonte, lo que permite incrementar la utilización de los recursos disponibles.

En segundo lugar, no se recomienda una actualización más frecuente, dado que el aserradero requiere un plan de producción estable en un horizonte mínimo, para mantener la eficiencia de sus operaciones. Esto porque, si a la variabilidad intrínseca de las trozas que ya dificulta los procesos, se le agrega variabilidad a los procesos que deben efectuar los operarios, la eficiencia de éstos y por ende la de las operaciones, podrían verse seriamente afectadas.

Otro punto a considerar es que, en la integración entre datos reales y estimados, siempre existirán diferencias entre los valores. Esta, en el corto plazo, no es más que el reflejo de la variabilidad natural del problema. Ahora, de existir diferencias sostenidas en el tiempo entre los valores reales y los estimados, se estaría demostrando una falla grave, ya sea al nivel de planificación del departamento de ventas o de la interacción

entre ambos, por lo que dicha diferencia debería ser monitoreada permanentemente y revisada.

La propuesta de valor fundamental de este trabajo es la utilización del modelo propuesto en el esquema descrito, o sea, ocupando los dos niveles de tiempo en el primer periodo y aplicando el mismo sobre un horizonte rodante de planificación. Esto es lo que permite generar un fuerte grado de integración entre la planificación y la PP, las que hasta ahora son procesos prácticamente aislados.

Las afirmaciones anteriores, suponen que el modelo propuesto es capaz de modelar efectivamente el problema y que las soluciones entregadas por éste son, además de factibles, mejores que las encontradas mediante los procedimientos heurísticos usados en la actualidad.

Lo anterior, junto a lo incipiente del modelo propuesto, motiva la ejecución de las diversas pruebas experimentales presentadas en los siguientes capítulos.

Si bien se comprobó el correcto funcionamiento del modelo completo, para la etapa de pruebas, el modelo será utilizado en un esquema de aplicación simplificado, esto es, en un horizonte fijo de seis semanas y sin la utilización de sub periodos, ya que esto no le resta validez en la descripción del proceso de aserrado. Además, la simplicidad es fundamental a la hora de analizar los resultados experimentales.

4.2 La heurística.

A continuación se presenta un método heurístico desarrollado en el marco de esta investigación, con el objetivo único, de presentar un punto de comparación funcional para el modelo, que refleje lo más eficientemente posible, las prácticas utilizadas hoy en día por los programadores de un aserradero.

Por tanto, basada en las prácticas usadas por los programadores, la lógica detrás de éste método es:

- Producir las órdenes con la fecha de entrega más cercana EDD (Earliest Due Date).

- Maximizar la utilización de la capacidad disponible, incluso produciendo pedidos por adelantado.
- Primero, programar la producción de un producto, entonces, escoger la troza con el mejor rendimiento de conversión para el producto elegido.

El pseudo código correspondiente a la lógica mencionada, considerando además las restricciones del problema, es mostrado usando una notación similar a la utilizada en el modelo. Además, se añaden algunos parámetros y variables auxiliares, las que son explicadas en el mismo código:

```

SET  $t = 1$  (Indicates the period for which is being planned)
SET all parameters and data ( $a, Y_{ip}, d_{pt}, C_t, R_{it}$ )
( $C_t$  Contains the capacity available on the machine
in each period  $t$ )

INITIALIZE  $x_{pt}, l_{pt}, b_{pt}, m_{it}$  (Matrixes as defined above)
SET  $t\_d_{pt} = d_{pt}$  (Temporary demand matrix)
SET  $t\_Y_{ip} = Y_{ip}$  (Temporary yield matrix)

WHILE  $t \leq T$  (Determines the production plan period to period)
  SET  $g\_c = 0$  (reset the gap counter for a new period)
  SET column  $t$  of  $t\_d_{pt} =$  column  $t$  of  $d_{pt}$  matrix
  SET  $t\_Y_{ip} = Y_{ip}$  matrix

  WHILE  $C_t >$  Minimum size of a production batch
    (While Plant Capacity at period  $t$  meets the
condition starts the scheduling routine)
    DETERMINE what product  $p$  has the largest batch of demand in
 $t\_d_{p,(t+g\_c)}$  matrix. Then SET Peak Demand and SET Chosen Product

    DETERMINE what raw material  $i$  maximizes the yield in
 $t\_Y_{i,Chosen\ product}$  column of matrix  $t\_Y_{i,p}$ . Then SET Best Yield and SET
Chosen Raw Material

    IF Peak Demand  $> 0$  Then
      IF  $R_{Chosen\ raw\ material,t} > 0$  Then
        DETERMINE the maximum feasible batch of raw material
to be processed ( $mB$ ) to produce the scheduled product

```

```

with its associated set of complementary products
considering all restrictions
ADD products to the  $x_{pt}$  matrix and subtract them to the
 $t\_d_{pt}$  matrix.

ADD the amount of raw material  $mB$  to the processing
schedule  $m_{it}$  and subtract them to the capacity  $C_t$  and
 $R_{Chosen\ raw\ material,t}$ 
ELSE
IF any of the elements of the row  $t\_Y_{i,Chosen\ product}$  is a
nonzero number THEN
    SET each element of  $t\_Y_{i,Chosen\ product} = 0$ 
ELSE
    BREAK
    (Terminates the execution of a WHILE loop.
    Statements in the loop that appear after the BREAK
    statement are not executed. Control passes to the
    statement that follows the end from the loop
    (ENDWHILE) in which the BREAK is used)
ENDIF
ENDIF
ELSE
IF  $(t + g\_c) < T$  THEN
    The demand data in  $t\_d_{p,(t+g\_c)}$  is moved temporally one
    period thus heuristic looks for more unsatisfied demand in
    the next period
    INCREMENT  $g\_c$ 
    (Keeps a record of the gap between the period for
    which is being planned and other periods in which
    the heuristic is looking for more unsatisfied
    demand)
ELSE
    BREAK
ENDIF
ENDIF
ENDWHILE
IF  $t < T$  THEN
    Save the Deviation between the demand in  $t\_d_{pt}$  and the program  $x_{pt}$  at
    period  $t$  and actualize  $t\_d_{pt}$  for the following period
ELSE
    Only save the Deviation between the demand in  $t\_d_{pt}$  and the program
     $x_{pt}$  at this period

```

```
    |   ENDIF  
    |   INCREMENT  $t$   
ENDWHILE  
SET  $I_{pt}$  = Elements minor than zero of the Deviation matrix, and puts all the others  
elements equal zero.  
SET  $b_{pt}$  = Elements greater than zero of the Deviation matrix, and puts all the others  
elements equal zero.  
DISPLAY( $x_{pt}, I_{pt}, b_{pt}, m_{it}$ )
```

5 DISEÑO EXPERIMENTAL.

5.1 Pruebas previas.

Antes de realizar los experimentos, se verificó el correcto funcionamiento de ambos métodos, para posteriormente determinar los valores finales adecuados para el costo de inventario I^C y para el costo de retraso en la entrega B^C .

Para verificar el correcto funcionamiento de cualquier método de PP, los resultados entregados por éste, deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Deben mostrar que no transgreden las restricciones de diseño del sistema analizado. (Capacidad de producción, Disponibilidad de trozas, Complementariedad de productos, Balance de inventario)
- El método debe programar la producción de productos en periodos en los que a pesar de no existir demanda por dicho producto, se arrastra un retraso en la entrega de productos previamente demandados.
- También debe poder programar la producción de productos en periodos sin demanda por dicho producto, cuando se tiene información de una demanda que en un periodo futuro supera la capacidad productiva de la planta (producción contra inventario).
- En caso de existir de forma simultánea, retraso en la entrega de alguna línea de productos y la necesidad de producir otra línea de productos por su alta demanda futura, el método debe poder programar la producción utilizando un criterio de elección previamente establecido.

Con la finalidad de comprobar que, tanto del modelo, como de la heurística, corrieran apropiadamente, se utilizan valores arbitrarios de $\{I^C: B^C\}$ iguales a $\{1: 10^3\}$, lo que se hace, siguiendo lo sugerido por Clark (2005), imponiendo $I^C \ll B^C$, para desincentivar los retrasos. Con estos valores transitorios, se implementó un escenario extremo, con una solución óptima fácilmente verificable, el cual se presenta en el Anexo A.

El resultado obtenido, presente en dicho anexo, muestra que tanto el modelo como la heurística encuentran la mejor solución a esta instancia, sin cometer errores algebraicos ni violar alguna de las restricciones del escenario mencionado.

Para determinar los valores finales de I^C y B^C , se realizaron dos series de pruebas para distintos escenarios, uno en que solo existe la posibilidad de producir contra ordenes efectuadas en el primer periodo, o escenario extremo, y un segundo escenario en que se deja abierta la posibilidad de producir de manera adelantada o no, denominado escenario abierto.

Bajo estos escenarios, se probó el modelo para valores de $\{I^C:B^C\}$ del orden de $\{1:1\}$, $\{1:10\}$, $\{1:10^2\}$, $\{1:10^3\}$, $\{1:10^4\}$, $\{1:10^5\}$, $\{1:10^6\}$, y $\{1:10^7\}$, todo lo cual se encuentra detallado en el Anexo B. El resultado de estas, muestra al variar la relación entre estos parámetros, las soluciones del problema también varían, observándose que, para valores de $\{I^C:B^C\}$ iguales a $\{1:10^5\}$, se obtienen programas de producción que minimizan el “error total de la programación”⁵ tanto como es factible, maximizando así la satisfacción de la demanda bajo las condiciones dadas, por lo que $\{1:10^5\}$ es la relación entre I^C y B^C que se utiliza en todas las pruebas experimentales.

La sugerencia de Clark, de imponer $I^C \ll B^C$, en vez de prohibir los retrasos, es en extremo importante ya que de eliminarse esta opción, el modelo no encontrará soluciones factibles para escenarios en que la demanda supere la capacidad productiva.

5.2 Análisis del escenario ideal.

Se analizó la problemática considerando la siguiente pregunta: ¿Qué escenario podría ser considerado ideal? Ya que, si se conocen las condiciones ideales, es posible aislar el efecto que ejercen diversas perturbaciones, en el desempeño de ambos métodos, lo que permitiría establecer un caso base para las pruebas experimentales.

⁵ Este error, es definido como la suma entre el inventario total y el retraso total en la entrega de órdenes, para todo el horizonte de planificación.

Para responder y ante la poca flexibilidad del procesamiento de materias primas que producen sets de PC, hemos analizando aisladamente la problemática inherente a este tipo de procesos. Esto quiere decir, sin considerar otro tipo de restricciones.

Se sabe que el monto obtenido de cada producto x_{pt} depende de, el rendimiento volumétrico Y_{ip} obtenido tras procesar los diversos tipos materias primas tipo i , con $i = 1 \dots M$, y de la cantidad m_{it} procesada de cada una de estas, en un periodo t , lo que equivale a la siguiente expresión:

$$x_{pt} = Y_{1,p}m_{1t} + Y_{2,p}m_{2t} + \dots + Y_{M,p}m_{Mt} \quad \forall p \quad (5.1)$$

Ahora, es interesante determinar cuál será el rendimiento volumétrico del producto p , obtenido por toda una instalación que procesa diversos tipos de materias primas durante algún periodo de tiempo determinado. Este rendimiento del producto p , en la instalación, o rendimiento medio del producto p en la instalación \bar{Y}_p , es el porcentaje de producto p obtenido tras procesar todo el set de productos $\sum_{\forall i} m_{it}$, por lo que la cantidad de producto p escrita en (5.1) puede reescribirse como sigue:

$$x_{pt} = \bar{Y}_p \cdot \sum_{\forall i} m_{it} \quad (5.2)$$

Por lo tanto, el rendimiento medio del producto p en la instalación \bar{Y}_p es:

$$\bar{Y}_p = Y_{1,p} \left(\frac{m_{1t}}{\sum_{\forall i} m_{it}} \right) + Y_{2,p} \left(\frac{m_{2t}}{\sum_{\forall i} m_{it}} \right) + \dots + Y_{M,p} \left(\frac{m_{Mt}}{\sum_{\forall i} m_{it}} \right) \quad \forall p = 1 \dots P \quad (5.3)$$

Ante esto se cree que el escenario ideal para este tipo de problemas se produce cuando la cantidad de productos obtenidos x_{pt} , tras procesar de la mejor forma posible un set de materias primas $\sum_{\forall i} m_{it}$ disponibles en la planta durante algún periodo t , calza con la demanda ideal d_{pt}^i , de cada producto p , lo que equivale a la siguiente expresión:

$$d_{pt}^i = \bar{Y}_p \cdot \sum_{\forall i} m_{it} \quad (5.4)$$

Además, dado que se supone que $\sum_{\forall i} m_{it} = \sum_{\forall p} d_{pt}$, se puede decir que \bar{Y}_p corresponde a la distribución de la demanda de los productos con respecto a la demanda total, en el escenario ideal, o dicho de otra manera, \bar{Y}_p corresponde al porcentaje que

representa d_{pt}^i respecto al set completo de productos demandados $\sum_{\forall p} d_{pt}^i$ en el escenario ideal, en un periodo t cualquiera.

$$\bar{Y}_p = \%d_{pt}^i = \frac{d_{pt}^i}{\sum_{\forall p} d_{pt}^i} \quad (5.5)$$

Si bien esta condición “ideal” está lejos de cumplirse en la realidad diaria, es de esperarse que, en el largo plazo, la demanda por los diversos productos producidos a partir trozas disponibles, se equilibre con la producción resultante de éstas, dado que cualquier exceso de inventario se regulará vía precio.

Finalmente, y a fin de simplificar el análisis experimental, se realizaron los siguientes supuestos arbitrarios.

Primero, se supone que el monto disponible de cada materia prima es igual, o sea $m_{1t} = m_{2t} = \dots = m_{Mt}$, por lo que el rendimiento medio del producto p en la instalación \bar{Y}_p , para cada producto p , se reduce a:

$$\bar{Y}_p = \frac{Y_{1,p} + Y_{2,p} + \dots + Y_{M,p}}{M} \quad \forall p = 1 \dots P \quad (5.6)$$

Además, se supone que se procesan materias primas hasta utilizar el 100% de la capacidad de la instalación durante cada periodo, o sea $\sum_{\forall i} m_{it} = C_t$, con lo que la demanda ideal de cada producto p , resulta igual a:

$$d_{pt}^i = \bar{Y}_p \cdot C_t \quad (5.7)$$

5.3 El escenario ideal forestal.

Para describir el escenario mencionado, se han usado datos provenientes de un problema real, utilizados previamente por Carrasco (2003), del que se extraen:

El conjunto de materias primas, el conjunto de productos y la matriz que muestra la tasa de conversión que relaciona dichas materias primas con los productos terminados.

Tabla 5.1: Tasas de conversión extraídas de Carrasco (2003).

Rendimiento volumétrico Y_{ip}	Lumber 1	Lumber 2	Lumber 3	Lumber 4	Lumber 5	Lumber 6	Lumber 7
Log 1	0,235	0,067	0	0,469	0,229	0	0
Log 2	0,346	0,03	0	0,377	0,247	0	0
Log 3	0,1	0	0,15	0,25	0,09	0,4	0,01
Log 4	0,1	0	0,15	0,25	0,09	0,4	0,01
Log 5	0,509	0	0	0	0,275	0	0,216
Log 6	0,46	0,011	0	0,154	0,367	0	0,008

Asimismo, se extraen la capacidad productiva semanal y el tiempo requerido para procesar una unidad [m^3] de materia prima.

Tabla 5.2: Parámetros de productividad extraídos de Carrasco (2003).

Capacidad productiva C_t	2100 m^3 /Semana	168 h /Semana
Tiempo de proceso a	0.08 h/m^3	

Al aplicar el análisis y los supuestos correspondientes al caso ideal, al escenario forestal representado por los datos recién mencionados, se obtienen valores, tanto para \bar{Y}_p , como para d_{pt}^l , los que se aprecian en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Valores ideales para el escenario forestal.

	Lumber 1	Lumber 2	Lumber 3	Lumber 4	Lumber 5	Lumber 6	Lumber 7
Log 1	0,235	0,067	0	0,469	0,229	0	0
Log 2	0,346	0,03	0	0,377	0,247	0	0
Log 3	0,1	0	0,15	0,25	0,09	0,4	0,01
Log 4	0,1	0	0,15	0,25	0,09	0,4	0,01
Log 5	0,509	0	0	0	0,275	0	0,216
Log 6	0,46	0,011	0	0,154	0,367	0	0,008
Rendimiento promedio de cada producto p \bar{Y}_p obtenido del proceso de un set de trozas	0,29	0,02	0,05	0,25	0,22	0,13	0,04
Demanda esperada d_{pt}^i bajo condiciones ideales (en m^3)	612,5	37,8	105,0	525,0	454,3	280,0	85,4

Los valores obtenidos para \bar{Y}_p , representan la distribución natural en que pueden obtenerse los productos dado el suministro de trozas y las restricciones tecnológicas de la instalación, distribución que para el escenario ideal, debe coincidir con la distribución de la demanda $\%d_{pt}^i$, con respecto a la demanda agregada ($\sum_{vp} \%d_{pt}^i = 100\%$).

El análisis de los valores de Y_{ip} , junto a los de \bar{Y}_p calculados, permiten clasificar los productos en dos grupos, dependiendo del rendimiento volumétrico promedio con que es obtenido cada uno, los productos de “alto rendimiento”, en adelante llamados productos Hi, y los de “bajo rendimiento”, llamados productos Lo.

Con la definición anterior, se pueden clasificar los productos como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Clasificación de productos de acuerdo a su rendimiento de conversión.

	Lumber 1	Lumber 2	Lumber 3	Lumber 4	Lumber 5	Lumber 6	Lumber 7
Rendimiento promedio de cada producto \bar{Y}_p	0,29	0,02	0,05	0,25	0,22	0,13	0,04
Tipo de producto	Hi	Lo	Lo	Hi	Hi	Hi	Lo

Finalmente y recordando que el horizonte de planificación definido para este problema es de 6 periodos de una semana, el set de demandas que representa el escenario ideal para este horizonte es el siguiente:

Tabla 5.5: Escenario ideal utilizado como caso base.

$d_{pt}^i \backslash \text{Period } t$	1	2	3	4	5	6	$\sum_{vn} d_{pt}^i$
Lumber 1	612,5	612,5	612,5	612,5	612,5	612,5	3675
Lumber 2	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	226,8
Lumber 3	105	105	105	105	105	105	630
Lumber 4	525	525	525	525	525	525	3150
Lumber 5	454,3	454,3	454,3	454,3	454,3	454,3	2725,8
Lumber 6	280	280	280	280	280	280	1680
Lumber 7	85,4	85,4	85,4	85,4	85,4	85,4	512,4
$\sum_{vp} d_{pt}^i = C_t$	2100	2100	2100	2100	2100	2100	12600

Tras esto, procedemos a definir las posibles perturbaciones que se aplicarán sobre el caso ideal, además de las métricas con que se mide éste nivel para cada instancia.

5.4 Perturbaciones aplicadas al escenario ideal.

5.4.1 Disponibilidad de materia prima:

En primer lugar, analizamos el efecto que tiene la disponibilidad de materia prima sobre el desempeño de ambos métodos, dado que este tipo de perturbación es inherente al problema planteado. Para esto, se restringió gradualmente la disponibilidad de trozas R_{it} para diversas instancias.

5.4.2 Distribución de la demanda en el set de productos:

Si bien el supuesto respecto a la distribución de la demanda, sobre el cual construimos el caso ideal es razonable, claramente no se cumple en el corto plazo, por lo que es sensato estudiar el efecto que generan sets de demanda distribuidos de manera distinta a la ideal d_{pt}^i , para lo que hemos definido un indicador del nivel de desviación.

Primero, calculamos el grado de alejamiento entre las demandas de cada producto d_{pt} para algún set de demanda dado, con respecto a cada demanda d_{pt}^i del set de demanda ideal. Esta desviación de la demanda de cada producto respecto a la demanda ideal es $|d_{pt}^i - d_{pt}|$.

Además, se calcula para cada producto p , el porcentaje que dicha desviación representa con respecto a su demanda ideal, llamándolo, porcentaje de desviación del producto p (PDP).

$$PDP = \frac{|d_{pt}^i - d_{pt}|}{d_{pt}^i} \quad (5.8)$$

Para reflejar en un indicador único para cada instancia, el efecto de la distribución de la demanda en todo un set de productos distinto al ideal, se propone utilizar el promedio de cada PDP ponderado por la demanda ideal d_{pt}^i correspondiente a cada p , llamándolo, desviación promedio de la demanda (DPD), como se muestra a continuación:

$$DPD = \frac{\sum_{p=1}^P \left[\left(\frac{|d_{pt}^i - d_{pt}|}{d_{pt}^i} \right) d_{pt}^i \right]}{\sum_{p=1}^P d_{pt}^i} = \frac{\sum_{p=1}^P |d_{pt}^i - d_{pt}|}{\sum_{p=1}^P d_{pt}^i} \quad (5.9)$$

Lo que reescribimos:

$$DPD = \frac{\text{Desviación absoluta del set } d_{pt} \forall p}{\sum_{p=1}^P d_{pt}^i} \quad (5.10)$$

Evidentemente, para el caso ideal, $DPD = 0$.

5.4.3 Distribución inter-temporal de la demanda:

En el escenario ideal, como lo muestra la Tabla 5.5, la distribución de la demanda es uniforme durante el horizonte de tiempo, pero claramente este es un escenario altamente improbable, más aún, considerando que muchos de los productos demandados son enviados al cliente vía marítima, con las consiguientes restricciones de volumen y de frecuencia de los envíos.

Es por esto, que estudiamos el efecto que generan diversos sets con demandas concentradas en algún periodo. Para esto hemos definido un indicador del nivel de concentración de la demanda K , para cada instancia, como se muestra a continuación:

$$K = \sum_{\forall p} k_p, \quad k_p \begin{cases} 0 & \text{si demanda es distribuida} \\ 1 & \text{si demanda es concentrada} \end{cases} \quad (5.11)$$

El indicador mencionado, depende del indicador binario k_p , el cual es cero, si la demanda agregada del producto p , está distribuida uniformemente en el horizonte de planificación, y es igual a uno, si ésta está concentrada en uno de los periodos de planificación. Ante esto, es claro que en el escenario ideal $K = 0$ y en el caso extremo en que la demanda de cada uno de los P productos esté concentrada en algún periodo cualquiera, $K = P$.

5.4.4 Demanda excesiva:

Cuando una unidad productiva es incapaz de satisfacer la demanda a tiempo, es natural atribuir el problema a la falta de capacidad productiva. Es por esto, que analizamos el efecto de una sobredemanda “pura” y lo contrastamos con los efectos de las perturbaciones antes listadas.

El nivel de sobredemanda se expresa como porcentaje de la demanda agregada ideal $\sum_{\forall t} d_{pt}^i$.

Finalmente, la Tabla 5.6 muestra detalladamente cada uno de los datos que definen y restringen la instancia correspondiente al caso ideal.

Tabla 5.6: Descripción del caso ideal.

Número de instancia	1		
Capacidad C_t para periodo t (en horas)	168	Equivalente a (m^3 por periodo)	2100
Tiempo de proceso a (en horas por m^3)	0,08		
R_{it} de cada troza tipo i en t	100%	Respecto a C_t	
Demanda Agregada	100%	Respecto a $\sum_{\forall t} C_t$	
Demanda para cada periodo d_{pt}	100%	Respecto a d_{pt}^i la demanda ideal	
Distribución relativa de la demanda entre productos	Siguiendo el rendimiento medio de cada producto \bar{Y}_p		
Desviación promedio de la demanda entre productos (DPD) respecto a la demanda ideal	0%		
Concentración de la demanda K	0		
Distribución temporal de la demanda para cada producto k_p	$[k_{Lumber\ 1}, \dots, k_{Lumber\ 7}] = [0,0,0,0,0,0,0]$		

En adelante, cada una de las instancias utilizadas en las pruebas experimentales, es expuesta especificando solo la información que diferencia dicha instancia, de la instancia ideal aquí presentada.

6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los experimentos mostrados a continuación, permiten comparar el desempeño de los métodos de programación antes expuestos.

En primer lugar, el modelo matemático fue implementado en el lenguaje AMPL y resuelto mediante el solver CPLEX 11.0.0 instalado en un servidor con dos procesadores AMD Opteron(tm) Processor 254, con 8GB de memoria RAM que funciona con el sistema operativo Red Hat Enterprise Linux ES release 4.

El tamaño pequeño de los set de datos utilizados ($T = 6$ periodos, $P = 7$ Productos y $M = 6$ materias primas) y la no utilización de sub-periodos, producen problemas de 330 variables, 36 enteras ($T \times M$) y 294 lineales.

Además, la única variable entera considerada en la modelación, m_{it} fue relajada, por lo que los tiempos de resolución obtenidos para las instancias expuestas a continuación, son del orden de 1 segundo, por lo que estos no son reportados.

Por otra parte, la heurística fue implementada en MATLAB 7.0.1 y corrida en un equipo con procesador Intel® Cuore™ 2 Duo de 1,42 Ghz y 2 GB de memoria RAM, que funciona con el sistema operativo Windows Vista™ Home Clasic. Los tiempos de ejecución obtenidos para todas las instancias, son del orden de 0,1 segundos, por lo que tampoco se mencionan en adelante.

6.1 El caso ideal

La instancia correspondiente al caso ideal, expuesta en la Tabla 5.6, fue resuelta mediante ambos métodos. Los resultados obtenidos mediante el uso del modelo matemático, son presentados en las siguientes tablas.

Tabla 6.3: Inventario programado por el modelo propuesto

Inventory	Product\Period	1	2	3	4	5	6	
	Lumber_1	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_2	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_3	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_4	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_5	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_6	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_7	0	0	0	0	0	0	Total
	Totals	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6.4: Retraso en entregas programado por el modelo propuesto.

Backlog	Product\Period	1	2	3	4	5	6	
	Lumber_1	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_2	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_3	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_4	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_5	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_6	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_7	0	0	0	0	0	0	Total
	Totals	0	0	0	0	0	0	0

La programación obtenida mediante el uso de la heurística propuesta, es presentada en las siguientes tablas.

Tabla 6.7: Inventario programado por la heurística propuesta.

Inventory	Product\Period	1	2	3	4	5	6	
	Lumber_1	211	0	88	0	64	0	
	Lumber_2	22	74	37	90	53	116	
	Lumber_3	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_4	0	189	0	183	0	148	
	Lumber_5	82	3	0	0	0	0	
	Lumber_6	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_7	175	97	284	206	443	363	Total
	Totals	489	364	409	480	559	627	2928

Tabla 6.8: Retraso en entregas programado por la heurística propuesta.

Backlog	Product\Period	1	2	3	4	5	6	
	Lumber_1	0	11	0	130	0	135	
	Lumber_2	0	0	0	0	0	0	
	Lumber_3	105	96	70	65	74	90	
	Lumber_4	104	0	117	0	182	0	
	Lumber_5	0	0	36	111	106	162	
	Lumber_6	280	257	187	174	197	240	
	Lumber_7	0	0	0	0	0	0	Total
	Totals	489	364	409	480	559	627	2928

Los resultados antes expuestos, se resumen en términos de los siguientes indicadores de desempeño.

El primer indicador, en adelante llamado N_{Trozas} , muestra cuantos tipos de trozas, en promedio, son programadas para ser procesadas cada periodo.

El retraso final, en adelante llamado b_{Final} , es el monto de pedidos que no han podido ser satisfechos por el programa al final del último periodo. Análogamente, el inventario final, llamado I_{Final} , es el inventario no deseado al final del último periodo.

La satisfacción de la demanda, en adelante llamada d_{satisf} , muestra que porcentaje de la demanda total ha sido satisfecha al final de horizonte de planificación, por lo que no refleja si los pedidos fueron o no satisfechos a tiempo.

El inventario no deseado respecto a C_t , en adelante llamado I_{ND} , refleja el porcentaje de la capacidad que ha sido utilizado en inventario no deseado.

El total de órdenes retrasadas, en adelante llamado b_{Total} , es el monto total de retrasos programados para todos los productos durante todo el horizonte de planificación.

El inventario total, en adelante llamado I_{Total} , es el monto total de inventario de productos terminados programados durante todo el horizonte de planificación.

Finalmente, el error total de la programación, definido anteriormente como la suma del retraso y el inventario totales, es un indicador que resume el desempeño global de cada método y en adelante es llamado $Error_{Tot}$.

Con éstos indicadores, los resultados de la programación realizada por cada método, para la instancia ideal, se resumen en la Tabla 6.9, cuyo formato se utiliza para exponer los resultados de cada una de las instancias probadas.

Tabla 6.9: Indicadores del resultado obtenido para el caso ideal.

Escenario	Ideal	
Instancia	1	
Método	Modelo	Heurística
N_{Trozas}	5	2
b_{Final}	0	627
I_{Final}	0	627
d_{satisf}	100%	95%
I_{ND}	0%	5%
b_{Total}	0	2928
I_{Total}	0	2928
$Error_{Tot}$	0	5857

6.2 Disponibilidad de materia prima.

Para apreciar el efecto que tiene el suministro de trozas sobre el desempeño de ambos métodos, se procesaron cuatro instancias, en las que utilizando el set de demandas ideal, presentado en la Tabla 5.3, se restringió gradualmente la disponibilidad de trozas respecto a la capacidad productiva total, imponiendo $R_{it} = 50\%$ en la instancia 2, $R_{it} = 25\%$ en la instancia 3, $R_{it} = 16,6\%$ en la instancia 4 y $R_{it} = 10\%$ en la instancia 5.

Con los resultados obtenidos para cada una de estas instancias, se obtienen los indicadores de desempeño mostrados en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Indicadores de desempeño de los métodos frente a restricción en la disponibilidad de materias primas.

Perturbación	Disponibilidad de materias primas							
	2		3		4		5	
Escenario	$R_{it} = 50\%$		$R_{it} = 25\%$		$R_{it} = 16,7\%$		$R_{it} = 10\%$	
Método	M	H	M	H	M	H	M	H
N_{Trozas}	5	2,5	6	4,5	6	6	6	6
b_{Final}	0	539	0	247	0	0	5040	5040
I_{Final}	0	539	0	247	0	0	0	0
d_{satisf}	100%	95,7%	100%	98%	100%	100%	60%	60%
I_{ND}	0%	4,3%	0%	2%	0%	0%	0%	0%
b_{Total}	0	2445	0	1127	0	0	17639	17640
I_{Total}	0	2445	0	1127	0	0	0	0
$Error_{Tot}$	0	4891	0	2254	0	0	17639	17640

La cuarta instancia, en la que $R_{it} = 16.67\%$ de C_t , representa el mínimo nivel de R_{it} de cada materia troza tipo i , necesario para producir durante todo un periodo, sin quiebres en el inventario de materias primas.

Estos indicadores muestran que el modelo matemático es capaz de encontrar el programa de producción óptimo ante cualquier nivel de R_{it} igual o mayor que el mínimo necesario para producir cierto set de demandas.

Por otra parte, la heurística tiende a cometer errores de programación de mayor magnitud cuanto más holgada es la disponibilidad de materias primas, pero cuanto más se restringe el suministro de éstas, la heurística encuentra soluciones más cercanas al óptimo, encontrándolo cuando el suministro se restringe hasta el mínimo nivel necesario para producir el set de demandas ideal, lo que corresponde a la cuarta instancia.

6.3 Distribución de la demanda en el set de productos.

Como ya se mencionó, es poco realista considerar que la distribución de las demandas de corto plazo de los diferentes productos coincide con la distribución del set de demandas ideal.

Ante esto, se analiza el comportamiento de ambos métodos en diversos escenarios alejados de la distribución ideal de la demanda, para lo cual se definieron instancias con distinto grado de alejamiento en la distribución, cuya demanda agregada es igual a la demanda agregada ideal.

A continuación se presentan los escenarios propuestos y las instancias asociadas a éstos:

En primer lugar, se analiza el desempeño de los métodos, frente a cambios de igual magnitud porcentual, en el patrón de consumo de los productos Hi y Lo, los que al suponer que satisfacen a mercados distintos, podrían cambiar su patrón de demanda de forma independiente en el corto plazo, produciendo distintos niveles de DPD con respecto al set ideal.

- En la instancia 6, se aumenta la demanda de productos Lo en 10% con respecto a la demanda ideal, lo que es compensado imponiendo una caída en la demanda de productos Hi. Este cambio impuesto al patrón de consumo, equivale a una DPD de un 2,7%.

- En la instancia 7, se aumenta la demanda de productos Hi en 10% con respecto a la demanda ideal, lo que es compensado imponiendo una caída en la demanda de productos Lo. Este cambio impuesto al patrón de consumo, equivale a una *DPD* de un 17,5%.

El objetivo de este primer escenario, es cuantificar el impacto, en términos del desempeño productivo, de un crecimiento de igual magnitud en la demanda de productos de cada tipo, dado por el mercado.

Luego, para comparar el efecto absoluto de cambios en los patrones de consumo de ambos tipos de productos, se imponen aumentos de demanda de cada tipo de producto, en montos suficientes como para lograr una *DPD* de 8,6% en ambas instancias.

- En la instancia 8, se aumenta la demanda de productos Lo en 38% con respecto a la demanda ideal, lo que es compensado imponiendo una caída en la demanda de productos Hi.
- En la instancia 9, se aumenta la demanda de productos Hi en 5% con respecto a la demanda ideal, lo que es compensado imponiendo una caída en la demanda de productos Lo.

Finalmente, se analiza el desempeño de los métodos, frente a cambios extremos en el patrón de consumo de uno de los productos de cada tipo, dado que si la demanda de alguno de los productos se concentra en algunos clientes, ésta podría estar sujeta a fluctuaciones de mercado distintas a las que están sujetas el resto de los productos producidos en la instalación.

La elección de los productos a los cuales aumentar su demanda, se realiza arbitrariamente, buscando extremar el cambio de patrones antes mencionado. Para esto se elige el producto Lo de menor demanda y para la elección del producto Hi se escoge el producto con mayor demanda.

Para definir la magnitud del aumento en la demanda en las instancias mencionadas, se determinó la máxima producción que podría obtenerse de cada producto al utilizar todos los recursos disponibles en la instalación, para producir dicho

producto. Esto es equivalente a utilizar toda la capacidad disponible para procesar la troza que tenga el mayor rendimiento de producción, para el producto dado, lo que se puede resumir como:

$$Max_{Lumber_p} = C_t \cdot \max\{Y_{ip}\} \quad \forall i = 1..M, \forall p \quad (6.1)$$

Es claro que solo se podrá maximizar la producción de un solo producto en cada periodo, sin superar la capacidad de la instalación.

- En la instancia 10, se impone un aumento de un 370% en la demanda del producto Lo “Troza 2”, con respecto su demanda ideal, lo que es compensado imponiendo una caída en la demanda de los demás productos del set. Este aumento corresponde al límite máximo de producción de éste producto, de $140 m^3$ por periodo.
- En la instancia 11 se impone un aumento de un 174% en la demanda del producto Hi “Troza 1”, con respecto a su demanda ideal, lo que es compensado imponiendo una caída en la demanda de los demás productos del set. Este aumento, corresponde al límite máximo de producción de éste producto, de $1068 m^3$ por periodo.

Con los resultados obtenidos para cada una de estas instancias, se obtienen los indicadores de desempeño mostrados en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11: Indicadores de los resultados obtenidos para instancias con diversa distribución relativa de la demanda entre productos.

Perturbación	Distribución relativa de la demanda entre productos											
	6		7		8		9		10		11	
Instancia	Lo + 10%		Hi + 10 %		Lo + 38%		Hi + 5%		Max $p = 2$ (Lo)		Max $p = 1$ (Hi)	
Escenario	Lo + 10%		Hi + 10 %		Lo + 38%		Hi + 5%		Max $p = 2$ (Lo)		Max $p = 1$ (Hi)	
Método	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
N_{Trozas}	4	2	4	1,5	4	2	4	2	4	1,7	4	1
b_{Final}	79	526	523	1534	299	591	249	965	524	983	1729	3370
I_{Final}	79	526	523	1534	299	591	249	965	524	983	1729	3367
d_{satisf}	99,4%	95,8%	95,8%	87,8%	97,6%	95,3%	98,0%	92,3%	95,8%	92,2%	86,3%	73,3%
I_{ND}	0,6%	4,2%	4,2%	12,2%	2,4%	4,7%	2,0%	7,7%	4,2%	7,8%	13,7%	26,7%
b_{Total}	278	2566	1830	5721	1044	2482	870	4104	1834	3507	6051	11602
I_{Total}	278	2566	1828	5721	1046	2482	870	4104	1834	3507	6052	11582
$Error_{Tot}$	556	5132	3658	11443	2090	4963	1740	8208	3668	7013	12103	23184

6.4 Distribución inter-temporal de la demanda:

Para analizar el efecto que tiene la distribución de la demanda en el tiempo sobre las soluciones entregadas por cada método, particularmente, para estudiar el efecto de la concentración de la demanda en algún periodo, se crearon instancias con distintos niveles de concentración de la demanda.

Primero, con el objetivo de mostrar cómo cambia el efecto que produce la concentración de la demanda al cambiar el periodo en que ésta se concentra, se analizan instancias con la demanda totalmente concentrada ($K = 7$), en diferentes periodos.

- En la instancia 12, se impone un set de demanda, en que se concentra la demanda ideal de cada producto, en el primer periodo.
- En la instancia 13, se impone un set de demanda, en que se concentra la demanda ideal de cada producto, en el último periodo.
- En la instancia 14, se impone un set de demanda, en que se concentra la demanda ideal de cada producto, en un periodo intermedio del horizonte de planificación, específicamente, en el cuarto periodo.

Dado que al concentrar la demanda en los periodos extremos del horizonte de planificación se fuerza a los métodos a programar preferentemente retrasos o inventarios, la instancia 14 es denominada “abierta”, porque admite un amplio rango de soluciones posibles dejando abierta la posibilidad de producir de manera adelantada o de programar la entrega retrasada de órdenes.

Utilizando la lógica de la instancia 14, se analiza el efecto de concentrar la demanda de cada tipo de producto en el cuarto periodo, caso que podría darse, por ejemplo, para cumplir con alguna fecha de embarque de los productos.

- En la instancia 15, se impone un set de demanda en que se concentra la demanda de productos H_i , en el cuarto periodo.
- En la instancia 16, se impone un set de demanda en que se concentra la demanda ideal de productos L_o , en el cuarto periodo.

Con los resultados obtenidos para cada una de estas instancias, se obtienen los indicadores de desempeño mostrados en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Indicadores de los resultados obtenidos para instancias con diversa distribución inter-temporal de la demanda.

Perturbación	Distribución inter-temporal de la demanda									
Instancia	12		13		14		15		16	
Escenario	K = 7 en Periodo 1		K = 7 en Periodo 6		K = 7 en Periodo 4		K = 4 de Hi en Periodo 4		K = 3 de Lo en Periodo 4	
Método	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
N_{Trozas}	1	1	1	1	1	1	3,7	2	3,3	2
b_{Final}	0	491	0	491	0	491	0	817	0	627
I_{Final}	0	491	0	491	0	491	0	817	0	627
d_{satisf}	100%	96,1%	100%	96,1%	100%	96,1%	100%	93,5%	100%	95%
I_{ND}	0%	3,9%	0%	3,9%	0%	3,9%	0%	6,5%	0%	5%
b_{Total}	31499	32571	0	491	6302	7316	5615	7664	684	2972
I_{Total}	0	1071	31505	31991	12599	13616	11230	13279	1371	3657
$Error_{Tot}$	31499	33642	31505	32483	18901	20933	16845	20943	2055	6629

6.5 Demanda excesiva:

Para analizar el efecto de una sobre venta de productos o de una caída inesperada de la capacidad productiva, se impondrá un “exceso de demanda”.

Para ello se incrementa la demanda de cada producto en cada periodo en un 20%, con respecto a sus valores ideales.

Para presentar el resultado obtenido tras esta instancia, se agregan dos mediciones relevantes. En primer lugar, se presenta el retraso producido de forma directa por el exceso de demanda, en adelante llamado $b_{Por\ Exceso}$, el cual, al ser sustraído del b_{Total} , permite determinar el retraso en las entregas inducido por la naturaleza del problema, llamado retraso inherente al problema o alternativamente $b_{Inherente}$, presentados en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13: Indicadores del resultado obtenido para la dieciseisava instancia.

Escenario	$d_{pt}^i + 20\% \forall p, t$	
	Modelo	Heurística
N_{Trozas}	2,8	1,3
b_{Final}	2513	3194
I_{Final}	0	679,5
d_{satisf}	83%	79%
I_{ND}	0%	5%
b_{Total}	8797	10886
I_{Total}	0	2087
$Error_{Tot}$	8797	12972
$b_{Por\ Exceso}$	2514	2514
$b_{Inherente}$	6283	8372

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante recordar que el objetivo final tras el planteamiento de las instancias antes expuestas, es responder las preguntas respecto a la factibilidad y la practicidad de uso del modelo propuesto, para su aplicación de campo.

Responder aquellas preguntas requiere, en primer término, mostrar que el modelo es capaz de describir la complejidad del problema que enfrenta el programador, encontrando soluciones factibles para cualquier escenario posible.

En segundo lugar, se debe probar que el desempeño de un aserradero se podría ver beneficiado tras la implementación de la metodología propuesta.

Para lograr lo anterior, se realiza un exhaustivo análisis del desempeño de ambos métodos, frente a las instancias antes expuestas.

Dichas instancias, tienen como objetivo secundario, permitir el análisis de la incidencia de los diversos parámetros sobre el desempeño de un aserradero.

7.1 Análisis de las instancias.

A fin de poder comparar el desempeño de ambos métodos en instancias con diverso nivel de perturbación en su set de demanda, se determinó el nivel de perturbación (NDP), de cada una de éstas, respecto a la instancia ideal.

El NDP se determina sumando la desviación de la demanda, en m^3 , de cada producto en cada periodo, de la siguiente manera:

$$NDP = \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T |d_{pt}^i - d_{pt}| \quad (7.1)$$

El desempeño de los métodos, antes reportado, es expresado en términos del error total de programación ($Error_{Tot}$), para los distintos NDP , con lo que se calcula el error unitario ($Error_{Unit}$) cometido por cada método, como el error total cometido, por cada metro cúbico de demanda perturbada.

Por último, se compara la magnitud del error cometido por la heurística con respecto al error cometido por el modelo.

7.1.1 Disponibilidad de materias primas.

Es claro que al modificar la disponibilidad de materias primas, no se altera el set de demanda ideal. Es por esto, que no se aplican los parámetros antes definidos.

Como ya se mencionó, el modelo matemático es capaz de encontrar el programa de producción óptimo ante cualquier nivel de R_{it} igual o mayor que el mínimo necesario para producir cierto set de demandas, mientras que la heurística, comete errores de mayor magnitud cuanto más holgada es la disponibilidad de materias primas, encontrando soluciones más cercanas al óptimo cuando se restringe el suministro de éstas.

Esto último es lógico, ya que la heurística se asegura de encontrar soluciones factibles, utilizando al máximo la capacidad productiva disponible, por lo que si el suministro de trozas se restringe al mínimo necesario para producir el set de demandas ideal, la heurística asignará toda la capacidad disponible para la producción del suministro mencionado, el que evidentemente, producirá el set de demandas requerido para las instancias probadas.

También para la quinta instancia, ambos métodos encuentran la misma solución, ya que la heurística, tratando de utilizar toda la capacidad disponible, programa la producción de todo el set de trozas disponibles. Pero esta última instancia, presenta un resultado que, a ojos de un programador, es trivial y además, bastante alejado de la realidad chilena, ya que los aserraderos en Chile generalmente cuentan con varias semanas de inventario de trozas, para asegurar un suministro continuo de estas.

7.1.2 Distribución de la demanda en el set de productos.

Los parámetros de medición del desempeño para cada *NDP* impuesto a través de las diversas modificaciones a la distribución relativa de la demanda entre productos, se exponen en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Parámetros de medición del desempeño de cada método para instancias con diversa distribución relativa de la demanda entre productos.

Escenario	Lo + 10%	Hi + 10%	Lo + 38%	Hi + 5%	Max $p = 2$	Max $p = 1$
Instancia	6	7	8	9	10	11
<i>NDP</i>	335	2210	1087	1088	1226	5466
$Error_{Tot}$ del modelo	556	3658	2090	1740	3668	12103
$Error_{Tot}$ de la Heurística	5132	11443	4963	8208	7013	23184
$Error_{Unit}$ del Modelo	1,66	1,66	1,92	1,60	2,99	2,21
$Error_{Unit}$ de la Heurística	15,32	5,18	4,57	7,54	5,72	4,24
$n = \frac{Error_{Tot} Heur}{Error_{Tot} Mod}$	9,2	3,1	2,4	4,7	1,9	1,9

De las instancias 6 y 7, se aprecia que para igual variación porcentual en el nivel de la demanda de cada tipo de producto, las soluciones de ambos métodos tienen un $Error_{Tot}$ más alto ante un incremento en los productos Hi.

Sin embargo, el efecto que cada m^3 perturbado, tiene sobre las soluciones entregadas por el modelo, reflejado en el $Error_{Unit}$ cometido por éste, es igual en ambos casos, por lo que la diferencia entre los errores totales de programación, son proporcionales a la cantidad de m^3 de perturbación impuesta en cada caso. En el caso de la heurística, el efecto que cada m^3 perturbado es mayor, ante aumentos en la demanda de productos Lo, produciendo un $Error_{Unit}$ aproximadamente 3 veces superior que ante un aumento porcentual de igual magnitud en la demanda de productos Hi.

Más allá de lo anterior, el modelo comete errores muy inferiores a los cometidos por la heurística en ambos casos. Específicamente, en la sexta instancia, el error cometido por la heurística es 9,2 veces superior al error del modelo, lo que disminuye a 3,1 veces para la séptima instancia.

De las instancias 8 y 9, se aprecia que para aumentos de la demanda de cada tipo de producto, de igual magnitud, medida en m^3 , el modelo comete un mayor $Error_{Tot}$ de programación ante un incremento en la demanda de productos Lo. Por el contrario, la heurística yerra más, al aumentar la demanda de productos Hi.

A pesar de lo anterior, el modelo comete un $Error_{Unit}$ mayor, ante aumentos de la demanda de productos Lo, lo que se aprecia en la Tabla 7.1 para la instancia 8. Por el contrario, el $Error_{Unit}$ cometido por la heurística, muestra que ésta, además de cometer un mayor $Error_{Tot}$ en la instancia 9, tiene un peor desempeño relativo para un incremento en la demanda de productos Hi.

Más allá de lo anterior, las soluciones encontradas por el modelo cometen errores muy inferiores a los cometidos por la heurística en ambos casos. Específicamente, en la octava instancia, el error cometido por la heurística es 2,4 veces superior al error del modelo, lo que aumenta a 4,7 veces para la instancia 9.

De las instancias 10 y 11, se aprecia que para aumentos en la demanda producidos por una demanda extrema de algún producto Lo o Hi, ambos métodos cometen un mayor $Error_{Tot}$ de programación, al maximizar la producción del producto Hi.

Sin embargo, el efecto que tiene cada m^3 perturbado de ésta manera sobre las soluciones entregadas por el modelo, es mayor ante aumentos de la demanda de productos Lo, lo que se aprecia en el mayor $Error_{Unit}$ cometido por este, mostrado en la Tabla 7.1, para la instancia 10. De forma similar, el $Error_{Unit}$ cometido por la heurística en la instancia 10, muestra que ésta también tiene un peor desempeño relativo, para un incremento en la demanda de productos Lo.

Más allá de lo anterior, las soluciones encontradas por el modelo, cometen errores inferiores a los cometidos por la heurística, siendo esta diferencia de igual magnitud para ambos casos.

7.1.3 Distribución inter-temporal de la demanda.

De los resultados expuestos para las diversas instancias en que se perturba la distribución inter-temporal de la demanda, mediante la concentración de ésta, se extraen los parámetros de medición del desempeño expuestos en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Parámetros de medición del desempeño de cada método, para instancias con diversa distribución inter-temporal de la demanda.

Escenario	K = 7 p = 1	K = 7 p = 6	K = 7 p = 4	K = 4, Hi t = 4	K = 3, Lo t = 4
Instancia	12	13	14	15	16
<i>NDP</i>	21000	21000	21000	18718	2282
<i>Error_{Tot}</i> del modelo	31499	31505	18901	16845	2055
<i>Error_{Tot}</i> de la Heurística	33642	32483	20933	20943	6629
<i>Error_{Unit}</i> del Modelo	1,5	1,5	0,9	0,9	0,9
<i>Error_{Unit}</i> de la Heurística	1,6	1,5	1,0	1,1	2,9
$n = \frac{Error_{Tot} Heur}{Error_{Tot} Mod}$	1,1	1,0	1,1	1,2	3,2

En las instancias antes expuestas, se aprecian altos *NDP*, ya que al concentrar toda la demanda de cada producto, se perturba gran parte del set de demanda ideal.

Las instancias 12 y 13, presentan casos extremos de concentración, en los cuales ambos métodos cometen un *Error_{Tot}* de magnitud similar, para cada instancia.

Específicamente, la comparar las soluciones encontradas por cada método para las instancias mencionadas, el modelo encuentra la mejor solución, al concentrar la demanda en el primer periodo. Por el contrario, la heurística se comporta mejor, al concentrar la demanda en el último periodo, lo que no impide que el modelo encuentre una mejor solución para ésta instancia.

Si bien, las soluciones encontradas por el modelo tienen un mejor desempeño que las encontradas por la heurística para ambos casos, la diferencia en el desempeño de ambos métodos es muy pequeña.

Por otra parte, al concentrar la demanda en un periodo intermedio del horizonte, como en la instancia 14, ambos métodos mejoran notoriamente su desempeño, tanto en términos de su *Error_{Tot}*, como de su *Error_{Unit}*, con un desempeño del modelo, levemente superior al de la heurística.

En las instancias 15 y 16, se concentran solo las demandas de productos Hi y Lo, respectivamente.

Para éstas instancias, ambos métodos incurren en un mayor $Error_{Tot}$ de programación, al concentrar la demanda de productos Hi.

Sin embargo, el efecto que cada m^3 perturbado tiene sobre las soluciones entregadas por cada método, para las diversas instancias, es distinto.

El modelo matemático entrega soluciones que, a pesar de tener distintos niveles de $Error_{Tot}$, se ven igualmente afectadas por cada m^3 perturbado en el cuarto periodo, obteniéndose un $Error_{Unit}$ de $0,9m^3$ para las instancias 14, 15 y 16, por lo que la diferencia entre los errores totales de programación son proporcionales al NDP impuesto en cada caso.

En el caso de la heurística, si bien el $Error_{Tot}$ de programación es mayor al concentrar la demanda de productos Hi, ésta se ve mayormente afectada, por la concentración de cada m^3 de producto Lo, produciendo un $Error_{Unit}$ aproximadamente 2,6 veces superior, que ante la concentración de la demanda de productos Hi.

7.1.4 Demanda excesiva.

En la Tabla 7.3, se exponen los parámetros de medición del desempeño de los métodos para la programación bajo el escenario perturbado con un 20% de sobredemanda.

Cabe destacar que una parte importante del $Error_{Tot}$ cometido por ambos métodos, está dado por retrasos inherentes al exceso de demanda impuesto, equivalente a $2514 m^3$, para la instancia 17, por lo que sustraer éste retraso del $Error_{Tot}$ de programación, permite aislar el $Error_{Tot}$ cometido por cada método para problemas de esta naturaleza, lo cual se resume en los indicadores mostrados en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3: Parámetros de medición del desempeño de los métodos, para instancia perturbada con demanda excesiva.

Escenario	20% de sobre-demanda	20% de sobre-demanda
Instancia	17	17 Corregida
<i>NDP</i>	2514	2514
$Error_{Tot}$ del modelo	8797	6283
$Error_{Tot}$ de la Heurística	12972	10458
$Error_{Unit}$ del Modelo	3,50	2,50
$Error_{Unit}$ de la Heurística	5,16	4,16
$n = \frac{Error_{Tot} Heur}{Error_{Tot} Mod}$	1,5	1,7

En la tabla anterior se aprecia que la solución encontrada por el modelo incurre en un menor $Error_{Tot}$ que la heurística. Además, el $Error_{Unit}$ inducido por cada m^3 sobre-demanda, es también menor en la solución entregada por el modelo, por lo que se puede afirmar que para perturbaciones por demanda excesiva el modelo matemático entrega soluciones de desempeño superior a las entregadas por la heurística.

7.2 Análisis de las perturbaciones.

7.2.1 Disponibilidad de materias primas.

Tras el análisis de las instancias, es claro que el desempeño del modelo matemático, es superior para todas las instancias relevantes, ya que los casos en que los desempeños de ambos métodos se igualan, las soluciones son triviales.

7.2.2 Distribución de la demanda en el set de productos.

Tras el análisis del desempeño de ambos métodos, para las diversas perturbaciones en la distribución relativa de la demanda entre productos, se aprecia que el desempeño del modelo matemático es muy superior al desempeño de la heurística, en todos los parámetros

medidos y para todos los casos, obteniendo un $Error_{Tot}$ promedio de un 25,8% de la magnitud del $Error_{Tot}$ promedio obtenido por la heurística.

Además, se aprecia que la diferencia en el desempeño de ambos métodos varía, en gran medida, por la inconsistencia mostrada por la heurística en los valores del $Error_{Unit}$ que ésta comete, bajo los diversos escenarios planteados. En estos, exceptuando la instancia 8, el $Error_{Unit}$ aumenta, para perturbaciones en la demanda de productos Lo.

Por otra parte, el modelo, además de tener un mejor desempeño, tiene un comportamiento consistente, para cada tipo de perturbación, encontrando soluciones de igual $Error_{Unit}$, para igual nivel porcentual de perturbación en cada tipo de producto y errores unitarios mayores, para perturbaciones de productos Lo, especialmente en la instancia 10, cuando se maximiza la demanda del producto Lo.

7.2.3 Distribución inter-temporal de la demanda.

Los efectos de los diversos NDP en la distribución inter-temporal de la demanda analizados, muestran que, aunque el desempeño general de la heurística es cercano al del modelo en 4 de las 5 instancias analizadas, éste último, además de entregar mejores soluciones, tiene un comportamiento consistente para cada tipo de perturbación, lo que permite predecir de mejor forma el comportamiento de las soluciones ante nuevos escenarios.

Por ejemplo, el comportamiento del modelo para los diversos grados de concentración de la demanda en el cuarto periodo, presentados en las instancias 14, 15 y 16, muestra que el desempeño de éste, en términos del $Error_{Tot}$, solo depende de la magnitud en m^3 , del NDP impuesto para este periodo, ya que el $Error_{Unit}$ de cada instancia es igual.

Por otra parte, es claro que el desempeño mostrado por ambos métodos, tanto en términos del $Error_{Tot}$, como del $Error_{Unit}$, para las instancias 12, 13 y 14, depende mayoritariamente del periodo en que se concentra la demanda, más que del NDP impuesto sobre otros factores, como la concentración de alguno de los tipos de productos.

7.2.4 Demanda excesiva.

Los indicadores expuestos en la Tabla 7.3, donde se presentan indicadores de error corregidos, permiten apreciar no solo que al producirse sobre-demanda, se inducen errores de mayor magnitud que la magnitud de ésta, sino que además permiten apreciar la magnitud de éste error. Por ejemplo, para el caso del modelo, se obtiene un $Error_{Unit}$ de $2,5 m^3$ de $Error_{Tot}$ inducido, por cada m^3 de exceso de demanda, monto que es adicional a la sobredemanda impuesta en la instancia aludida.

7.3 Análisis general del desempeño de ambos métodos.

Se analiza individualmente, el comportamiento de cada método, utilizando para esto, los valores promedio del $Error_{Unit}$ obtenido por cada uno, para cada tipo de perturbación, los cuales se exponen en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4: Promedio de los indicadores de desempeño de los métodos para cada tipo de perturbación.

Tipo de perturbación	Distribución relativa de la demanda entre productos	Distribución inter-temporal de la demanda	Demanda excesiva
$Error_{Unit}$ promedio del Modelo	2,1	1,2	3,5
$Error_{Unit}$ promedio de la Heurística	5,3	1,4	5,2
$n = \frac{Error_{Heur}}{Error_{Mod}}$	2,5	1,2	1,5

7.3.1 La heurística.

La Tabla 7.1, muestra claramente que, el peor desempeño de la heurística en términos del $Error_{Unit}$, se presenta por amplio margen en la instancia 6, en la que se perturba la distribución relativa aumentando la demanda de productos Lo.

A pesar de lo anterior y ante los resultados mostrados en la misma tabla, en términos del $Error_{Unit}$, para las instancias 8 y 9, no es posible afirmar que el comportamiento general de la heurística, frente a perturbaciones en la demanda de productos Lo, es consistente.

Más allá de lo anterior, la tabla 7.4 permite afirmar que, en general, la heurística se comporta peor frente a perturbaciones en la distribución relativa de la demanda entre productos, que frente a otro tipo de perturbaciones.

7.3.2 El modelo.

Por otra parte, el modelo propuesto, a diferencia de la heurística, presenta un comportamiento consistente, en términos del $Error_{Unit}$, frente a perturbaciones que varíen en igual proporción la demanda de cada tipo de producto, ya sea aumentándola o concentrándola, por lo que, para iguales NDP , medidos en m^3 , de cada tipo de producto, el desempeño del modelo se ve más afectado por perturbaciones en la demanda de productos Lo, lo que es lógico, considerando representan un porcentaje menor en el set de productos ideal.

Además, el modelo propuesto, frente al peor caso de perturbación inter-temporal de la demanda, comete un $Error_{Unit}$ menor, que en la mayor parte de los casos de perturbación en la distribución relativa de la demanda entre productos.

7.4 Análisis final.

Dada la naturaleza de los experimentos presentados y tras los resultados obtenidos y analizados, es claro que las preguntas que buscan determinar la factibilidad y la practicidad de uso del modelo propuesto, no pueden ser respondidas de manera estadísticamente concluyente.

Sin embargo, el establecimiento de un caso ideal, junto a un conjunto de posibles perturbaciones de éste, presenta una base razonable para generar un abanico de escenarios posibles que permitan afirmar, en primer lugar, que la heurística propuesta, es capaz de reflejar de manera consistente el proceso de PP de un aserradero, para las instancias

probadas. Lo anterior asegura un punto de comparación adecuado para el desempeño del modelo bajo los diversos escenarios.

Por otra parte, tras los resultados obtenidos por el modelo matemático, se puede afirmar que éste es capaz de encontrar soluciones de desempeño superior, en todas las instancias probadas.

Además, el modelo encuentra soluciones en tiempos de ejecución del orden de 1 segundo, tiempo diez veces superior al requerido por la heurística. A pesar de lo anterior, la magnitud del tiempo requerido por el modelo es pequeña.

Por último, se ha expuesto la incidencia de los diversos parámetros sobre el desempeño de un aserradero, de los cuales se destaca, la influencia de la distribución de la demanda en el set de productos.

Dicha perturbación, relacionada íntimamente a la restricción de PC, afecta con mucha mayor fuerza a la heurística que al modelo matemático, lo que se aprecia claramente en la Tabla 7.4.

8 CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados expuestos y considerando el desempeño superior del modelo propuesto para todas las instancias analizadas, se presentan conclusiones desde diversas perspectivas.

8.1 La metodología de análisis y los métodos propuestos a la luz de las prácticas utilizadas en la actualidad.

La metodología propuesta para el análisis del escenario ideal, permite encontrar dicho set de producción, cualquiera sea el inventario de trozas disponibles en algún aserradero dado. Esto permite encontrar, el set de productos ideal que al ser producido, maximiza el desempeño productivo de cualquier instalación.

El método heurístico propuesto representa los lineamientos generales bajo los cuales programa su producción una empresa forestal chilena, la que adicionalmente a éste método, utiliza las siguientes reglas en sus prácticas productivas:

- La no aceptación de ordenes de producción de productos Laterales, los que son producidos contra inventario, por lo que no restringen mayormente la programación de trozas, y.
- La programación de “ordenes virtuales” de productos Centrales, cuando no existen pedidos confirmados de este tipo de productos.

Suponiendo que los productos Lo y Hi representan a los productos Laterales y Centrales, respectivamente, la primera de estas prácticas es validada, ya que, la heurística muestra su peor desempeño en términos del $Error_{Unit}$, frente a perturbaciones en la distribución relativa de la demanda, producidas por aumentos en la demanda de productos Lo.

La segunda práctica, sería también acertada, siempre y cuando las ordenes virtuales programadas permitan disminuir la DPD (desviación promedio de la demanda), con

respecto al set de demandas ideal, resultante del suministro de trozas disponibles en ese momento.

Por otra parte, el modelo propuesto, a diferencia de la heurística, presenta un comportamiento consistente, en términos del $Error_{Unit}$, frente a perturbaciones que varíen en igual proporción, la demanda de cada tipo de producto, ya sea aumentándola o concentrándola, por lo que, para iguales NDP , medidos en m^3 , de cada tipo de producto, el desempeño del modelo se ve más afectado por perturbaciones en la demanda de productos. Lo, lo que es lógico, ya que representan un porcentaje menor en el set de productos ideal.

Además, el modelo propuesto, frente al peor caso de perturbación inter-temporal de la demanda, comete un $Error_{Unit}$ de menor magnitud, que frente a cualquiera de los casos de perturbación en la distribución relativa de la demanda entre productos, lo que permite concluir que para igual NDP , el efecto sobre las soluciones al problema de esta última perturbación es mayor.

Por último, para perturbaciones por demanda excesiva, se puede afirmar que:

- El modelo matemático entrega soluciones de desempeño superior a las entregadas por la heurística.
- Este tipo de perturbación, al igual que las demás mencionadas, induce errores de programación de mayor magnitud, que la magnitud del NDP .

8.2 Desempeño Gral. Del Modelo v/s Heurística.

El modelo propuesto, supera el desempeño del método heurístico, en gran parte de los escenarios posibles. Solo bajo escenarios altamente restringidos y con soluciones triviales, ambos métodos logran igual desempeño.

El método heurístico, jamás supera el desempeño del modelo propuesto.

8.3 Implicancias.

Tras los resultados obtenidos y analizados, se puede dar respuesta a algunas de las interrogantes planteadas durante esta investigación.

Los resultados obtenidos por el método heurístico, para los diversos escenarios, permiten afirmar que la heurística propuesta es capaz de reflejar de manera consistente el proceso de toma de decisiones de programación llevado a cabo en un aserradero.

Lo anterior valida el uso de la heurística como punto de comparación para el modelo planteado.

Este último, además de obtener resultados superiores para todas las instancias probadas, muestra resultados consistentes frente a los diversos *NDP* de cada tipo, sin violar alguna de las restricciones impuestas, lo que permite concluir que el modelo es capaz de describir la complejidad del problema planteado, en cada una de las instancias probadas.

Además, el poco tiempo requerido por el modelo para calcular un programa de producción, permite concluir que la aplicación de la metodología propuesta es altamente factible.

Habiendo mencionado las implicancias detrás de las pruebas realizadas en este estudio, cabe mencionar algunas implicancias detrás de algunos resultados específicos obtenidos por cada método, que muestran la relación entre los parámetros del problema y el desempeño de los métodos frente a diversos valores de éstos.

En primer lugar, el nivel de servicio de las compañías que programan su producción mediante métodos heurísticos como el aquí utilizado, puede verse más afectado, por perturbaciones en la distribución relativa de la demanda de productos, que por una demanda excesiva de igual magnitud.

Asimismo, implementar el modelo propuesto para programar la producción de un aserradero, disminuiría el efecto de todas las posibles perturbaciones mencionadas, en especial, disminuiría el efecto de distribuciones de la demanda de productos distintas a la distribución natural de productos obtenida tras procesar las trozas disponibles.

Esto último podría generar una importante mejoría, tanto en el nivel de servicio, como en la utilización de la capacidad disponible de dicho aserradero.

Por tanto, el modelo puede ser utilizado en todo tipo de escenario, entre los cuales, destaca su desempeño por sobre la heurística, para escenarios con una distribución relativa de la demanda de productos, distinta a la distribución naturalmente obtenida tras procesar las trozas disponibles.

8.4 Posibles aplicaciones.

Tanto el modelo propuesto, como la metodología de análisis utilizada, además de programar la producción, podrían ser utilizados en otras etapas del proceso, como por ejemplo:

- Para evaluar la aceptación de órdenes de producción.
 - La comparación de escenarios antes-después, permitiría evaluar el impacto que la orden tendría en cada uno de los parámetros y variables del modelo.
- Para análisis y gestión de la capacidad productiva.
 - De ocurrir una disminución de capacidad ante algún imprevisto, la metodología de escenario ideal, junto a la aplicación del modelo, permitirían determinar qué ordenes son más convenientes de externalizar y cuales producir con la capacidad restante.
- Para la planificación táctica y operativa.
 - A través de una correcta administración de los datos para diversos horizontes de planificación.

El modelo podría utilizarse de igual manera, en procesos productivos de cualquier ámbito, que cumplan lo siguiente:

- Proceso productivo con las características del Job Shop Problem. (Meyr, 2000)
- Que del procesamiento de las materias primas involucradas se obtengan ciertos set de productos, poco flexibles

8.5 Trabajo futuro.

Manteniendo el modelo matemático sin modificaciones, sería interesante:

- Analizar el efecto de tener “la troza adecuada”, en el “momento adecuado”

- Profundizar el análisis del comportamiento de las soluciones para variaciones en la demanda de productos Centrales, versus variaciones en la demanda de productos Laterales.

Además, resulta necesario realizar nuevas pruebas, para comparar el desempeño real del programador de un aserradero, versus el desempeño del modelo implementado para el mismo set de datos, pero bajo el esquema de horizonte rodante de planificación de 6 semanas, y de revisión diaria.

Una posible extensión del modelo, consiste en considerar los rendimientos asociados a los diversos patrones de corte disponible, lo que permitiría al modelo elegir el patrón de corte con que debe procesarse cierto tipo de producto. Esto, resulta plausible, ya que el tamaño del problema crece de manera proporcional al número de patrones de corte con que se implemente.

De incluirse en el modelo, la elección de patrones de corte para cada troza, también podría incluirse el uso de tiempos de procesamiento diferenciados para cada tipo de troza y patrón de corte elegidos, lo que permitiría considerar la verdadera utilización de la capacidad programada.

Otra posible extensión al modelo, tras la inclusión de patrones de corte alternativos para cada troza, debiese ser la inclusión de información de precios de los productos que le permitan determinar el patrón de corte óptimo para maximizar el valor de los productos producidos.

8.6 Conclusiones finales.

Una de las tareas más complejas y de mayor impacto en las operaciones de un aserradero, es la programación de la producción (PP).

Los escasos desarrollos que enfrentan directamente este problema, han planteado soluciones derivadas de modelos de planificación, siempre dependientes de estimaciones, tanto de la demanda, como del suministro de trozas, por lo que la responsabilidad final de la tarea de programación recae en programadores altamente experimentados, que mediante el uso de heurísticas, compensan los errores cometidos en la etapa de planificación.

En esta investigación, se propone realizar dicha tarea mediante un modelo matemático. Este modelo es probado en diversos escenarios, obteniendo un desempeño superior a la heurística en todos ellos, entregando además, resultados plenamente consistentes para los diversos escenarios.

El éxito obtenido por el modelo, permite afirmar que su aplicación al problema de PP es factible y que constituye un primer paso en dirección hacia una metodología que permita a los aserraderos alcanzar su objetivo último, que es el maximizar la rentabilidad de toda su operación (ROI), lo que más allá de maximizar el valor del mix de productos obtenidos, permitirá también maximizar el aprovechamiento de sus instalaciones.

Lo anterior, requiere la utilización del modelo, ocupando los dos niveles de tiempo en el primer periodo y aplicando el mismo, sobre un horizonte rodante de planificación. Esto es lo que permite generar un fuerte grado de integración entre la planificación y la PP, las que hasta ahora son procesos prácticamente aislados y constante fuente de ineficiencia operativa.

Otro paso en dicha dirección, sería el desarrollo de las extensiones al modelo antes mencionadas, como la inclusión de patrones de corte alternativos para cada troza y la inclusión de la información necesaria para determinar el patrón de corte óptimo, que maximice el valor de los productos producidos.

BIBLIOGRAFIA

Anuario Forestal (2008). Recuperado el 07 de agosto de 2009, de http://www.infor.cl/estadisticas_mercado/sistema_estadisticas_sectoriales_digital.htm

Araujo, S., Arenales, M., & Clark, A. (2007). Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. *Journal of Heuristics*, 13(4), 337-358.

Carlsson, D., & Rönnqvist, M. (2005). Supply chain management in forestry—case studies at södra cell AB. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 589-616.

Carnieri, C., & Mendoza, G. A. (2000). A fractional algorithm for optimal cutting of lumber into dimension parts. *Annals of Operations Research*, 95(1), 83-92.

Carrasco, I. C. (2003). *Optimización de una cadena de abastecimiento forestal-industrial*. Tesis de Magister no publicada, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Church, R. (2007). Tactical-level forest management models. *Handbook of operations research in natural resources*, 99(3), 343-363.

Clark, A. R. (2003). Hybrid heuristics for planning lot setups and sizes. *Computers & Industrial Engineering*, 45(4), 545-562.

Clark, A. R. (2005). Rolling horizon heuristics for production planning and set-up scheduling with backlogs and error-prone demand forecasts. *Production Planning and Control*, 16, 81-97.

Epstein, R., Karlsson, J., Rönnqvist, M., & Weintraub, A. (2007). Harvest operational models in forestry. *Handbook of operations research in natural resources*, 99(3), 365-377.

Epstein, R., Rönnqvist, M., & Weintraub, A. (2007). Forest transportation. *Handbook of operations research in natural resources*, 99(3), 391-403.

Fleischmann, B., & Meyr, H. (1997). The general lotsizing and scheduling problem. *OR Spectrum*, 19(1), 11-21.

Gan, P. Y., & Lee, K. S. (2002). Scheduling of flexible-sequenced process plans in a mould manufacturing shop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20(3), 214-222.

Gunn, E. (2007). Models for strategic forest management. *Handbook of operations research in natural resources*, 99(3), 317-341.

- Kazemi Zanjani, M., Ait-Kadi, D., & Nourelfath, M. (2009). Robust production planning in a manufacturing environment with random yield: A case in sawmill production planning. *European Journal of Operational Research, In Press, Corrected Proof*
- Mendoza, G. A., Meimban, R. J., Luppold, W. G., & Araman, P. A. (1991). Combining simulation and optimization models for hardwood lumber production. *Proceedings, Pacific Rim Forestry -- Bridging the World* (pp. 356-361.), San Francisco, CA.
- Mendoza, G. A., Meimban, R. J., Araman, P. A., & Luppold, W. G. (1991). Combined log inventory and process simulation models for the planning and control of sawmill operations. *Proceedings, 23rd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Nancy, France.
- Meyr, H. (2000). Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. *European Journal of Operational Research, 120*(2), 311-326.
- Moon, C., Lee, Y. H., Jeong, C. S., & Yun, Y. (2008). Integrated process planning and scheduling in a supply chain. *Computers & Industrial Engineering, 54*(4), 1048-1061.
- Noble, S., Orr, B., Araman, P. A., Baumgras, J., & Pickens, J. B. (2000). A computerized bucking trainer for optimally bucking hardwoods. *Proceedings, 28th Annual Hardwood Symposium* (pp. 11-18), Davis, West Virginia.
- Oceña, L. G., & Schmoltdt, D. L. (1996). GRASP - A prototype interactive graphic sawing program. *Forest Products Journal, 46*(11/12), 40-42.
- Schmoltdt, D. L., Song, H., & Araman, P. A. (2001). Real-time value optimization of edging and trimming operations for rough, green hardwood lumber. *Proceedings, ScanTech 2001, the Ninth International Conference on Scanning Technology and Process Optimization for the Wood Industry* (pp. 87-100), Seattle, Washington, USA.
- Sridharan, V., Berry, W. L., & Udayabhanu, V. (1987). Freezing the master production schedule under rolling planning horizons. *Management Science, 33*(9), 1137-1149.
- Steele, P. H., Wagner, F. G., Kumar, L., & Araman, P. A. (1993). The value versus volume yield problem for live-sawn hardwood sawlogs. *Forest Products Journal, 49*(9), 35-40.
- Tan, W., & Khoshnevis, B. (2000). Integration of process planning and scheduling - a review. *Journal of Intelligent Manufacturing, 11*(1), 51-63.
- Todoroki, C. L. (1994). Effect of edging and docking methods on volume and grade recoveries in the simulated production of flitches. *Annales Des Sciences Forestières, 51*(3), 241-248.

Todoroki, C. L., & Rönnqvist, M. (1997). Secondary log breakdown optimization with dynamic programming. *Journal of the Operational Research Society*, 48(8), 471-478.

Todoroki, C. L., & Rönnqvist, M. (1999). Combined primary and secondary log breakdown optimisation. *Journal of the Operational Research Society*, 50(11), 219-229.

Todoroki, C. L., & Rönnqvist, M. (2002). Dynamic control of timber production at a sawmill with log sawing optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(11), 79-89.

Weintraub, A., & Epstein, R. (2005). The supply chain in the forest industry: Models and linkages. In J. Geunes, P. Pardalos & H. E. Romeijn (Eds.), *Supply chain management: Models, applications, and research directions* (pp. 343-362). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Weintraub, A. J., Zozom, A., Hodgson, T., & Cormier, D. (1997). A simulation-based finite capacity scheduling system. *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation* (pp. 838-844), Atlanta, Georgia, U.S.A.

Weintraub, A. (2007). Integer programming in forestry. *Annals of Operations Research*, 149(8), 209-216.

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

Winn, M. F., Wynne, R. H., & Araman, P. A. (2004). ALOG: A spreadsheet-based program for generating artificial logs. *Forest Products Journal*, 54(1), 62-66.

Xie, J., Zhao, X., & Lee, T. S. (2003). Freezing the master production schedule under single resource constraint and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 83(1), 65-84.

Zhang, Y. F., Saravanan, A. N., & Fuh, J. Y. H. (2003). Integration of process planning and scheduling by exploring the flexibility of process planning. *International Journal of Production Research*, 41, 611-628.

ANEXOS

ANEXO A: VERIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DE AMBOS MÉTODOS

Inicialmente y con la finalidad de comprobar que, tanto del modelo, como de la heurística corrieran apropiadamente, se utilizan valores arbitrarios de $\{I^c: B^c\}$ iguales a $\{1:1000\}$, lo que se hace, siguiendo lo sugerido por Clark (2005), imponiendo $I^c \ll B^c$, para desincentivar los retrasos.

Con los valores transitorios, se implementó un escenario extremo y de fácil solución, con una demanda agregada de un 70% de la capacidad total de producción sobre todo el horizonte de seis semanas, concentrada en solo 2 productos y en periodos extremos, lo que se resume en la Tabla A.1.

Tabla A.1: Instancia de prueba.

Número de instancia	P1	
R_{it} de cada troza tipo i en t	50%	respecto a C_t
Demanda Agregada	70%	respecto a $\sum_{\forall t} C_t$
Demanda para cada periodo d_{pt}	$d_{41} = 1/3$ & $d_{76} = 2/3$ de demanda agregada	
Distribución relativa de la demanda entre productos	No Aplicable (N/A)	
Desviación promedio de la demanda entre productos (DPD) respecto a la demanda ideal	N/A	
Concentración de la demanda K	2	
Distribución temporal de la demanda para cada producto k_p	$[k_{Lumber\ 1}, \dots, k_{Lumber\ 7}] = [0,0,0,10,0,1]$	

La demanda de los productos 4 y 7, supera la capacidad productiva del primer y último periodo en un 14% y en un 205% respectivamente, lo que fuerza la programación de la producción de inventario de producto 7 adelantadamente, para satisfacer la demanda de ésta en el último periodo, a la vez que fuerzan la programación de los pedidos retrasados del producto 4, lo que se refleja en los resultados expuestos en la Tabla A.2.

Tabla A.2: Resultados experimentales para la instancia de prueba.

Escenario	Extremo	
	Modelo	Heurística
Total de ordenes retrasadas (m^3)	7707	7707
Inventario total (m^3)	30937	30937
Error total de programación (m^3)	38644	38644
Retraso final en $t = 6$ (m^3)	5552	5552
Inventario final en $t = 6$ (m^3)	9332	9332
Satisfacción de la demanda	37%	37%
Inventario no deseado respecto a C_t	74%	74%
Promedio del número de tipo de trozas programada por periodo	2.2	2.2

El resultado obtenido, muestra que tanto el modelo como la heurística encuentran la mejor solución a esta instancia, sin cometer errores algebraicos ni violar alguna de las restricciones del escenario mencionado.

ANEXO B: DETERMINACIÓN DE VALORES ADECUADOS PARA I^C Y B^C .

Para determinar los valores finales de I^C y B^C , se realizaron 2 series de pruebas para distintos escenarios. Bajo estos escenarios, se probó el modelo para valores de $\{I^C: B^C\}$ del orden de $\{1:1\}$, $\{1:10\}$, $\{1:10^2\}$, $\{1:10^3\}$, $\{1:10^4\}$, $\{1:10^5\}$, $\{1:10^6\}$, y $\{1:10^7\}$.

La Tabla B.1 muestra detalladamente cada uno de los datos que definen y restringen la instancia correspondiente al primer escenario, llamado escenario extremo.

Tabla B.1: Instancia "extrema"

Número de instancia	P2	
R_{it} de cada troza tipo i en t	100%	respecto a C_t
Demanda Agregada	100%	respecto a $\sum_{\forall t} C_t$
Demanda para cada periodo d_{pt}	$d_{p1} = 100\% \forall p$ de la demanda agregada	
Distribución relativa de la demanda entre productos	Siguiendo el rendimiento medio de cada producto \bar{Y}_p	
Desviación promedio de la demanda entre productos (DPD) respecto a la demanda ideal	0%	
Concentración de la demanda K	7	
Distribución temporal de la demanda para cada producto k_p	$[k_{Lumber\ 1}, \dots, k_{Lumber\ 7}] = [1,1,1,1,1,1,1]$	

En este escenario, la demanda se concentra en el primer periodo para inducir el mayor retraso posible en la entrega de los productos. Esto, permite probar el modelo en un escenario altamente desfavorable, para encontrar la mínima diferencia entre los valores de I^C y B^C que minimicen el retraso en los pedidos para todo el horizonte de planificación.

En la tabla B.2, se presentan los resultados de las pruebas de los diversos valores de I^C y B^C , para la instancia mencionada.

Tabla B.2: Resultados experimentales para escenario extremo

Escenario	Extremo								
Perturbación	BC =	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
Método (M = Modelo; H = Heurística)	H	M	M	M	M	M	M	M	M
Total de ordenes retrasadas (m^3)	32571	33598	31502	31502	31502	31501	31499	31499	31500
Inventario total (m^3)	1071	0	0	0	0	0	0	0	0
Error total de programación (m^3)	33642	33598	31502	31502	31502	31501	31499	31499	31500
Retraso final en $t = 6$ (m^3)	491,4	2099	0	0	0	0	0	0	0
Inventario final en $t = 6$ (m^3)	491,4	0	0	0	0	0	0	0	0
Satisfacción de la demanda	96,1%	83,3%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Inventario no deseado resp. a C_t	3,9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Promedio del número de tipo de trozas usadas por periodo	1	1,2	1	1	1	1	1	1	1
Error total añadido por la heurística (m^3)		44	2140	2140	2140	2141	2143	2143	2142

En la tabla anterior, se aprecia que para valores de $\{I^C: B^C\}$ del orden de $\{1:10\}$ o más, los resultados obtenidos convergen, obteniéndose el mínimo “error total de la programación”⁶ para valores del orden de $\{1: 10^5\}$ y $\{1: 10^6\}$.

Independientemente de las pruebas realizadas para el escenario anterior, se realizó una set de pruebas similar, para el escenario detallado en la Tabla B.3.

⁶ Este error, es definido como la suma entre el inventario total y el retraso total en la entrega de órdenes, para todo el horizonte de planificación.

Tabla B.3: Escenario “abierto”.

Número de instancia	P3	
R_{it} de cada troza tipo i en t	100%	respecto a C_t
Demanda Agregada	100%	respecto a $\sum_{\forall t} C_t$
Demanda para cada periodo d_{pt}	$d_{p4} = 100\% \forall p$ de la demanda agregada	
Distribución relativa de la demanda entre productos	Demanda de productos Hi aumentada 5% y compensada por una caída en la demanda de productos Lo. Manteniendo la distribución relativa entre productos de cada tipo.	
Desviación promedio de la demanda entre productos (DPD) respecto a la demanda ideal	8,9%	
Concentración de la demanda K	7	
Distribución temporal de la demanda para cada producto k_p	$[k_{Lumber\ 1}, \dots, k_{Lumber\ 7}] = [1,1,1,1,1,1,1]$	

En este escenario, la demanda se concentra en el cuarto periodo, dejándose abierta la posibilidad de producir de manera adelantada o no. Además, manteniendo la demanda agregada igual a la capacidad productiva total para el horizonte de planificación, se indujo cierto grado de perturbación sobre el set de demanda ideal, para lo cual se incrementó la demanda de productos de ciertos productos, denominados Hi, en un 5%, equivalentes a $561,6\ m^3$, lo que se compensó disminuyendo la demanda del resto de los productos, denominados Lo. Esto se realizó manteniendo el tamaño relativo de la demanda de cada producto de cierto tipo, respecto al total de productos de cada tipo, proporciones que se aprecian en la Tabla B.4.

Tabla B.4: Tamaño relativo de cada producto respecto al total de su tipo

Sets de demanda	Tipo de Producto	\bar{Y}_p	Rendimiento relativo de productos Hi	Rendimiento relativo de productos Lo
Lumber 1	Hi	29%	33%	0%
Lumber 2	Lo	2%	0%	18%
Lumber 3	Lo	5%	0%	45%
Lumber 4	Hi	25%	28%	0%
Lumber 5	Hi	22%	25%	0%
Lumber 6	Hi	13%	15%	0%
Lumber 7	Lo	4%	0%	36%

Esta instancia, permite probar el modelo en un escenario que admite un amplio rango de soluciones, dejando abierta la posibilidad de producir de manera adelantada o no. Esto permite encontrar valores de I^c y B^c cuya diferencia desincentive fuertemente el retraso en el cumplimiento de las ordenes, a la vez que mantenga un adecuado balance entre los niveles de inventario no deseado y retraso en la producción, para mantener bajo el nivel de error total de la programación.

En la tabla B.5, se presentan los resultados de las pruebas de los diversos valores de I^c y B^c , para la instancia mencionada. En ésta se aprecia, que para valores de $\{I^c: B^c\}$ del orden de $\{1: 10^2\}$ o más, los resultados obtenidos convergen, obteniéndose el mínimo error total de la programación para valores del orden de $\{1: 10^5\}$. Además se observa que para valores del orden de $\{1: 10^6\}$ y $\{1: 10^7\}$, el total de ordenes retrasadas de mantiene, pero aumenta levemente el inventario total.

Tabla B.5: Resultados experimentales para escenario "abierto"

Escenario	"Abierto"								
Perturbación	BC =	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
Método (M = Modelo; H = Heurística)	H	M	M	M	M	M	M	M	M
Total de ordenes retrasadas (m^3)	8870	20997	6567	6567	6567	6567	6566	6566	6566
Inventario total (m^3)	15170	2100	12869	12868	12868	12868	12868	12869	12871
Error total de programación (m^3)	24040	23097	19436	19435	19435	19435	19434	19435	19437
Retraso final en $t = 6$ (m^3)	1053	6299	259	259	259	259	259	259	259
Inventario final en $t = 6$ (m^3)	1053	0,0	259	259	259	259	259	259	259
Satisfacción de la demanda	91,6%	50,0%	97,9%	97,9%	97,9%	97,9%	97,9%	97,9%	97,9%
Inventario no deseado resp a C_t	8,4%	0,0%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%
Promedio del número de tipo de trozas usadas por periodo	1	0,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Error total añadido por la heurística (m^3)		943,4	4604	4605	4605	4605	4606	4605	4603

Tras el resultado de ambas series de pruebas, es claro que al variar la relación entre estos parámetros, las soluciones del problema también varían, observándose que para valores de $\{I^C : B^C\}$ iguales a $\{1 : 10^5\}$ se obtienen programas de producción que minimizan el "error total de la programación" tanto como es factible, manteniendo un adecuado balance entre los niveles de inventario no deseado y retraso en la producción, por lo que $\{1 : 10^5\}$ es la relación entre I^C y B^C que se utiliza en todas las pruebas experimentales.

ANEXO C: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Dada la extensión de los resultados obtenidos tras los experimentos descritos y ante la poca utilidad de un registro impreso de los datos mencionados, estos se presentan en formato digital en el CD-ROM adjunto, en el archivo resultados_tesis.xls.

Adicionalmente, se adjuntan los archivos de texto correspondientes a la implementación del modelo matemático en el lenguaje AMPL y de la implementación de la heurística en MATLAB, detallados en la Tabla C.1.

Tabla C.1: Archivos correspondientes a la implementación de las diversas instancias.

Inst.	Descripción	Implementación de modelo en AMPL				Implementación del modelo en MATLAB		
		Modelo	Datos	Ejecución	Salida	Modelo	Datos	Salida
1	Ideal	m6_1@100000.mod	h1.dat	h1_r.run	out_h1.out	heuristica.m	h1.m	resultados_tesis.xls
2	$R_{it} = 50\%$		h2.dat	h2_r.run	out_h2.out		h2.m	
3	$R_{it} = 25\%$		h3.dat	h3_r.run	out_h3.out		h3.m	
4	$R_{it} = 16,7\%$		h4.dat	h4_r.run	out_h4.out		h4.m	
5	$R_{it} = 10\%$		h5.dat	h5_r.run	out_h5.out		h5.m	
6	Lo + 10%		h6.dat	h6_r.run	out_h6.out		h6.m	
7	Hi + 10%		h7.dat	h7_r.run	out_h7.out		h7.m	
8	Lo + 38%		h8.dat	h8_r.run	out_h8.out		h8.m	
9	Hi + 5%		h9.dat	h9_r.run	out_h9.out		h9.m	
10	Max $p = 2$ (Lo)		h10.dat	h10_r.run	out_h10.out		h10.m	
11	Max $p = 1$ (Hi)		h11.dat	h11_r.run	out_h11.out		h11.m	
12	K = 7 en t= 1		h12.dat	h12_r.run	out_h12.out		h12.m	
13	K = 7 en t= 6		h13.dat	h13_r.run	out_h13.out		h13.m	
14	K = 7 en t= 4		h14.dat	h14_r.run	out_h14.out		h14.m	
15	K=4, Hi, t=4		h15.dat	h15_r.run	out_h15.out		h15.m	
16	K=3, Lo, t=4		h16.dat	h16_r.run	out_h16.out		h16.m	
17	$d_{pt} = 1,2d_{pt}^i$		h17.dat	h17_r.run	out_h17.out		h17.m	