

UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA PLANIFICAR LA PRODUCCIÓN DE UNA COMPAÑÍA SIDERÚRGICA

AN OPTIMIZATION MODEL FOR THE PRODUCTION PLANNING OF A STEEL COMPANY

Felipe Alvarez Clifford¹, Heraldo Reinoso¹

¹Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

RESUMEN

En este trabajo se resuelve un problema de planificación agregada de la producción de Compañía Siderúrgica Huachipato S.A., a través de un modelo de programación lineal. La planificación agregada de la producción es a mediano plazo, en donde se considera la agregación de los productos en familias que comparten características en común, entre otros factores. Huachipato posee una herramienta basada en *Microsoft Excel* que efectúa este tipo de planificación, pero no considera factores importantes en la modelación, como múltiples períodos, inventarios y costos de conversión. Por otra parte, la actual crisis financiera mundial ha traído consecuencias negativas a la industria siderúrgica, como grandes bajas en la demanda y los precios y gran incertidumbre. Por estas razones fue necesario desarrollar un modelo que considere los factores importantes en la modelación y realizar análisis de los posibles escenarios comerciales futuros para la industria siderúrgica. Los resultados revelan que es conveniente utilizar la capacidad mínima de producción en cualquier escenario y que los productos de mayor ganancia son los de tipo palanquilla. Se revela información acerca de la utilización de los centros de trabajo. Dos análisis de sensibilidad muestran qué cambios en los costos de algunos productos tipo planchón y cambios en la demanda de ciertos productos tipo palanquilla tienen un gran efecto en la función objetivo.

Palabras claves: Planificación agregada, planificación de la producción, empresa Siderúrgica.

ABSTRACT

In this work an aggregate production planning problem of the steel company *Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.* is equated and resolved through a linear programming problem. Aggregate production planning is for middle term, where a product aggregation in families which share common characteristics is considered. *Compañía Siderúrgica Huachipato* has an *Microsoft Excel* based implementation that solves aggregate production planning, but doesn't consider important model components, like multiple periods of time, inventories and conversion costs. On the other hand, the current global financial crisis has brought negative consequences to the steel industry, like demand and steel price decreases and big uncertainty. Because of these reasons, the development of a model which considers the missing model components above and be able to analyze future commercial scenarios for the steel industry. The results reveal that it's convenient to use the minimum production capacity in any scenario and the higher profit products are the billet steel type. Information about work station's utilization is revealed. Two sensibility analysis show that cost changes in certain slab steel products and demand changes in some billet steel products have a great impact in the objective function.

Keywords: Aggregate planning, production planning, steel company.

Autor para correspondencia: fealvarez@udec.cl

Recibido: 24.03.2009 Aceptado: 18.05.2009

INTRODUCCIÓN

La planificación agregada de la producción (P.A.P.) se ejecuta normalmente de 3 a 12 meses y responde a la pregunta: ¿Cómo producir?. La P.A.P. se refiere a la determinación de la cantidad de producción, niveles de inventario, recursos necesarios y el tamaño de la plantilla en cada período, para satisfacer la demanda de un horizonte temporal de planificación a medio plazo, para satisfacer una demanda pronosticada (Boiteux *et al.* 2007a). Como resultado de la P.A.P. deben tomarse decisiones y establecer políticas que se relacionen con el sobretiempo, contrataciones, despidos, subcontratistas y niveles de inventario (Schroeder, 1992). Las variables de decisión son: *Stock*, fuerza laboral, producción, horas de trabajo, subcontratación, entre otras (Boiteux, *et al.* 2007b). Considerar la fuerza laboral es normal en muchos modelos de P.A.P.. Sin embargo, en el ambiente laboral actual, donde la participación de los trabajadores y el trabajo en equipo han sido ampliamente aceptadas, no es deseable el uso de una estrategia de contrataciones y despidos para resolver problemas de demanda, ya que esto deriva en un impacto negativo en la seguridad laboral y en la moral de los trabajadores. Además, los trabajadores despedidos frecuentemente impactan negativamente en la implementación de sistemas de gestión. Cada variable de decisión que considera el P.A.P. está relacionada con un costo, tomando en cuenta que la demanda está dada. El principal costo relacionado con la P.A.P. es el de los Costos Básicos de la Producción. Estos incluyen costos fijos y variables incurridos al producir cierto tipo de producto en un determinado tiempo. Se incluyen costos directos e indirectos de mano de obra y la compensación regular y extraordinaria (Chase & Aquilano, 1994). Al momento de definir las restricciones se debe conocer el entorno de producción de la empresa, que puede contemplar múltiples productos que compiten por los mismos recursos, como máquinas, mano de obra, dinero, etc.; múltiples procedimientos, que son variantes posibles para producir determinados productos, como rutas alternativas en la misma planta, plantas de fabricación distintas, etc.; y múltiples etapas o fases de fabricación, o sea, productos en cuya elaboración intervienen distintos centros de producción (Boiteux *et al.* 2007b).

Markland, *et al.* (1998) establecen que pueden existir diferentes objetivos, como maximizar la utilidad y el servicio al cliente, minimizar los inventarios, cambios de mano de obra, sobretiempo, etc. Una característica en particular de la P.A.P. es el hecho de efectuar una “agregación” de diferentes elementos, como productos (se consideran familias de productos), mano de obra y tiempo, con el objetivo de simplificar y facilitar la construcción de un modelo matemático representativo del problema. Boiteux *et al.* (2007a) sostuvieron que la agregación de los productos no desglosa la cantidad de producción por detalles de productos, sino que los considera en varias familias, sin importar sus diferentes variantes de diseño o modelo (ejemplo: color del automóvil, si éste debe llevar aire acondicionado, etc.). Álvarez (2006) y Peñailillo (2004) presentan ejemplos de problemas de P.A.P. en empresas forestales.

Específicamente hablando de la industria siderúrgica, Tibor (1958) propuso el primer modelo de planificación de la producción para una empresa siderúrgica integrada. Este modelo separó el proceso de producción en tres etapas generales: reducción del mineral, fabricación del acero y laminación del acero. Se efectuó un modelamiento diferente para cada etapa, considerando balances químicos, metalúrgicos, y de energía, y donde los resultados obtenidos de una etapa sirven de datos de entrada para la siguiente. Dutta & Fourer (2001) presentan aplicaciones de programación matemática para diferentes problemas relacionados a la industria siderúrgica, como optimización del *mix* de productos; *scheduling*, inventarios y distribución; procesos de altos hornos; fabricación del coque y del acero; etc.

Propósito del trabajo

El propósito de esta investigación es modelar el sistema productivo de una empresa acerera (Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. o C.S.H.) para obtener una solución para el problema de Planificación Agregada de la Producción. El sistema de producción asociado a esta empresa consta de tres grandes fases generales de producción: Reducción del Mineral, Fabricación del Acero Laminación del Acero. Este trabajo resuelve el problema de Planificación Agregada de la Producción para la tercera fase de producción, que tiene catorce centros de trabajo, los cuales efectúan diferentes procesos para obtener una gran variedad de productos terminados, que pueden clasificarse en diferentes familias de productos.

C.S.H. posee una herramienta que efectúa la P.A.P. Sin embargo, este modelo no considera factores como los inventarios, un límite inferior en los inventarios, la consideración de múltiples períodos y costos de conversión. Por esta razón, es necesario desarrollar una nueva herramienta que resuelva la P.A.P. y que considere los factores mencionados anteriormente, de manera de representar de una mejor forma el sistema productivo. La herramienta utilizada actualmente es *Premium Solver*, un *software* complementario de *Microsoft Office Excel (M.O.E.)*, que es capaz de resolver problemas de optimización de programación lineal, no lineal, mixta, etc.. Por esta razón, la nueva herramienta creada en esta investigación se implementó en *M.O.E.* y se resolvió con *Premium Solver*. Además, el mismo problema se implementó y resolvió en el *software LINGO 8.0*, con el objetivo de comparar resultados e identificar las razones de estos cambios. Otra razón para la realización de este trabajo es la actual crisis financiera mundial, que ha afectado significativamente la demanda y los precios del acero. Esta crisis ha traído pérdidas y ha obligado a la industria siderúrgica mundial a recortar la producción. Esto, sumado a la incertidumbre que se tiene sobre la crisis y las proyecciones de la economía chilena para el año 2009, complica el futuro escenario para C.S.H. Por lo tanto, es recomendable realizar una planificación de la producción frente a todos los posibles escenarios.

Hipótesis

La hipótesis de esta investigación es: "Es posible construir un modelo de optimización para efectuar la planificación de la producción del sistema productivo de Compañía Siderúrgica Huachipato, que considere los inventarios, un límite inferior en estos, costos de conversión de los productos y múltiples períodos, y cuya solución puede obtenerse en tiempos computacionales razonables".

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción del Proceso Productivo

El proceso productivo de una empresa siderúrgica integrada consta de tres etapas generales: reducción del mineral, fabricación del acero líquido y la laminación del acero. La reducción del mineral consiste en la reducción del hierro a arrabio en los altos hornos, usando como combustible principal el coque (la mayoría del coque usado es obtenido en la coquería perteneciente a C.S.H.). La fabricación del acero líquido, en la acería consiste en obtener el acero líquido que es producto del arrabio procesado en un Convertidor al Oxígeno. Esta refinación requiere además chatarra y cal. En la laminación del acero se le da forma final al acero líquido. Dependiendo del producto que se quiera obtener, el acero líquido es procesado en varios centros de trabajo. Podemos dividir los centros de trabajo en tres grupos principales:

1. Coladas Continuas: Inicialmente el acero líquido puede procesarse en la Colada Continua de Palanquillas (CPQ) o la Colada Continua de Planchones (CPL), dependiendo de si se

quiere obtener un producto del tipo palanquilla o planchón, respectivamente.

2. Laminación del Acero, parte Palanquillas: El acero líquido proveniente de CPQ puede procesarse en tres centros de trabajo: el laminador de barras de Talcahuano (LBT), el laminador de rollos de Talcahuano (LRT) y el laminador de barras de Rengo (LBR).
3. Laminación del Acero, parte Planchones: Aquí se procesa el acero líquido proveniente de la CPL. Los centros de trabajo que contiene este grupo son: el laminador de planos en caliente (LPC), línea de decapado continuo (LDC), laminador de planos en frío (LPF), limpieza electrolítica (LE), línea *zincalum* (LZA), línea de recocido *batch* (RB), línea de recocido continuo (RC), laminador de temple (LT) y línea de estañado electrolítico (LEE).

Existen tres clasificaciones de familias de productos (desde ahora se abrevian como productos):

- Productos originales: Corresponden al acero que se procesó correctamente y cumple con todos los estándares de calidad, dimensiones y metalurgia utilizados por C.S.H.
- Productos degradados: Corresponden a productos que no cumplieron algún estándar de calidad, dimensiones o metalurgia, que son utilizados para fabricar otro tipo de acero.
- Productos importados: Es acero comprado a otras siderúrgicas, que puede ser procesado para obtener otro producto o vendido directamente.

La secuencia de proceso, presente en la Figura 1 a y b, muestra el camino que los diferentes tipos de acero siguen en el proceso productivo, partiendo desde las Coladas Continuas. Se indica donde son ingresados productos importados y las degradaciones de ciertos productos. Si el producto se encuentra encerrado por una línea gruesa significa que está terminado. Si el producto terminado o en proceso tiene una S entre paréntesis, quiere decir que parte de la producción es importada. Por último, si la secuencia de proceso tiene una separación que al inicio posee una forma de triángulo, significa que corresponde a una degradación del producto original, donde el número indica el tipo de degradación. El porcentaje al lado de este triángulo indica la fracción de la producción que corresponde a la degradación. Existen productos con diferente numeración que son del mismo tipo; tales son las parejas de productos 4-5, 20-21, 7-36 y 22-38. Los productos terminados pertenecen a grupos de productos, mostrados en la Tabla N°1.

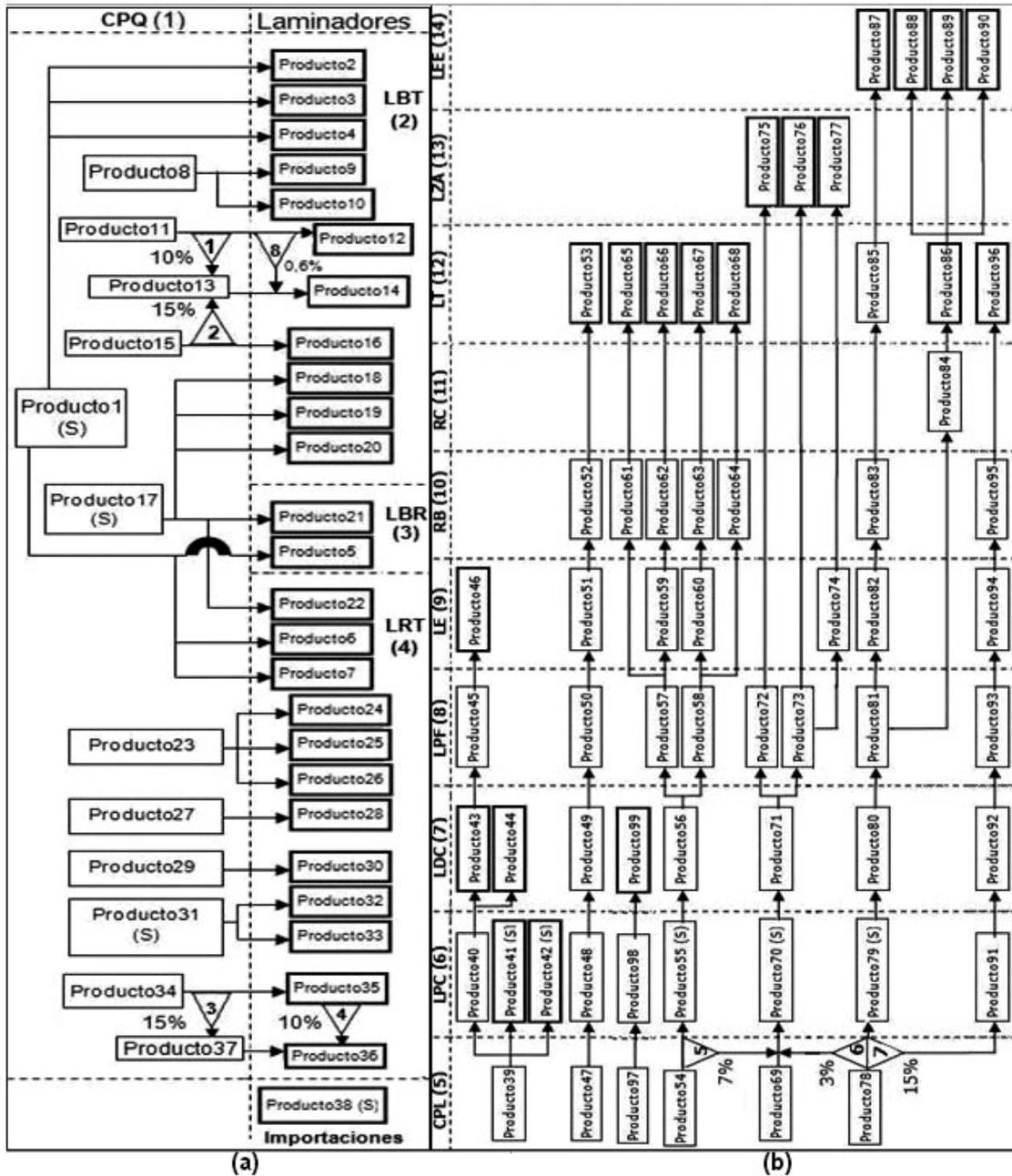


Figura 1: (a) Secuencia de Procesos partiendo de Colada Continua de Palanquillas
 (b) Secuencia de Procesos partiendo de Colada Continua de Planchones.

Tabla N°1: Clasificación de los productos terminados

Clasificación Básica	Clasificación General	Productos terminados			
		2	3	4	5
Palanquilla	Producto en Barra	9	10	12	14
		16	18	19	20
		21			
		6	7	22	24
	Producto en Rollo	25	26	28	30
		32	33	35	36
		38			
		41	42		
Planchón	Rollos Laminados en Caliente	43	44	99	
	Rollos Aceitados	46			
	Rollos Laminados en Frío	53	65	66	67
	Rollos sin Recubrimiento	68	86	96	
		75	76	77	
	Recubiertos Zinc-Alum	87	88	89	90

La producción está limitada por la capacidad productiva de cada centro de trabajo. Esta capacidad está determinada principalmente por los *Turnos Disponibles* y la *Productividad Carga*. Los *Turnos Disponibles* corresponden a la cantidad de turnos que pueden utilizarse para producir acero en un centro de trabajo. La *Productividad Carga* representa la cantidad estándar de toneladas de un tipo de acero que es procesada en un determinado centro de trabajo en un turno. La *Productividad Carga* varía dependiendo del tipo de producto del cual provenga. Como en todo sistema productivo de manufactura, se obtienen productos que no cumplen con las especificaciones de calidad, dimensiones, composición química, etc. Para expresar la cantidad de producción que cumple con estas especificaciones se utiliza el *Rendimiento Metálico* y el *Rendimiento de Inspección*. El *Rendimiento Metálico* expresa el % del total de acero ingresado a una fase de producción que es efectivamente retirado. Este rendimiento se debe a diferentes despuntes, enredos o laminilla resultante. El *Rendimiento de Inspección* representa el % del acero resultante que cumple con especificaciones de calidad de cada producto. Los productos que no aprueban la inspección pueden ser procesados en otro centro de trabajo para obtener un producto tipo degradación. En algunas ocasiones C.S.H. se ve en la necesidad de importar parte de la producción de acero, para satisfacer las demandas de los clientes. En este caso existe un límite máximo de las importaciones, basado en la capacidad productiva de los proveedores del acero y en la capacidad de recepción de materiales de C.S.H.

Considerando únicamente la tercera etapa de producción, revela qué tipo de acero debe entregar la acería a las coladas continuas. Tibor (1958) presenta el primer modelo de producción de una siderúrgica, donde ecuación modelos de optimización para las tres etapas de producción y forma un modelo maestro de la producción, en donde los resultados de la primera etapa sirven para la segunda etapa, y los resultados de esta etapa son los datos para la tercera etapa.

Características del Mercado del Acero para C.S.H.

Los principales abastecedores de acero en Chile son: C.S.H con 53% de participación, Gerdau Aza con un 15% de participación y el 32% restante son importaciones. La producción de acero de C.S.H. está principalmente destinada al consumo nacional (99% de la producción). Debido

a las características del mercado chileno es posible realizar estimaciones de la demanda sólo de las familias de productos más vendidos. La gerencia comercial de C.S.H. entrega la estimación de la demanda de cada familia de productos a través de un estudio del mercado. Existen familias de productos que poseen demanda mínima, debido a que existen contratos de abastecimiento de productos con determinados clientes, que implica una producción mínima fija de esta familia de productos.

Efecto de la crisis financiera

La crisis financiera internacional -iniciada en Septiembre de 2008- ha generado una recesión en la economía global, impactando la siderurgia mundial. Las características estructurales de la industria siderúrgica la convierten en un sector vulnerable ante coyunturas económicas. Esta vulnerabilidad se debe a la elevada ocupación de mano de obra de la industria y su cadena de valor metalmeccánica; por ser una actividad intensiva en capital y tecnología; por su elevada inserción en el comercio mundial; y por la propensión a verse afectada por acciones de comercio desleal en situaciones recesivas. Debido a que esta desaceleración en el crecimiento económico mundial ha afectado la demanda de los metales usados en proyectos de construcción y mineros, los precios del acero han caído desde Septiembre del 2008. En Chile, el freno en la construcción en Chile -35% de las ventas para la industria siderúrgica chilena-, causada por la crisis, y la baja en los precios del acero -20% de baja desde Agosto a Octubre de 2008-, causada por la baja demanda de acero, han hecho reevaluar los planes de inversión de las compañías siderúrgicas chilenas. La Figura 2 muestra la evolución de las ventas en acero líquido en el año 2008, en donde se puede apreciar la caída en las ventas desde Septiembre a Noviembre, que corresponde a un 58%. Con respecto a las predicciones, en Octubre del 2008 el presidente de la C.A.P., Roberto de Andraca, pronosticó que los precios del acero utilizado para la construcción caerían un 20% desde ese momento al primer trimestre del año 2009; además, prevé que la mala situación actual creada por la crisis financiera en Chile comenzará a normalizarse desde el tercer o cuarto trimestre del año 2009. Por otro lado, según la corrección al Informe de Política Monetaria del Banco Central de Chile y las proyecciones hechas en el último Foro de Cooperación Económica Asia Pacífico en Noviembre de 2008, la crisis financiera se extendería hasta mediados del 2010.



Figura 2: Ventas en Acero Líquido de C.S.H. en 2008.

Las proyecciones de la economía chilena, la actual incertidumbre debido a la crisis financiera y la tendencia a la baja de los precios y la demanda del acero a nivel mundial, son factores importantes que influyen en la demanda y los precios del acero en el futuro. Ante esto, es recomendable analizar todos los posibles escenarios futuros y realizar una planificación de la producción para cada uno de estos.

Escenarios utilizados

Existen tres posibles escenarios de mercado:

1. Escenario de mercado más probable: Es la situación que tiene más probabilidad de ocurrir, según pronósticos de modelos económicos o expertos en el tema.
2. Escenario de mercado optimista: Se plantea principalmente una recuperación rápida de la crisis financiera, favoreciendo la demanda de acero y subiendo los precios del acero para la construcción en el corto plazo. Este escenario considera pronósticos optimistas, como el del presidente de C.A.P. Es un escenario más favorable comparado con el más probable.
3. Escenario de mercado pesimista: Se asume un mal desenlace de la crisis financiera, extendiéndose más de lo pronosticado y con peores consecuencias en la demanda y los precios del acero. Es un escenario más desfavorable que el escenario más probable.

En conjunto con estos escenarios se consideran tres opciones en la producción de acero líquido de C.S.H. Estas opciones son:

1. Producción originalmente planificada: Se seguirá el plan de producción de acero líquido originalmente planificado por C.S.H. Parte de este plan señala que se producirán 1,125 millones de toneladas en el año 2009.
2. Producción Aumentada: Esta opción propone producir más que lo planificado, con el fin de ajustarse al escenario optimista. Aquí se planea utilizar cerca de la capacidad máxima de producción de acero líquido, que es 1,45 millones de toneladas al año.
3. Producción Disminuida: Aquí se propone producir menos acero líquido que el plan original de C.S.H., pensando en enfrentar el escenario pesimista. Este plan de producción propone reducir la producción al 66% de la capacidad máxima -utilizando uno de los dos altos hornos-, lo que corresponde a 957 miles de toneladas al año.

Combinando las opciones expuestas, se tienen nueve posibles escenarios para realizar la planificación de la producción: Escenario de Mercado más probable con Producción originalmente planificada, Escenario de Mercado más probable con Producción Aumentada, Escenario de Mercado más probable con Producción Disminuida, Escenario de Mercado Optimista con Producción originalmente planificada, Escenario de Mercado Optimista con Producción Aumentada, Escenario de Mercado Optimista con Producción Disminuida, Escenario de Mercado Pesimista con Producción originalmente planificada, Escenario de Mercado Pesimista con Producción Aumentada y Escenario de Mercado Pesimista con Producción Disminuida. En este trabajo, los escenarios nombrados están enumerados del N°1 al N°9, respectivamente.

RESULTADOS

Construcción y explicación del Modelo Matemático

Sean i productos donde $i=1,2,\dots,99$; j períodos donde $j=1,2,\dots,J$ (el término J se define dependiendo de a cuantos períodos se quiere modelar) con $J \in N$ (números naturales); d tipos de degradaciones donde $d=1,\dots,8$ y k centros de trabajos donde $k=1,\dots,14$, las variables utilizadas en el modelo son las siguientes:

- **ALCPL_j** : Cantidad de Acero Líquido destinada a la CPL en el período j (ton).
- **ALCPQ_j** : Cantidad de Acero Líquido destinada a la CPQ en el período j (ton).
- **PPO_{ij}** : Nivel de producción original del producto en proceso i en el período j (ton).
- **PPD_{ij}** : Producción del producto en proceso i , tipo degradación d en el período j (ton).
- **PPI_{ij}** : Producción de tipo importación del producto en proceso i en el período j (ton).
- **IIPO_{ij}** : Inventario Inicial del producto en proceso i de tipo original en el período j (ton).
- **IIPD_{ijd}** : Inventario Inicial producto en proceso i de tipo degradación d en el período j (ton).
- **IIPi_{ij}** : Inventario Inicial del producto en proceso i de tipo importación en el período j (ton).
- **PTeO_{ij}** : Nivel de producción original del producto terminado i en el período j (ton).
- **PTeD_{ijd}** : Producción del producto terminado i , tipo degradación d en el período j (ton).
- **PTel_{ij}** : Producción de tipo importación del producto terminado i en el período j (ton).
- **IITeO_{ij}** : Inventario Inicial del producto terminado i de tipo original en el período j (ton).
- **IITeD_{ijd}** : Inventario Inicial del producto i de tipo degradación d en el período j (ton).
- **IITel_{ij}** : Inventario Inicial del producto terminado i de tipo importación en el período j (ton).
- **IITeID_{ij}** : Inventario Inicial producto terminado importado directamente i en el período j (ton).
- **VO_{ij}** : Unidades del producto terminado i , tipo original vendidas en período j (ton).
- **VD_{ijd}** : Producto terminado i , tipo de degradación d vendidas en período j (ton).
- **VI_{ij}** : Producto terminado de tipo importación i vendidas en el período j (ton).
- **VID_{ij}** : Unidades del producto terminado importado directo i vendidas en el período j (ton).
- **I_{ij}** : Importación del producto i en el período j (ton).

Los parámetros usados en el modelo corresponden a:

- **PrV_{ij}** : Precio de venta del producto terminado i en el período j (\$US).
- **CAL_j** : Costo del Acero Líquido en el período j (\$US).
- **CC_{ij}** : Costo de conversión del producto i original en el período j (\$US).
- **CCD_{ijk}** : Costo de conversión del producto i de la degradación d en el período j (\$US).
- **CCI_{ij}** : Costo de conversión del producto i proveniente de importación en período j (\$US).
- **CI_{ij}** : Costo del producto i importado en el período j (\$US).
- **AL_j** : Acero líquido disponible en el período j (ton).
- **IIPO_{i1}** : Inventario Inicial producto en proceso i (de tipo original) en el período inicial (ton).
- **IIPD_{i1d}** : Inventario Inicial producto en proceso i , tipo degradación d en período inicial (ton).
- **IIPi_{i1}** : Inventario Inicial producto en proceso i , tipo importación en el período inicial (ton).
- **IITeO_{i1}** : Inventario Inicial del producto terminado i de tipo original en el período inicial (ton).
- **IITeD_{i1d}** : Inventario Inicial producto terminado i , tipo degradación d en período inicial (ton).
- **IITel_{i1}** : Inventario Inicial producto terminado i , tipo importación en el período inicial (ton).
- **IITeID_{i1}** : Inventario Inicial producto terminado importado directamente i , período inicial (ton).
- **TD_k** : Turnos Disponibles en el centro de trabajo K (turno).
- **PtC_{ij}** : Productividad de Carga producto i tipo original en período j (ton/turno).
- **PtCD_{ijd}** : Productividad de Carga producto i , degradación d del período j (ton/turno).
- **PtCI_{ij}** : Productividad de Carga producto i , tipo importación del período j (ton/turno).
- **RM_{ij}** : Rendimiento Metálico del producto i de tipo original en período j (%).
- **RMD_{ijd}** : Rendimiento Metálico producto i , de degradación tipo d del período j (%).
- **RMI_{ij}** : Rendimiento Metálico producto i de tipo importación en período j (%).
- **RI_{ij}** : Rendimiento Inspección del producto i de tipo original en período j (%).
- **RID_{ijd}** : Rendimiento Inspección producto i , degradación tipo d del período j (%).
- **RII_{ij}** : Rendimiento Inspección producto i de tipo importación en período j (%).
- **D_d** : Porcentaje de degradación del tipo d (para productos que sufren degradaciones).
- **IM_i** : Cantidad de acero máxima a importar del producto i (si corresponde) (ton).
- **DMin_{ij}** : Demanda mínima del producto terminado i en el período j (ton).
- **DMax_{ij}** : Demanda máxima del producto terminado i en el período j (ton).
- **IIMin_{ij}** : Inventario Mínimo del producto terminado i en el período j (ton).

- PC_{ij} : Producción cargada del producto i de tipo original correspondiente al período j .
- PCD_{ijd} : Producción cargada producto i , degradación tipo d correspondiente al período j .
- PCI_{ij} : Producción cargada del producto i de tipo importación correspondiente al período j .
- TU_{ij} : Turnos utilizados para producir producto i original del período j (turno/ton).
- TUD_{ijd} : Turnos utilizados para producir producto i , degradación d del período j (turno/ton).
- TUI_{ij} : Turnos utilizados para producir producto i , importación del al período j (turno/ton).

Para construir la función objetivos y las restricciones de una manera más simplificada, se consideran los conjuntos de números mostrados en la Tabla N°2, que hacen referencia a diferentes grupos de productos y degradaciones. Suponiendo que todas las variables cumplen la condición de no negatividad, la función objetivo del modelo se puede ver la ecuación (1). La primera sumatoria de la ecuación (1) incluye los j períodos considerados en el problema. Lo que viene a continuación corresponde a la suma de las ventas menos los costos. Los últimos dos términos de la sumatoria representan el costo que significa el acero líquido para el período j .

Las restricciones del problema representan las limitaciones con respecto a la capacidad, el balance de la producción, la venta de productos, la demanda máxima y mínima del producto terminado, la importación máxima de productos y el inventario mínimo. Debido al gran número de restricciones se mostrarán ejemplos de cada tipo de restricciones presentes en el modelo. La capacidad de producción está fijada por los *Turnos Disponibles* por período de cada centro de trabajo. Los *Turnos Utilizados* para producir cada producto terminado o en proceso más el inventario inicial de cada producto para el siguiente período no deben superar los *Turnos Disponibles* totales para el presente período. La definición matemática se puede ver en la ecuación (2). Al multiplicar una variable por el parámetro *Turnos Utilizados*, se obtiene la cantidad de turnos que se necesitaron para producir el acero.

$$\begin{aligned}
 MAX_U = & \sum_{j \in J} \left\langle \sum_{i \in OVe} (VO_{ij} * PrV_{ij} - PTeO_{ij} * CC_{ij}^-) - \sum_{i \in OP} [(PPO_{ij} + IIP O_{i,j+1}) * CC_{ij}^-] + \sum_{i \in IVe} (VI_{ij} * PrV_{ij} - PTeI_{ij} * CCI_{ij}) + \right. \\
 & \sum_{i \in IVe} (VD_{ij} * PrV_{ij}) - \sum_{i \in ID} (I_{ij} * CI_{ij}) - \sum_{i \in IP} [(PPI_{ij} + IIP I_{i,j+1}) * CC_{ij}^-] + (VD_{14,j,1} + VD_{14,j,2} + VD_{14,j,8}) * PrV_{14,j} - \\
 & PTeD_{14,j,1} * CCD_{14,j,1} + \sum_{i \in DRe_s} [(VD_{ij5} + VD_{ij6}) * PrV_{ij} - PTeD_{ij5} * CCD_{ij5} - PTeD_{ij6} * CCD_{ij6}] - PTeD_{14,j,2} * CCD_{14,j,2} + \\
 & (VD_{26,j,3} + VD_{26,j,4}) * PrV_{26,j} - PTeD_{26,j,3} * CCD_{26,j,3} + - \sum_{i \in DF_3} [(PPD_{ij5} + IIPD_{i,j+1,5}) * CCD_{ij5} + (PPD_{ij6} + IIPD_{i,j+1,6}) * CCD_{ij6}] + \\
 & VD_{96,j,7} * PrV_{96,j} - \sum_{i \in DF_7} [(PPD_{ij7} + IIPD_{i,j+1,7}) * CCD_{ij7}] - PTeD_{96,j,7} * CCD_{96,j,7} - AL_j * CAL_j \rangle
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, J$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in OP} [(PPO_{ij} + IIP O_{i,j+1}) * TU_{ij}] + \sum_{i \in OVe} [PTeO_{ij} * TU_{ij}] + \sum_{i \in IP} [(PPI_{ij} + IIP I_{i,j+1}) * TUI_{ij}] + \\
 & \sum_{i \in IVe} [PTeI_{ij} * TUI_{ij}] + \sum_{i \in DF} \left[\sum_{d \in PD} \{(PPD_{ijd} + IIPD_{i,j+1,d}) * TUD_{ijd}\} \right] + \sum_{i \in DVe} \left[\sum_{d \in VeD} \{PTeD_{ijd} * TUD_{ijd}\} \right] \leq TD_k
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, J; \forall k = 1, 2, \dots, 14$$

Tabla N°2: Conjuntos de números y sus referencias a diferentes grupos de productos.

Nombre del conjunto	Contenido del conjunto	Referencia
<i>OP</i>	$\left\{ \begin{array}{l} 18,11,15,17,23,27,29,31,34,39,40,43, \\ 45,47,48,49,50,51,52,54,55,56,57,58, \\ 59,60,61,62,63,64,69,70,71,72,73,74, \\ 78,79,80,81,82,83,84,85,86,97,98 \end{array} \right\}$	Son los productos Originales en Proceso
<i>OVe</i>	$\left\{ \begin{array}{l} 2,3,4,5,6,7,9,10,12,16,18,19,20,21, \\ 22,24,25,26,28,30,32,33,35,41,42, \\ 43,44,46,53,65,66,67,68,75,76,77, \\ 86,87,88,89,90,99 \end{array} \right\}$	Los productos Originales en Venta o terminados
<i>DVe₁</i>	{14}	El producto de Degradación tipo 1, 2 ó 8 en Venta
<i>DVe₃</i>	{36}	El producto de Degradación tipo 3 ó 4 en Venta
<i>DP₅</i>	{70,71,72,73,74}	Productos de Degradación tipo 5 ó 6 en Proceso
<i>DVe₅</i>	{75,76,77}	Productos de Degradación tipo 5 ó 6 en Venta
<i>DP₇</i>	{91,92,93,94,95}	Productos de Degradación tipo 7 en Proceso
<i>DVe₇</i>	{96}	Producto de Degradación tipo 7 en Venta
<i>DP</i>	DP ₅ u DP ₇	Todos los productos en proceso tipo degradación
<i>DVe</i>	DVe ₁ u DVe ₃ u DVe ₅ u DVe ₇	Todos los productos terminados tipo degradación
<i>ID</i>	{1,17,24,26,31,38,41,42,55,70,79}	Productos de Importación Directa
<i>IP</i>	$\left\{ \begin{array}{l} 56,57,58,59,60,61,62,63,64,71, \\ 72,73,74,80,81,82,83,84,85,86 \end{array} \right\}$	Productos en Proceso provenientes de Importaciones
<i>IVe</i>	$\left\{ \begin{array}{l} 2,3,4,5,6,7,18,19,20,21,22,32,33,65, \\ 66,67,68,75,76,77,86,87,88,89,90 \end{array} \right\}$	Productos de Importaciones en Venta
<i>IDVe</i>	{24,26,38,41,42}	Productos de Importación Directa en Venta
<i>Ve</i>	OVe u DVe u IVe u IDVe	Todos los productos clasificados como terminados
<i>PD</i>	{5,6,7}	Degradaciones que son productos en proceso
<i>VeD</i>	{1,2,3,5,6,7}	Degradaciones que son productos terminados

El balance de la producción indica qué productos se deben producir a partir de otro producto en proceso. Se debe diferenciar el balance de la producción original, degradaciones y producción importada. Este balance incluye el uso de inventarios iniciales del producto en proceso para producir otro acero y la producción de los inventarios iniciales para el siguiente período de estos productos. En la ecuación (3), (4) y (5) se observa esta restricción para la producción original, de degradaciones y de importaciones, respectivamente.

$$\sum_{i \in OP} [(PPO_{ij} + IPO_{i,j+1}) * PC_{ij}] + \sum_{i \in OVe} [PTeO_{ij} * PC_{ij}] = PPO_{ij} + IPO_{ij} ; \forall i \in OP ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in DP} [(PPD_{ij,d} + IIPD_{i,j+1,d}) * PCD_{ij,d}] + \sum_{i \in DVe} [PTeD_{ij,d} * PCD_{ij,d}] = PPD_{ij,d} + IIPD_{ij,d} \quad (4)$$

$\forall i \in DP ; \forall j = 1, 2, \dots, J ; \forall d \in VeD$

$$\sum_{i \in IP} [(PPI_{ij} + IIPi_{i,j+1}) * PCI_{ij}] + \sum_{i \in IVe} [PTeI_{ij} * PCI_{ij}] = PPI_{ij} + IIPi_{ij} ; \forall i \in IP ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (5)$$

El balance de degradaciones muestra en qué tipo de degradaciones se divide la producción de un producto en proceso de un acero que sufre de estas (incluidos los inventarios iniciales para el siguiente período) (se puede dividir en uno o más tipos de degradaciones). La definición matemática para cada tipo de degradación se ve en la ecuación (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12) y (13).

$$PPD_{13,j,1} + IIPD_{13,j+1,1} = \frac{(PPO_{11,j} + IPO_{11,j+1}) * \%D_1}{RI_{11,j}} ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (6)$$

$$PPD_{13,j,2} + IIPD_{13,j+1,2} = \frac{(PPO_{15,j} + IPO_{15,j+1}) * \%D_2}{RI_{15,j}} ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (7)$$

$$PPD_{37,j,3} + IIPD_{37,j+1,3} = \frac{(PPO_{34,j} + IPO_{34,j+1}) * \%D_3}{RI_{34,j}} ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

$$PTeD_{36,j,4} = PTeO_{35,j} * \%D_4 ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (9)$$

$$PPD_{69,j,5} + IIPD_{69,j+1,5} = \frac{(PPO_{55,j} + IPO_{55,j+1}) * \%D_5}{RI_{54,j}} ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (10)$$

$$PPD_{69,j,6} + IIPD_{69,j+1,6} = \frac{(PPO_{79,j} + IPO_{79,j+1}) * \%D_6}{RI_{78,j}} ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (11)$$

$$PPD_{78,j,7} + IIPD_{78,j+1,7} = \frac{(PPO_{79,j} + IPO_{79,j+1}) * \%D_7}{RI_{78,j}} ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (12)$$

$$PTeD_{14,j,8} = \frac{PTeO_{12,j} * \%D_8}{RI_{12,j}} ; \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (13)$$

En la venta de productos se indica que los a vender, más el inventario inicial del siguiente período de estos productos, es igual a la producción total de este producto a vender más el inventario inicial del mismo. Se define el inventario inicial para el siguiente período del producto terminado para involucrar en la decisión los inventarios iniciales del presente período del

producto terminado. En la ecuación (14), (15), (16) y (17) se ve la definición matemática de la venta de productos originales, provenientes de degradaciones, importaciones y ventas de importaciones directas.

$$VO_{ij} + IITeO_{i,j+1} = PTeO_{ij} + IITeO_{ij} \quad ; \quad \forall i \in OVe - \{35\} \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (14)$$

$$VD_{ij,d} + IITeD_{i,j+1,d} = PTeD_{ij,d} + IITeD_{ij} \quad ; \quad \forall i \in DVe \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad ; \quad \forall d \in VeD \quad (15)$$

$$VI_{ij} + IITeI_{i,j+1} = PTeI_{ij} + IITeI_{ij} \quad ; \quad \forall i \in IVe \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (16)$$

$$VID_{ij} + IITeID_{i,j+1} = I_{ij} + IITeID_{ij} \quad ; \quad \forall i \in IDVe \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (17)$$

Las ventas deben satisfacer las demandas mínimas estimadas (si corresponde) y, al mismo tiempo, no superar la demanda máxima pronosticada. En la ecuación (18) y (19) están las fórmulas para la demanda máxima y mínima, respectivamente.

$$VO_{ij} + \sum_{d \in VeD} VD_{ij,d} + VI_{ij} + VID_{ij} \leq DMax_{ij} \quad ; \quad \forall i \in Ve \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (18)$$

$$VO_{ij} + \sum_{d \in VeD} VD_{ij,d} + VI_{ij} + VID_{ij} \geq DMin_{ij} \quad ; \quad \forall i \in Ve \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (19)$$

Los productos importados no pueden superar un límite máximo. La ecuación (20) indica esto.

$$I_{ij} \leq IM_i \quad ; \quad \forall i \in ID \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (20)$$

Debe existir un mínimo de inventarios o inventario de seguridad. En la ecuación (21) se muestra esto.

$$IITeO_{i,j+1} + IITeI_{i,j+1} + \sum_{d \in VeD} IITeD_{i,j+1,d} + IITeID_{i,j+1} \geq IIMin_{i,j+1} \quad ; \quad \forall i \in Ve \quad ; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (21)$$

El problema de planificación agregada de la producción aplicado a este estudio considera 443 variables y 668 restricciones por período. El modelo propuesto corresponde a un modelo de programación lineal, ya que las variables están definidas en $\mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ y la función objetivo (1) y las expresiones generales de las restricciones (2) a la (21) son linealmente definidas. Existen dos supuestos para la ecuación y utilización de este modelo: aunque existe un espacio físico limitado para los productos en proceso, el modelo no presenta ningún tipo de restricción frente a los inventarios para productos en proceso; y que, aunque el modelo está diseñado para cualquier número de períodos, se modelan cinco períodos, donde cada uno equivale a tres meses.

Resultados del modelo para los escenarios propuestos

Los márgenes de contribución obtenidos en cada escenario, utilizando *Microsoft Office Excel 2003 (M.O.E.)* y *LINGO 8.0* se muestran en la Tabla N°3

Tabla N°3: Márgenes de utilidad resolviendo el problema con ambos *software*.

Escenario	Características	Márgenes de Utilidad (\$US)	
		M.O.E.	LINGO 8.0
1	Mercado más probable, Producción Originalmente Planificada	-69,248,568	-87,264,890
2	Mercado más probable, Producción Aumentada	-298,240,416	-306,911,500
3	Mercado más probable, Producción Disminuida	52,312,969	37,849,360
4	Mercado Optimista, Producción Originalmente Planificada	180,494,185	166,855,400
5	Mercado Optimista, Producción Aumentada	-23,138,682	-39,956,520
6	Mercado Optimista, Producción Disminuida	291,569,322	282,006,300
7	Mercado Pesimista, Producción Originalmente Planificada	-336,485,193	-345,459,700
8	Mercado Pesimista, Producción Aumentada	-614,445,541	-568,011,300
9	Mercado Pesimista, Producción Disminuida	-194,343,779	-206,224,400

La distribución del acero líquido en promedio por período en las dos coladas por escenario se puede apreciar en la Tabla N°4.

Tabla N°4: Comparación de distribución del acero líquido en coladas continuas por escenario.

Escenario	M.O.E.				LINGO			
	Acero Colada Planchones		Acero Colada Palanquillas		Acero Colada Planchones		Acero Colada Palanquillas	
	[t]	%	[t]	%	[t]	%	[t]	%
1	540,542	38.4	867,458	61.6	547,369	38.9	860,631	61.1
2	825,183	47.9	896,817	52.1	748,136	43.4	973,864	56.6
3	437,438	36.2	772,562	63.9	412,545	34.1	797,456	65.9
4	506,241	36.0	901,759	64.1	481,355	34.2	926,645	65.8
5	753,719	43.8	968,281	56.2	762,141	44.3	959,859	55.7
6	475,420	39.3	734,580	60.7	477,113	39.4	732,887	60.6
7	680,819	48.4	727,181	51.7	541,443	38.5	866,558	61.5
8	788,315	45.8	933,685	54.2	690,931	40.1	1,031,070	59.9
9	482,996	39.9	727,004	60.1	489,518	40.5	720,483	59.5

Las cinco mejores ventas totales (suma de los períodos) utilizando *M.O.E.* se pueden ver en las Tablas N°5, 6 y 7, mientras que las obtenidas por *LINGO* se presentan en las Tablas N°8, 9 y 10 Además, para ver el comportamiento de las ventas en los distintos escenarios de mercado propuesto, se muestran las cinco mejores ventas obtenidas al sumar los escenarios que tienen igual comportamiento de mercado. El comportamiento de las importaciones variables, dependiendo del escenario. Sólo en el escenario N°6 se observaron importaciones significativas. Por esta razón, solamente se mostrarán las importaciones del mencionado

escenario, en la Tabla N°11. Los resultados revelaron que se cumplen los inventarios mínimos para cada producto terminado, en todos los escenarios, utilizando los dos programas. Las ventas de todos los productos, usando los dos *software*, correspondieron a las demandas máximas pronosticadas.

Tabla 5: Las cinco ventas más altas en los escenarios 1, 2, 3 y la suma de estos usando *M.O.E.*

VENTAS (t)				
Producto	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Suma escenarios
VO41	95,915	95,915	95,915	287,744
VO12	92,732	92,732	92,732	278,195
VO22	68,728	68,82	68,728	206,275
VO26	56,851	56,854	56,754	170,458
VO28	47,96	47,96	47,96	143,88

Tabla 6: Las cinco ventas más altas en los escenarios 4, 5, 6 y la suma de estos usando *M.O.E.*

VENTAS (t)				
Producto	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Suma escenarios
VO12	120,76	120,76	120,76	362,281
VO41	117,251	117,251	117,251	351,754
VO22	85,285	85,285	79,104	249,673
VO26	58,75	58,85	53,325	170,926
VO28	48,727	53,968	48,727	146,18

Tabla 7: Las cinco ventas más altas en los escenarios 7, 8, 9 y la suma de estos usando *M.O.E.*

VENTAS (t)				
Producto	Escenario 7	Escenario 8	Escenario 9	Suma escenarios
VO12	68,061	68,061	68,061	204,182
VO41	52,226	52,24	52,14	156,605
VO22	46,009	46,009	46,009	138,027
VO26	44,392	44,392	44,392	133,175
VO28	43,92	43,92	43,896	131,736

Tabla 8: Las cinco ventas más altas en los escenarios 1, 2, 3 y la suma de estos usando LINGO

VENTAS (t)				
Producto	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Suma escenarios
VO41	95,914	95,914	95,914	287,742
VO12	92,732	92,732	92,732	278,196
VO22	68,92	68,92	68,92	206,76
VO26	56,854	56,954	56,854	170,662
VO28	47,961	47,961	47,961	143,883

Tabla 9: Las cinco ventas más altas en los escenarios 4, 5, 6 y la suma de estos usando LINGO

VENTAS (t)				
Producto	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Suma escenarios (Mercado Optimista)
VO12	120,761	120,761	120,761	362,283
VO41	117,251	117,251	117,251	351,753
VO22	85,484	85,484	80,581	251,549
VO26	58,85	58,95	55,475	173,275
VO28	48,727	48,727	48,727	146,181

Tabla 10: Las cinco ventas más altas en los escenarios 7, 8, 9 y la suma de estos con LINGO

VENTAS (t)				
Producto	Escenario 7	Escenario 8	Escenario 9	Suma escenarios (Mercado Pesimista)
VO12	68,061	68,061	68,061	204,183
VO41	52,339	52,339	52,339	157,017
VO22	46,009	46,009	46,009	138,027
VO26	44,392	44,392	44,392	133,176
VO28	43,921	43,921	43,921	131,763

Tabla N°11: Importaciones (t) en el escenario N°6, utilizando *M.O.E* y *LINGO 8.0*.

Importación (t)	<i>M.O.E.</i>					<i>LINGO 8.0</i>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
I1	0	0	0	0	1,750	0	0	0	0	1,750
I17	589	314	518	681	1,500	0	0	0	0	420
I24	750	650	750	750	750	750	403	0	0	0
I26	1,125	1,025	1,125	1,125	1,125	1,125	1,125	1,125	0	0
I31	0	0	0	8	24	0	0	0	0	0
I38	1,250	1,150	1,250	1,250	1,250	1,250	1,250	1,250	1,250	40
I41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I55	0	1,982	0	0	2,000	0	0	0	0	2,000
I70	1,750	1,750	0	788	1,750	0	0	0	0	1,750
I79	1,500	1,500	1,500	1,500	1,429	0	0	0	0	0

DISCUSIÓN

Los resultados entregados, resolviendo los problemas con *M.O.E.* usando *Premium Solver* y con *LINGO*, no son exactamente los mismos. Se observan diferencias en el resultado de la función objetivo en la Tabla N°3, siendo los resultados de *M.O.E.* más altos que los de *LINGO*. Si se analizan los márgenes de utilidad obtenidos por período en cada escenario, se ve que los márgenes son mayores mientras el tiempo avanza en los escenarios con mercado más probable y optimista (escenarios con márgenes positivos). Esto se debe a que los precios de venta y la demanda del acero aumentan con el paso del tiempo. Por otro lado, si se analizan los resultados por las características del escenario, se puede observar que se obtienen ganancias con un mercado optimista con una producción originalmente o disminuida (escenarios 4 y 6, respectivamente) y con el mercado más probable con una producción disminuida (escenario 3).

Los escenarios con un mercado pesimista o con producción aumentada reportan grandes pérdidas (menos el escenario 5). Las diferencias entre las funciones objetivo se debe a que la implementación hecha en el software *LINGO* utiliza datos de precios, costos, productividades, etc., aproximados a los reales, mientras que la implementación de *M.O.E.* posee los datos reales.

Comparando las variables obtenidas se ve que la distribución de acero líquido en total es similar en siete escenarios, donde hay diferencias de pocos puntos porcentuales. Existe una tendencia a asignar más acero líquido a la CPQ, ya que la demanda de los productos producidos desde esta colada es mayor que la demanda de los productos que proviene de la otra colada. Por esto, ante cualquier situación es conveniente asignar más acero líquido a la Colada Continua de Palanquillas para fabricar más productos de este tipo. Se puede concluir que mientras menos acero líquido se produzca, más serán las ganancias, ya que las demandas pronosticadas totales son bajas para la capacidad mínima de producción. Este exceso de acero líquido representa gastos debido a la producción de éste y a la utilización posterior para fabricar inventarios. Por lo tanto, ante cualquier escenario de mercado futuro, los resultados revelan que es beneficioso que C.S.H. opere con la capacidad mínima de producción de acero líquido.

La información de las Tablas N°5, 6, 7, 8, 9, 10 y el resto del ventas obtenidas en cada escenario en los dos *software* revelan que los productos más vendidos son el N°12 (palanquilla en barra), 22, 26, 28 (estos tres son palanquillas en rollo), 41 (rollo laminado en caliente) y el 87 (planchón de hojalata), siendo el N°12 el que ocupa el primer lugar en la mayoría de los casos, seguido de los productos 41, 22, 28 y 26. Esta información revela que puede ser beneficioso guardar inventarios de estos productos para el futuro si por alguna razón la demanda general es baja, ya que estos productos son de alta demanda en comparación al resto. Por otro lado, es recomendable hacer esfuerzos para reducir costos en la fabricación de estos productos y de los productos necesarios para fabricar estos. Por otro lado, los productos menos vendidos corresponden al N°4 (palanquilla en barra), 7 (palanquilla en rollo), 18, 21 (palanquillas en barra), 35 (palanquilla en rollo), 67 (rollo sin recubrimiento) y 76 (recubierto *Zinc-Alum*). Sus bajas ventas se deben a sus bajos márgenes de contribución y/o su baja productividad.

La Tabla N°11 revela que la razón para que existiesen grandes importaciones, sólo en el escenario 6, es porque la capacidad de producción no es suficiente para suplir toda la demanda (este escenario es de un mercado optimista con una producción disminuida).

La utilización de los centros de trabajo muestra que la LDC y la CPQ son muy utilizadas. Particularmente, la utilización de LDC llega al 100% en los escenarios 2, 7 y 8, debido a los pocos turnos disponibles en comparación al resto (150 turnos disponibles por período) y a que se encuentra al inicio del proceso productivo, por lo cual deben procesar la mayoría de los productos. Ante esto, sería beneficioso realizar esfuerzos para subir la productividad de estos centros de trabajo, aumentando la productividad de carga o los rendimientos. Una disminución en la utilización de estos centros de trabajo significaría un menor gasto en la maquinaria, lo que en teoría implica menores reparaciones y gastos de mantenimiento. Por otro lado, los centros de trabajo menos usados en los escenarios del 1 al 6 son: LBR y LBT. Su baja utilización se debe principalmente a que la mayoría de productos terminados que producen son de bajas ventas (su demanda máxima es baja comparada con el resto). Otro centro de trabajo con baja utilización es LZA, debido igualmente a que sus productos son de bajas ventas.

Se realizaron dos análisis de sensibilidad. El primero dirigido a ver el efecto de los costos de conversión. Los costos analizados fueron los de los productos N°1 (de este producto se fabrican los productos 4 y 5, que ocupan el quinto lugar en los escenarios 4, 5 y 6), 17 (de este producto proviene el producto 22, que ocupa el segundo o tercer lugar en ventas en todos los escenarios), 39 (de este producto proviene el producto 41, uno de los productos de mayor venta) y 78 (de este producto proviene el producto 87, que ocupa el sexto lugar en ventas y, además, productos de altos costos de conversión provienen del N°78). Los cambios efectuados consisten en aumentar el valor del costo de conversión de los productos en todos los períodos en 10% y 33%. Este análisis muestra que aumentos en el costo de los productos 39 y 78 proporcionan grandes efectos negativos en la función objetivo. Aunque este aumento se puede explicar por un error al momento de estimar este costo, sería beneficio realizar esfuerzos para reducir los costos asociados a producir los productos 39, 41, 78 y 87, que son de grandes ventas y ganancias.

El segundo análisis de sensibilidad consiste en analizar el efecto de un cambio en la demanda máxima en los productos N°12, 41 (productos de mayor venta), 32 y 89 (productos que poseen un alto margen de contribución pero bajas ventas). Se hicieron dos cambios: un aumento de la demanda máxima en 1.250 toneladas y otro aumento en 7.500 toneladas, en cada período. Los resultados revelaron que un aumento en la demanda máxima de los productos 32 y 12 representa un gran efecto positivo en la función objetivo. Aunque estos cambios en las demandas máximas pueden ocurrir por eventos inesperados en el mercado, sería conveniente realizar esfuerzos para aumentar las ventas del producto 32, por ejemplo, mediante planes de marketing. Por otro lado, aunque el producto 89 posee un margen de contribución mayor

que el 32, su efecto en la función objetivo no es alto en la mayoría de los escenarios debido a la baja productividad del RC, que es el centro de trabajo con menor Productividad de Carga (61 ton/turno), lo que implica un mayor uso de turnos para producir una mayor cantidad de toneladas del producto 89, lo que reduce la producción de otros productos terminados que son procesados por RC.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, C. (2006). Una solución para el problema de planificación agregada de la producción: aplicación al área aserraderos de una empresa forestal. Informe para optar al grado Magíster de Ingeniería Industrial, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. Concepción. Chile

Boiteux, O., Corominas, A. & Lusa, A. (2007a). La Planificación Agregada como Instrumento Integrador de las áreas funcionales de la empresa: Estado del Arte y Perspectivas. *International Conference Industrial Engineering & Industrial Management*. pp. 389-395.

Boiteux, O., Corominas, A. & Lusa, A. (2007b). Estado del arte sobre planificación agregada de la producción. Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Chase, R. & Aquilano, N. (1994). *Dirección y Administración de la Producción y de las Operaciones*. 6ª edición, 616-617. Madrid: McGraw Hill – Interamericana.

Dutta, G. & Fourer, R. (2001). A Survey of Mathematical Programming Applications in Integrated Steel Plants. *Manufacturing & Service Operations Management*, 3(4), 387-400.

Markland, R., Vickery, S. & Davis, R. (1998). *Operations Management – Concepts in Manufacturing and Services*. Cincinnati, Ohio: South-Western College Pub.

Peñailillo, F. (2004). Modelamiento y solución para un problema de Planificación Agregada en un sistema productivo intermitente: aplicación en un aserradero. Informe para optar al grado Magíster de Ingeniería Industrial, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. Concepción. Chile

Schroeder, G. (1992). *Administración de Operaciones – Toma de decisiones en la función de operaciones*. 3ª edición, 332-338. México: McGraw-Hill.

Tibor, F. (1958). A Linear Programming Model of Integrated Iron and Steel Production. *Management Science*, 4(4), 415-449.

