



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE PLANIFICACIÓN
DE LA PRODUCCIÓN EN LA SIDERÚRGICA GERDAU
AZA S.A.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

CARLOS ALBERTO ZURITA OLEA

PROFESOR GUÍA:
JOSÉ MOSQUERA CADIZ.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIO CONCA KEHL.
FRANCISCO TUBINO CORTES.

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO
CIVIL INDUSTRIAL
POR: CARLOS ZURITA OLEA
FECHA: 21/01/2010
PROF. GUIA: SR. JOSÉ MOSQUERA

Desarrollo de un modelo de planificación de la producción en la Siderúrgica Gerdau Aza S.A.

Gerdau AZA es la mayor empresa productora de acero a partir de chatarra en el mercado nacional. Su producción se centra principalmente en barras de refuerzo para hormigón armado y perfiles de acero, atendiendo los sectores de la industria de la construcción civil, metalmecánica, minería y la agroindustria.

El objetivo de esta memoria es mejorar la planificación y programación de la producción minimizando los quiebres de stock y los costos involucrados. Esto se justifica por las toneladas contabilizadas como quiebre, que en el año 2009, representaron en promedio un 17% de la venta. La problemática es de alto impacto económico, ya que no satisfacer el 1% de la demanda mensual (quiebre de stock) equivale en promedio a más de 11,5 millones de pesos en costo de oportunidad cada mes.

La metodología utilizada se resume en tres grandes etapas. La primera consistió en la medición del problema y el modelamiento de la demanda, proponiendo un pronóstico agregado y una segmentación de los productos, según su rol en el negocio, con objeto de mejorar el input en la toma de decisiones. La segunda etapa, consistió en el desarrollo de un modelo de programación lineal mixta que determina las cantidades a producir semanalmente de cada uno de los 125 productos considerados (incluidos los de exportación), minimizando el costo de quiebre y el de tiempo de setup para un periodo de tres meses. Como última etapa, se validó el modelo, realizando un análisis de sensibilidad de los parámetros más críticos y evaluando su impacto económico.

En cuanto a los resultados, el pronóstico de demanda elaborado en la primera etapa, que siguió la estructura de las series de tiempo ARIMA, obtuvo un error promedio de un 10% v/s el 14% incurrido por la empresa en el período julio a octubre 2009. Por otro lado, el modelo de programación matemática contribuyó a una reducción de un 36% y 22% de los quiebres de stock de septiembre y octubre respectivamente, utilizando el pronóstico que se tenía en septiembre. Similarmente, con el pronóstico que se realizó en octubre la reducción en las toneladas de quiebres fue de un 43% para ese mes.

La evaluación económica, al considerar como mínimo que un 20% de los quiebres es realmente venta perdida, indica un ahorro de hasta 17 millones de pesos mensuales para la empresa, o equivalente una reducción de un 18% en el total de costos de setup y quiebres. Análogamente, considerando que todos los quiebres son ventas perdidas, el modelo estaría reduciendo en promedio \$86.000.000 en costos de setup y quiebres.

Finalmente, es conveniente proyectar adecuadamente las horas disponibles de producción, ya que ese comprobó su relevancia. Además, se demostraron los efectos de importar producto y aumentar la productividad de laminación de la planta (sobre un 30% como recomendación) para disminuir los costos involucrados.

AGRADECIMIENTOS

La presente memoria fue posible gracias a Dios y al apoyo de muchas personas. En primer lugar, quisiera agradecer a Irma Olea Vargas, mi madre, a quien debo su sacrificio y entrega para ayudarme para alcanzar mis metas y sueños en el ámbito profesional y personal. También, me gustaría agradecer a todos los integrantes de mi familia, de quienes siempre recibí su gran afecto y con quienes siempre conté. Agradezco a María José Reyes quién, además de hacerme feliz en lo afectivo, me ayudó con sus recomendaciones y conocimientos.

En lo académico, agradezco sinceramente a mi profesor guía José Mosquera C. quién siguió y orientó todo este trabajo de título, dándome el tiempo, la atención y las respuestas necesarias para llegar a buen término. También, agradezco al profesor Patricio Conca por sus acertadas acotaciones a este trabajo y a todos los profesores involucrados en mi desarrollo personal y estudiantil.

Por otra parte, quiero destacar la realización de esta memoria en la empresa Gerdau AZA, la que sin duda fue uno de los mejores caminos elegidos gracias a cada una de las personas que pude conocer. En particular, agradezco a Rodrigo Frías, Jefe del Área donde trabajé, por la oportunidad y apoyo entregado; a Patricio Grau y Felipe Rubio por la facilitación y ayuda en esta memoria. Además, no dejaré de agradecer a todos quienes colaboraron y me hicieron sentir su apoyo como: Rubén González, Luis Acevedo, Luis Torres, Cesar Saldías, Víctor Bobadilla, Claudio Riveros, Eduardo Jadue, Cesar Gamboa, Víctor Gutiérrez, entre muchos más.

INDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	2
	2.1 Planificación.....	2
	2.2 Quiebres de stock.....	3
	2.3 Estimación Demanda.....	5
3	OBJETIVOS	7
4	ALCANCES Y ENTREGABLES	7
5	MARCO CONCEPTUAL	7
6	METODOLOGÍA	14
7	MODELAMIENTO DE DEMANDA.....	15
	7.1 Segmentación del periodo de estudio	15
	7.2 Análisis de un período representativo.....	15
	7.3 Pronóstico agregado según venta histórica.	16
	7.4 Período actual, crisis económica 2008- 2009	17
	7.5 Caracterización de productos.....	18
	7.6 Pronóstico desagregado para cada producto.....	21
8	MODELO DE PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.....	22
	8.1 Construcción del Modelo	22
	8.2 Definición del Modelo.....	28
	8.3 Resultados.....	32
	8.4 Análisis de sensibilidad	37
9	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	43
10	CONCLUSIONES.....	45
11	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN	46
12	ANEXOS	47

1 INTRODUCCIÓN

Gerdau AZA S.A. pertenece al Grupo Gerdau desde 1992 y posee más de 56 años de experiencia en el sector siderúrgico chileno. Es el principal productor nacional de acero a partir de chatarra y participa exclusivamente en el mercado de los productos de acero largos. Su actividad se orienta a la producción y abastecimiento de barras y perfiles de acero laminado en caliente, atendiendo a sectores esenciales en el desarrollo del país, como son la construcción civil, la industria metalmecánica y la minería. Gerdau AZA cuenta con 120 canales de distribución en Chile y el 40% de sus ventas se realiza en forma directa a grandes clientes industriales. En Chile el principal competidor en el rubro es la Compañía de Acero del Pacífico (CAP). Gerdau AZA cuenta con dos plantas que producen tres grandes grupos de productos:

- ❑ Perfiles de acero: barras cuadradas, redondas barras planas barras hexagonales, ángulos, perfiles estrella y Pernos.
- ❑ Barras de acero para hormigón armado: para losas y muros, vigas y columnas, muros de contención, estanques de agua, edificios en altura, represas, diques, pavimentos en general y de aeropuertos.
- ❑ Alambrón: producto de sección maciza redonda que se utiliza para la fabricación de mallas electrosoldadas, trefilación de alambres, fabricación de clavos, etc.

Tanto las barras de acero como el alambrón son producidos en la misma línea de producción y darán motivo a este proyecto.

Identificación del proceso productivo.

El proceso de producción del acero de la empresa comienza cuando el horno eléctrico es abastecido con la chatarra, principal materia prima e insumo para el proceso de Fusión. El metal fundido alcanza temperaturas superiores a 1500° C, resultando en el acero en forma líquida. Después de la fusión, el acero es transportado al Horno Cuchara. En la Cuchara, se añaden las aleaciones al acero y ocurre la homogeneización química y térmica. Proceso conocido como Refino Secundario. El acero es transportado a la Colada Continua, donde se distribuye en diversos venos, en moldes de enfriamiento en forma de Palanquillas o Bloques. En el Horno de Recalentamiento, la temperatura se eleva una vez más para permitir el proceso de Laminación.

El proceso de laminación ocurre en un conjunto de cajas del tren laminador y el producto final asume la forma de rollos o barras. Para el caso de Rollos, el Bloque recibe la palanquilla laminada directamente de las cajas del Acabador produciendo el laminado en rollos (Alambrón). A su vez, el Alambrón es el acero que se presenta en forma de bobinas, que serán usadas después en la Trefilación. La Trefilación es la conformación mecánica realizada en frío para reducir el diámetro del producto conforme a la especificación del cliente. Acumulado en forma de bobina, el hilo de acero será materia prima en la producción de productos comerciales.

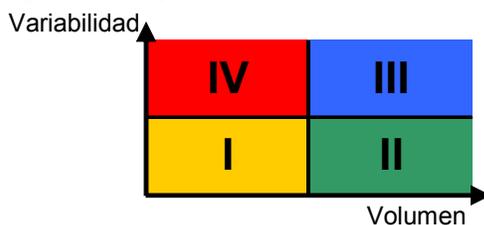
2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La problemática se divide en tres puntos relevantes como lo son la planificación manual, los quiebres de stock y el error de pronóstico de demanda:

2.1 Planificación

Actualmente, la empresa cuenta con 125 productos vigentes pertenecientes al grupo de alambrón y barras de acero para hormigón armado. La planificación y programación (scheduling) de los productos se lleva en forma manual, apoyada de planillas Excel que en base a la información extraída del sistema de administración SAP, utilizan reglas de producción. Entre las reglas destacan la segmentación de los productos según la regla del 80-20 y la clasificación de estos en cuadrantes, de tal manera que los cuadrantes IV y III de alta variabilidad se consideran como productos a pedido.

Fig1. Escartograma



Además, el tamaño de la orden mensual de producción, se define “llenando el VASO” para cada producto, esto es según la siguiente fórmula:

$$\text{VASO}_{it} = V_{it} + SS_i = V_{it} + Z_i \times \sigma C_i$$

Donde,

V_{it} : Venta estimada del producto i para el mes t

Z_i : Constante que representa nivel de servicio para el producto i

σC_i : Desviación estándar combinada, que recoge las desviaciones en la venta y en los tiempos de respuesta (producción) del producto i

$$\sigma C_i = \text{RAIZ} (\text{tr} \times \sigma d^2 + \sigma c^2 \times \text{dd}^2)$$

tr = tiempo medio de respuesta de producción

σd^2 = Varianza de la demanda (ventas)

σc^2 = Varianza del tiempo de respuesta

dd^2 = Demanda media al cuadrado (ventas)

Fuente: *GESTION DE LA PRODUCCION INDUSTRIAL*

De Brandosale A., Pozzetti A., SianesiA. - Primera Edición – 1991

Luego, la cantidad a producir del producto i en el mes t (Q_{it}) está dada por la cantidad necesaria para llenar el VASO, es decir, la diferencia entre el VASO definido para el producto y el stock disponible del producto i al inicio de t (Stock_{it}):

$$Q_{it} = \text{VASO}_{it} - \text{Stock}_{it}$$

La dificultad radica en que la cantidad a producir no tiene alguna medida de eficiencia productiva como costos de setup y productividad, tampoco considera explícitamente la situación de los meses siguientes, ni la interacción con las cantidades a producir de los otros productos dado que la capacidad es limitada. Por ejemplo en la tabla 3, para el producto 1 podría ser ventajoso producir más de 84 ton, para anticiparse a la alta demanda de los próximos meses. Por otro lado, en el caso del producto 3, el Q_{it} solicitado podría ser muy alto, por lo que se debe decidir cuánto producir de manera de no provocar quiebres en otros productos de importancia y/o determinar la factibilidad de producirlo en más de una campaña¹ en el mes. Además, si Q_{it} resulta ser inferior al lote mínimo de producción, como en el caso del producto 5, se debe decidir si producir una cantidad mayor o igual a ese lote ó no producirlo.

Fig 2. Tabla Cantidades a producir Q_{it}

Producto	Cantidad a Producir (ton)		
	Agosto	Sept.	Octubre
1	84	141	141
2	444	212	212
3	1.215	775	775
4	510	307	307
5	14	12	12
...100

Una decisión como producir en una sola campaña lo necesario para el mes de dos o tres productos puede llegar a tomar hasta cinco días de producción, en los cuales se podría haber producido otros productos. Pese a ello, el output que entrega la planificación actual es la cantidad a producir en el mes de cada producto pero sin considerar lotes eficientes.

Si bien existen reglas que permiten tomar una decisión para un producto en particular, cada decisión afecta a los demás productos por lo que considerando al menos dos alternativas discretas de producción para cada producto, como podría ser “Producir 50 toneladas más de lo indicado por Q_{it} ” y “Producir 50 toneladas menos de lo indicado”, para un total de 99 SKU, en el caso de las barras para hormigón, se tienen 2^{99} planes de producción diferentes. Hoy la planificación se realiza con el apoyo de planillas Excel, pero no se tiene un criterio de eficiencia común y, decisiones como las ejemplificadas anteriormente, sólo son realizadas de forma manual.

2.2 Quiebres de stock

La situación de los quiebres de stock, la cantidad demanda (toneladas) que supera el stock disponible para la venta (stock útil <0), en el periodo actual es bastante compleja, ya que sólo en agosto hubo 36 productos que estuvieron en promedio 10 días en esa situación. De los 36 productos, 11 pertenecen al grupo que conforma el 80% de la venta “cuadrante II”, a los cuales la empresa da prioridad por sobre el resto. La magnitud del quiebre es de relevancia puesto que se contabilizaron en promedio 2835 toneladas de quiebre (17% de la venta promedio) en las semanas comprendidas entre mayo y

¹ Orden de producción o número de veces en que se produce el producto en un determinado período.

octubre 2009. La principal explicación es el bajo stock con que cuenta el periodo, por lo que una correcta programación es determinante. Los gráficos que reflejan lo expuesto, se muestran a continuación:

Fig 3. Gráfico N° de productos quebrados. Elaboración propia, datos sistema SAP.

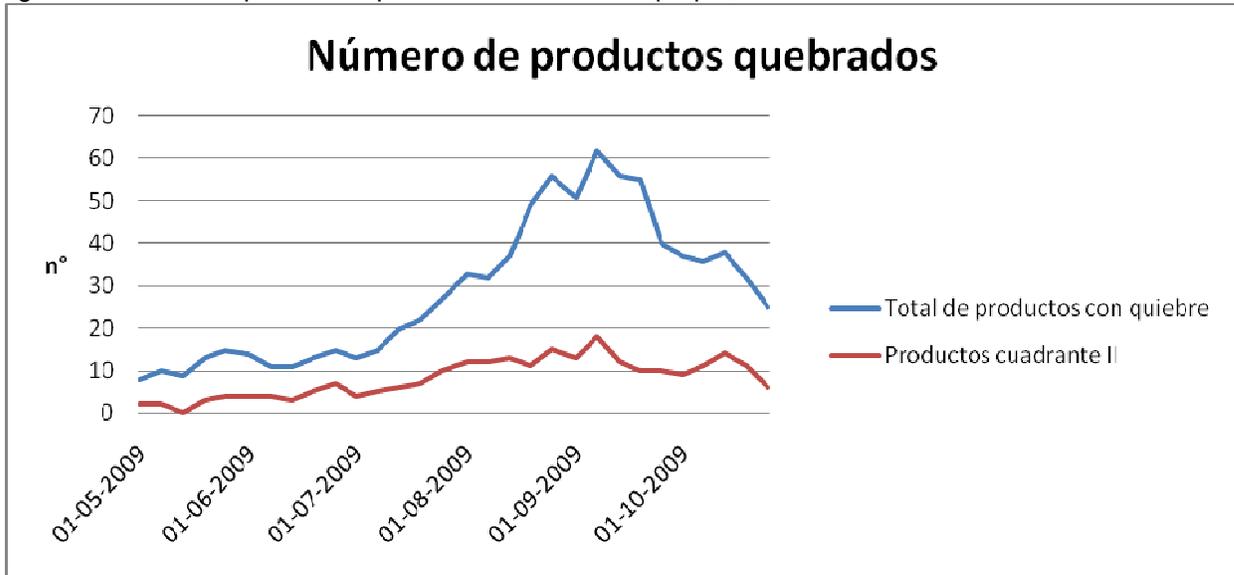


Fig 4. Gráfico. Promedio de días de quiebre. Fuente elaboración propia. Elaboración propia, datos sistema SAP.

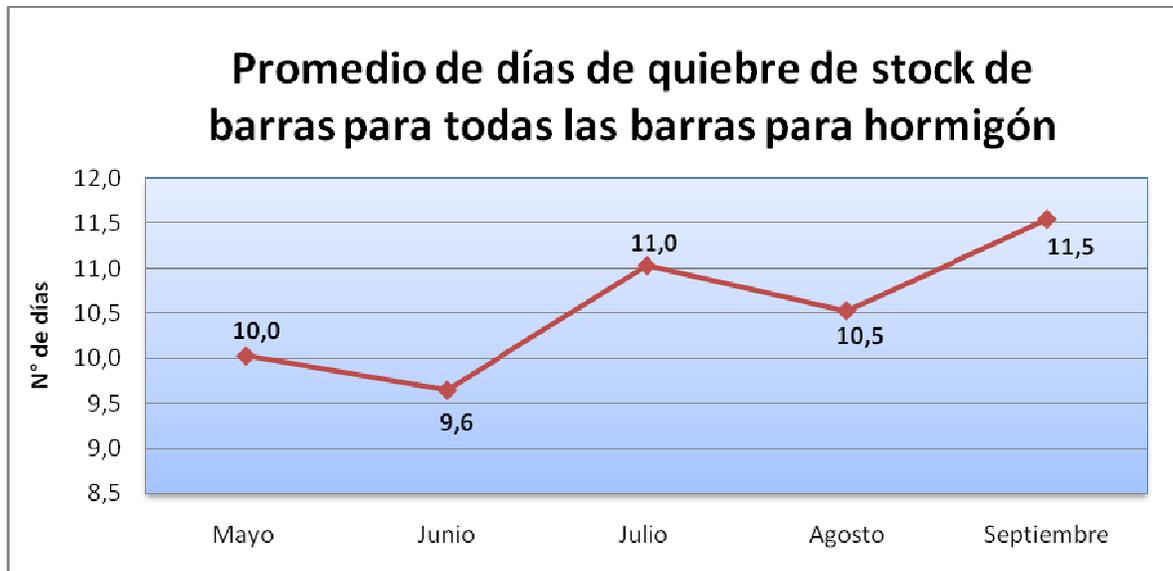
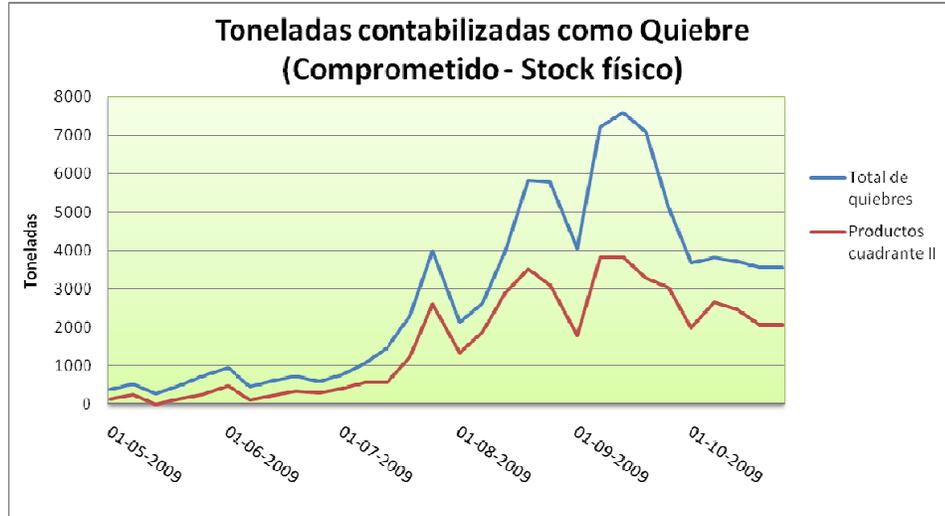


Fig 5. Gráfico Toneladas de quiebre B.Hormigón. Fuente elaboración propia.



2.3 Estimación Demanda

La estimación de ventas para la línea de Barras de Hormigón y Alambón se realiza de manera agregada por línea de producto. El proceso de estimación a nivel agregado considera una proyección anual de largo plazo, para luego una estimación del comportamiento mensual del mercado que considera el consumo aparente a nivel nacional² y el Market Share que se desea alcanzar. La estimación de mercado es contrastada con la consulta directa a los clientes, que se obtiene del feedback recibido por los vendedores, y de esa manera se llega a una estimación total por Línea de productos (B. Hormigón – Alambón).

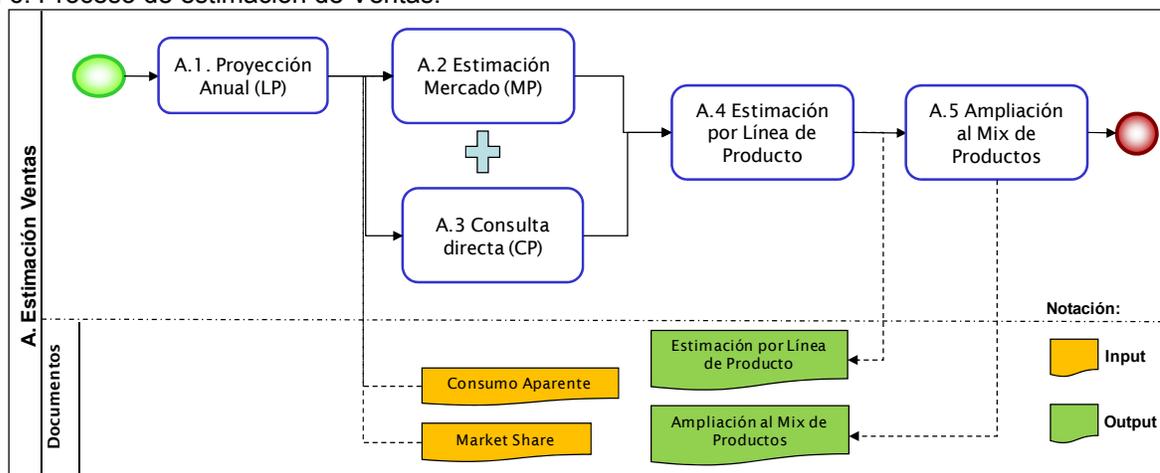
Finalmente, la estimación por línea de producto es ampliada al Mix de productos, es decir, se desagrega para todos los SKU. Para ello se pondera la Venta estimada línea de producto para el mes t por el porcentaje que representa cada producto de las ventas totales de los cuatro o seis meses anteriores, esto es:

$$\boxed{\text{Venta estimada línea de producto para el mes } t} \times \boxed{\text{Porcentaje que representa el producto } i \text{ del total de ventas de la línea}} = \boxed{\text{Venta estimada del producto } i \text{ para el mes } t (f_{it})}$$

El diagrama del proceso de estimación es el siguiente:

² Consumo aparente = Producción local + Importaciones – Exportaciones

Fig 6. Proceso de estimación de Ventas.



Fuente: elaboración propia

El problema es que mientras que la estimación de Mercado ha llegado a tener diferencias por sobre las 4000 toneladas con la venta real (25% error agregado c/r a la venta), la ampliación al mix de productos puede tener diferencias absolutas por sobre las 7000 toneladas en total. El error se hace aún más relevante en situación de bajo stock que permita sobrellevar la demanda y es uno de los principales inputs a mejorar para, a su vez, mejorar el proceso. La siguiente tabla muestra el error a nivel agregado hasta julio 2009:

Fig 7. Tabla Error de pronóstico a nivel agregado.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Estimado	20.105	21.800	19.377	22.287	17.017	17.041	18.254
Real	16.430	13.198	18.673	17.305	19.914	18.308	22.276
ERROR	3.675	8.602	704	4.982	-2.897	-1.267	-4.021

El impacto económico del proyecto es de gran consideración. No satisfacer el 1% de la demanda mensual (quiebre de stock) significa un total de US\$ 21.557³, según el margen de venta o costo de oportunidad promedio (la tasa actual de quiebre es de un 17%). Además, sólo en tiempos de setup se gastan en promedio US\$ 50.000⁴. Cabe destacar que las cifras mencionadas están calculadas al precio actual, el cual está en su punto más bajo.

³ \$11.942.578, dólar observado al 10 de octubre del 2009 de \$554.

⁴ \$27.700.000, dólar observado al 10 de octubre del 2009 de \$554.

3 OBJETIVOS

Objetivo General: Mejorar el proceso de planificación y programación de la producción.

Objetivos específicos:

- Disminuir los quiebres de stock.
- Determinar cantidades eficientes a producir en términos de costos de setup, tiempo empleado y quiebres de stock.
- Mejorar el pronóstico de demanda, reducir su variabilidad.

4 ALCANCES Y ENTREGABLES

Se espera desarrollar una herramienta formal de programación matemática que permita obtener cantidades eficientes de producción por periodo, de manera de minimizar los costos por quiebres de stock considerando múltiples variables y restricciones relevantes. Se espera capturar en el modelo “Comportamientos conocidos”, pero no utilizados completamente como: la estacionalidad de cada semana, importancia de algunos productos, la rotación de inventario y las restricciones productivas. Aspectos técnicos como software utilizado, factibilidad de implementación e interfaz del usuario no serán objeto de estudio. Además, se espera tener una herramienta formal que permita simular escenarios y apoyar decisiones, tales como, importar producto.

Esta memoria esta en el marco del proceso de Planeación de ventas y operaciones, Sales and Operations Planning (S&OP), que implementa la empresa con el fin de que los planes tácticos de todas las Áreas tengan el mismo objetivo de negocio. En este caso se busca consensuar el requerimiento de ventas con la oferta disponible de producción.

5 MARCO CONCEPTUAL

Problema de planificación

La planificación en las empresas es un proceso por el cual cada uno de los departamentos organiza sus recursos en el tiempo con el objeto de optimizar su uso y conseguir así el mayor beneficio posible.

Existen diferentes niveles de planificación en función del horizonte de tiempo:

La **planificación estratégica** afecta, como indica su nombre, a las decisiones estratégicas de la empresa. P.ej., el lanzamiento de nuevos productos o la incorporación de nuevas tecnologías. El horizonte de esta planificación varía, según los casos, entre 1 y 3 años.



Fig 8. Esquema horizonte de planificación.

La **planificación agregada** determina los niveles de producción, inventario y mano de obra necesarios, en un horizonte de planificación determinado, para satisfacer la demanda. Su uso está más extendido de lo que en principio puede parecer, principalmente, en lo referente a los niveles de mano de obra. El horizonte puede comprender desde 1 mes hasta 1 año.

La **planificación maestra de producción (PMP)** corresponde a la planificación de los productos con demanda independiente y es consecuencia de la planificación agregada. Esta planificación es típica de empresas que son proveedores de la industria de montaje, como coches, electrodoméstico. La empresa de montaje facilita a sus proveedores la planificación maestra de sus artículos, para que los proveedores puedan preparar las entregas. El horizonte puede variar entre 1 semana y 1 mes. **Esta es la planificación a la que apunta esta memoria.**

La **planificación de necesidades (MRP)** deriva de la planificación maestra y centra su acción en los productos con demanda dependiente. En este tipo de planificación se hace imprescindible la utilización de medios informáticos en su ejecución. El horizonte es el mismo que el de la planificación maestra.

Por último, la **planificación detallada** prepara el programa de fabricación que realizará cada máquina y cada operario. Normalmente se realiza cada semana, aunque en algunas empresas se planifica más de una vez al día. Es el nivel de planificación más complejo.

En este último nivel los intentos de automatización han sido numerosos, pero la aleatoriedad de muchas variables básicas para la planificación final, hace que la intervención de un responsable para tomar decisiones sea imprescindible. Sin embargo, existen empresas con un uso intensivo de software que apoya este proceso.

A medida que se desciende en el horizonte de planificación, existe un mayor número de variables que afectan a la toma de decisiones y que pueden sufrir desviaciones

importantes obligando a replanificar, desechando la planificación realizada. Paralelamente, a medida que se desciende en el horizonte de planificación, es menor el número de empresas que lleva a cabo la planificación correspondiente a ese nivel, es decir, las desviaciones en las variables que gobiernan el proceso de planificación, desaniman a las empresas a realizarla. Además, en dichos niveles la planificación puede ser muy compleja.

Pronóstico

Los pronósticos apoyan la toma de decisiones en distintas áreas de la dirección de empresas: el pronóstico de ventas ayudará a diseñar el plan de producción, el pronóstico de evolución de precios de materias primas, suministros etc. Los más usados son modelos matemáticos de pronóstico, datos históricos del comportamiento de ventas o evaluaciones preparadas por los representantes de cada departamento de la empresa. Además permiten mayor flexibilidad en la elaboración de los planes, sobre todo cuando se sirve de los métodos de múltiples escenarios.

Tipos de pronóstico

Es posible articular la diversidad de métodos e instrumentos para el pronóstico atendiendo a ciertos criterios.

- 1) En primer lugar se les puede clasificar atendiendo a la diferencia entre **métodos cualitativos** y **métodos cuantitativos**.

Entre los **métodos cualitativos**, también denominados “intuitivos”, se encuentran, por ejemplo, el **método Delphi**, donde un grupo de expertos responde un cuestionario, **Investigación de mercado**, en base a encuestas y entrevistas y **Consenso grupal**, basado en un intercambio abierto entre profesionales.

Entre los métodos cuantitativos se encuentran los **modelos causales** y **las series de tiempo**.

Los pronósticos basados en **modelos causales** se componen de:

- a. Análisis de regresión
- b. Modelos econométricos
- c. Modelos de entrada / salida
- d. Indicadores guía

Los pronósticos basados en el **análisis de series de tiempo** incluyen:

- a. Promedios móviles
- b. Promedio móvil ponderado
- c. Suavización exponencial
- d. Análisis de regresión
- e. Series de tiempo de Shiskin
- f. Proyecciones de tendencia
- g. **Box Jenkins o ARIMA**

Un modelo **ARIMA o autorregresivo** integrado de media móvil es un modelo estadístico que utiliza variaciones y regresiones de datos estadísticos con el fin de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro. Un modelo autorregresivo es aquel en que la variable endógena de un período t es explicada por las observaciones de ella misma correspondientes a períodos anteriores añadiéndose, como en los modelos estructurales, un término de error. Por ejemplo, un modelo AR de orden 1 tiene la siguiente expresión:

$$Y_t = f_0 + f_1 Y_{t-1} + a_t$$

Un modelo de los denominados de medias móviles es aquel que explica el valor de una determinada variable en un período t en función de un término independiente y una sucesión de errores correspondientes a períodos precedentes, ponderados convenientemente:

$$Y_t = m + a_t + q_1 a_{t-1} + q_2 a_{t-2} + \dots + q_q a_{t-q}$$

Tipos de modelo ARIMA

Fig 9. Tabla tipos de modelos ARIMA.

AR (AUTO REGRESIVO)	$y(t) = \phi_1 * y(t-1) + \dots + \phi_p * y(t-p) + a(t)$ $\phi(B) = 1 - \phi_1 * B - \phi_2 * B^2 - \dots - \phi_p * B^p$
MA (media móvil)	$y(t) = a(t) - \theta_1 * a(t-1) - \dots - \theta_q * a(t-q) = \theta(B) * a(t)$ $\theta(B) = 1 - \theta_1 * B - \theta_2 * B^2 - \dots - \theta_p * B^p$
ARMA	$y(t) = \phi_1 * y(t-1) + \dots + \phi_p * y(t-p) + a(t) - \theta_1 * a(t-1)$ $\phi(B) * y(t) = \theta(B) * a(t)$
ARIMA (ARMA integrativo)	$\phi(B) * \nabla^d y(t) = \theta(B) * a(t)$ $\nabla^d y(t) = (1 - B)^d * y(t)$
SARIMA (ARIMA estacional)	$\phi_p(B) * \phi_p(B^S) * \nabla^d \nabla^D y(t) = \phi_p(B) * \phi_q(B^S) * a(t)$
SARIMAX (SARIMA estacional)	$A(q) * y(t) = B(q) * u(t) + C(q) * a(t)$

Donde:

$y(t)$: demanda al tiempo t

$u(k)$: temperatura al tiempo t

B : operador de retardo $\rightarrow y(t-m) = B^m * y(t)$

p : orden del proceso RA

$a(t)$: error del pronóstico

q : orden del proceso MA

d : orden del proceso de diferenciación

S : periodo estacional

- 2) En segundo lugar, los métodos de pronóstico pueden clasificarse según tipos de informaciones a obtener: si se trata de describir un estado futuro podrán emplearse métodos descriptivos –como el pronóstico de tendencias-; en cambio, si se quiere predecir otros factores y elementos del estado futuro, además de describir ese estado, se debe indagar sobre qué factores o procesos condicionarán o provocarán esa situación, y entonces deberá emplearse algún método de exploración. Este los métodos de exploración cuantitativa se cuentan el pronóstico de statu-quo y los **modelos de simulación**.
- 3) Métodos para la preparación de decisiones de planificación: aquí pertenecen todos los instrumentos que facilitan la comunicación entre los equipos y responsables de la toma de decisiones de planificación y los métodos para mejorar la “participación” (de clientes, proveedores, socios, etc. en la empresa; de ciudadanos en procesos de la Administración; de afectados en otros planes como hospitales, enseñanza etc.).

Herramientas para la estimación

El filtro de Hodrick-Pescott es un método para extraer el componente secular o tendencia de una serie temporal. Descompone la serie observada en dos componentes, uno tendencial y otro cíclico. El ajuste de sensibilidad de la tendencia a las fluctuaciones a corto plazo es obtenido modificando un multiplicador λ . Es actualmente una de las técnicas más ampliamente utilizada en las investigaciones sobre ciclos económicos para calcular la tendencia de las series de tiempo, pues brinda resultados más consistentes con los datos observados que otros métodos.

Nivel de Servicio

Se llama intervalo de confianza en estadística a un par de números entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido con una determinada probabilidad de acierto. Formalmente, estos números determinan un intervalo, que se calcula a partir de datos de una muestra, y el valor desconocido es un parámetro poblacional. La probabilidad de éxito en la estimación se representa por $1 - \alpha$ y se denomina **nivel de confianza o de servicio**. En estas circunstancias, α es el llamado error aleatorio o nivel de significación, esto es, una medida de las posibilidades de fallar en la estimación mediante tal intervalo.

Si el tamaño de las muestras es lo suficientemente grande, la distribución de medias muestrales es, prácticamente, una distribución normal (o gaussiana) con media μ y una

desviación típica dada por la siguiente expresión: $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Esto se representa como

sigue: $\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$.

Finalmente, la estandarización construye:

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = Z \sim N(0, 1)$$

El z que hace $P[z_1 \leq z \leq z_1] = 1 - \alpha$, donde $(1 - \alpha) \cdot 100$ es el porcentaje deseado, es ampliamente utilizado en gestión de operaciones, para determinar el nivel óptimo de stock o de productos a producir (típicamente $m + z \cdot \sigma$) para cumplir con el nivel de servicio deseado.

Segmentación

El Análisis de clúster tiene como propósito esencial, agrupar aquellos objetos que reúnan idénticas características, es decir, se convierte así en una técnica de análisis exploratorio diseñada para revelar las agrupaciones naturales dentro de una colección de datos. Este análisis no hace ninguna distinción entre variables dependientes y variables independientes sino que calcula las relaciones interdependientes de todo el conjunto de variables.

El análisis de clúster utiliza en mercadotecnia para diversos propósitos, entre los que se encuentran:

- **Segmentación del mercado**
- **Comprensión del comportamiento del comprador**
- **Identificación de oportunidades para productos nuevos**
- **Selección de mercados de prueba**
- **Reducción de datos**

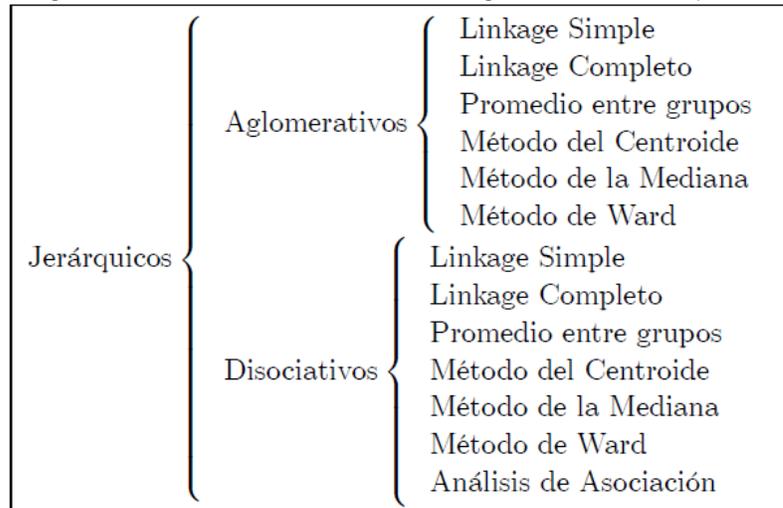
Métodos jerárquicos: El objetivo es agrupar clúster para formar uno nuevo o separar alguno ya existente para dar origen a otros dos de forma que se maximice una medida de similaridad o se minimice alguna distancia.

Clasificación:

- **Asociativos o Aglomerativos:** Se parte de tantos grupos como individuos hay en el estudio y se van agrupando hasta llegar a tener todos los casos en un mismo grupo.
- **Disociativos:** Se parte de un solo grupo que contiene todos los casos y a través de sucesivas divisiones se forman grupos cada vez más pequeños.

Los métodos jerárquicos permiten construir un árbol de clasificación o **dendograma**.

Fig 10. Clasificación de Métodos de segmentación Jerárquicos.



El **método de Ward**, aplicado en esta memoria, utiliza la distancia entre clases que cumple con el objetivo de unir, en cada paso del proceso de aglomeración, las dos clases que incrementen menos la inercia intraclasses. Sean A y B dos clases no vacías y disjuntas y sean p_A , p_B y g_A , g_B sus pesos y centros de gravedad, respectivamente. La distancia de Ward entre los dos grupos, en función de la distancia euclidiana canónica d , viene dada por:

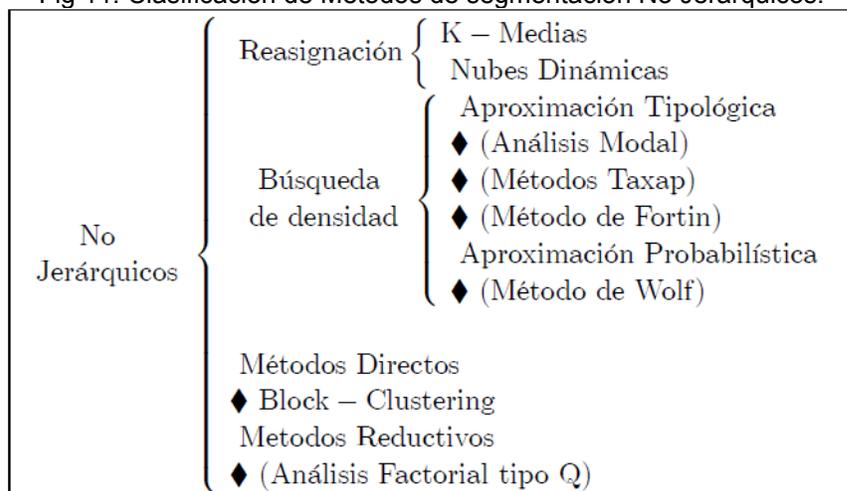
$$W(A, B) = \frac{p_A p_B}{p_A + p_B} d^2(g_A - g_B)$$

En particular para dos individuos i y l , con pesos p_i y p_l , la distancia de Ward es:

$$W(i, l) = \frac{p_i p_l}{p_i + p_l} d^2(i, l)$$

Métodos no jerárquicos: Están diseñados para la clasificación de individuos (no de variables) en K grupos. El procedimiento es elegir una partición de los individuos en K-grupos e intercambiar los miembros de los clusters para tener una partición mejor.

Fig 11. Clasificación de Métodos de segmentación No Jerárquicos.



6 METODOLOGÍA

1. Medición de situación y modelamiento demanda.

- 1.1. Medición de información relevante en la planificación, como nivel de inventario, nivel de servicio y restricciones productivas.
- 1.2. Revisión teórica de posibles soluciones a los problemas de planificación de producción a través de información bibliográfica (Libros, Memorias, papers específicos).
- 1.3. Modelar la demanda de los SKU que participan en la planificación:
 - i. Se cargarán los datos de ventas mensuales
 - ii. Se segmentará la información disponible de ventas por periodo.
 - iii. Se hará un análisis de comportamiento según distribución de probabilidad, factores de estacionalidad, tendencia y autocorrelación.
 - iv. Se realizará un pronóstico para un periodo representativo histórico y se comprobará si es posible implementar en el actual periodo.
 - v. Se propondrá un pronóstico agregado.
 - vi. Se analizará la actual ampliación al mix de productos.
 - vii. Se agruparan productos de similar comportamiento para estimar su demanda a nivel agregado. La información será estandarizada con el fin de detectar similitudes.
 - viii. Se propondrá el modelo de estimación.

2. Construcción de modelo de planificación

- 2.1. Construcción de modelo matemático, levantamiento de restricciones, costos y supuestos involucrados.
- 2.2. Definición de modelo lineal mixto.

3. Validación del modelo

- 3.1. Análisis de sensibilidad.
- 3.2. Evaluación del impacto económico.

7 MODELAMIENTO DE DEMANDA

7.1 Segmentación del periodo de estudio

Realizando un análisis de componentes principales ACP, de las ventas mensuales del periodo 2000-2009, se determina que existen al menos cuatro componentes o sub-periodos que presentan comportamientos diferentes y explican un 92,5% de la varianza. Los sub periodos, ordenados cronológicamente, se resumen en la siguiente tabla:

Fig 12. Tabla Sub-periodos representativos, fuente ACP - SPSS.

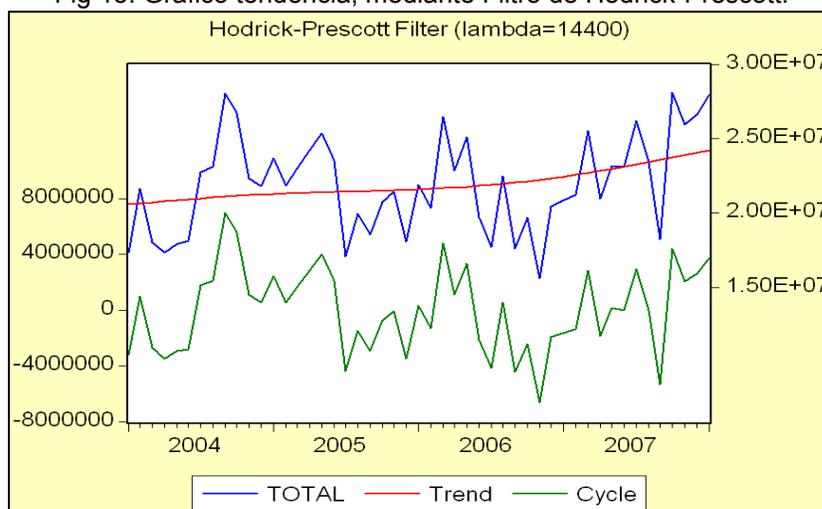
Componente	Sub Período	Varianza explicada (%)
3	Enero 2000 – Febrero 2002	19,917
4	Marzo 2002-Marzo 2003	18,372
1	Abril 2003 – Agosto 2008	33,355
2	Septiembre 2008-Julio 2009	18,372

Dado que se requiere un análisis representativo y actual, se considerará el periodo Abril 2003 - Agosto 2008 como primer foco de atención, para luego replicar lo realizado en el periodo actual.

7.2 Análisis de un período representativo

Mediante el software E-Views, se estudia el período abril 2003 – agosto 2008. Al aplicar a la venta agregada mensual el filtro de Hodrick-Prescott que permite aislar y visualizar la componente de tendencia, se observa una tendencia positiva que, sobre todo entre el 2006-2008, pareciera ser lineal. El gráfico obtenido es el siguiente:

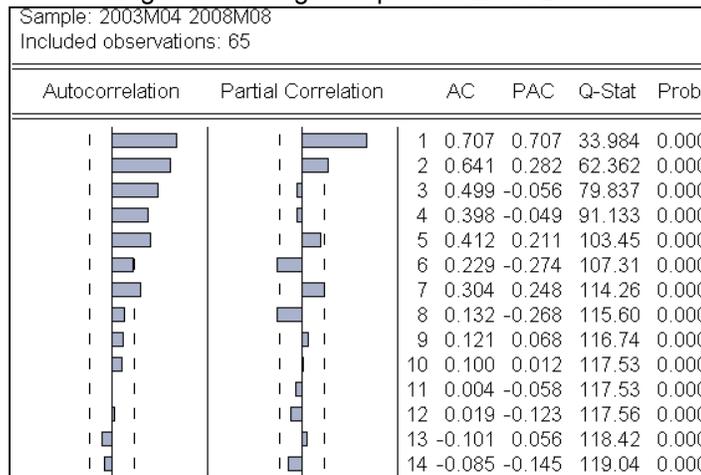
Fig 13. Gráfico tendencia, mediante Filtro de Hodrick-Prescott.



Además del gráfico, la función de autocorrelación, como se muestra en la figura siguiente, sugiere la presencia de una serie no estacionaria, ya que los coeficientes de

autocorrelación AC entre los meses en estudio tienden a cero lentamente, al contrario de una serie estacional donde estos deben decrecer exponencialmente.

Fig 14. Correlograma periodo 2003-2008.

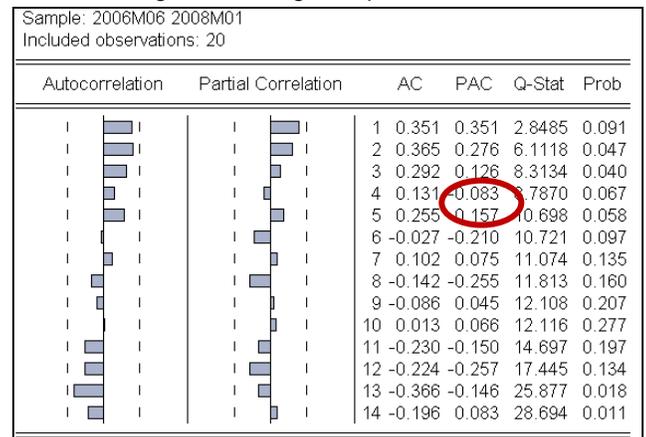


7.3 Pronóstico agregado según venta histórica.

Contando únicamente con información de las ventas históricas, se busca un modelo de pronóstico que siga una estructura determinada y que apoye la proyección actual que se realiza según el Market-share (participación de mercado) y la consulta directa a clientes (en especial ante variaciones de precio). Se selecciona el periodo junio 2006 a enero 2008, ya que presenta un patrón de tendencia sostenido que, como se analiza en el punto siguiente (d), es similar al periodo actual.

Fig 15. Correlograma periodo 2006 -2008

Del análisis previo en (b), se incorpora un término autorregresivo no estacional, para el periodo de orden 4, debido a que el coeficiente de auto correlación parcial se hace negativo en el cuarto rezago. También, se incluye el efecto negativo en las ventas de septiembre dado que se tienen menos días hábiles por fiestas patrias y se utiliza un término MA(12) que recoge información de los residuos de 12 meses atrás según su media móvil, es decir, lo que sucedió hace un año afecta lo que sucederá hoy. Finalmente, se propone un modelo de estructura similar a un ARMA (caso particular de las series ARIMA) para el periodo:



$$\text{Demanda Agregada} = \text{Media móvil de los residuos}(12) + \text{Autorregresivo}(4) + \text{Tendencia} + \text{Constante} + \text{Septiembre}$$

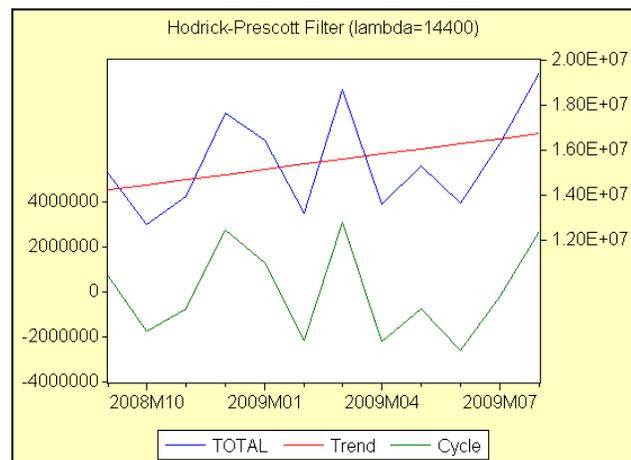
La regresión arrojó un R-squared (R^2) igual a 0,9689 lo cual es muy cercano a uno y equivale a un excelente ajuste. Luego se valida el pronóstico realizando un forecast o pronóstico de los meses siguientes a la regresión (febrero - marzo 2008), para el cual se tuvo un error medio absoluto de un 12,35% y un 2,69% para febrero y marzo 2008 respectivamente, es decir, en promedio para los dos meses se tiene un 7,52% de error

medio absoluto y una desviación del error del 6,83%. Incluso, un forecast desde febrero hasta agosto 2008, presenta un error medio absoluto de un 9,41%, siendo esto un resultado muy satisfactorio. Finalmente, se considera representativa la estructura tipo ARIMA del pronóstico, y se procede a testear su validez en el periodo actual.

7.4 Período actual, crisis económica 2008- 2009

Aplicando lo anterior, se realiza idéntico análisis para el período septiembre 2008 - agosto 2009, caracterizado por una venta muy inestable y reducida, debido a la crisis económica que se hizo notoria a partir de septiembre 2008, pero que contiene una tendencia marcada como el periodo anteriormente en estudio. El siguiente gráfico refleja lo señalado:

Fig 16. Tendencia periodo 2008-2009 según filtro de Hodrick-Prescott



Si bien se propone una estructura muy similar la regresión del periodo antes estudiado, se observó en el correlograma, adjunto en anexo, que el coeficiente de autocorrelación tiende más pronto a cero, por lo que el término autorregresivo es de un orden inferior. Además, se utiliza un término de media móvil de los residuos de orden 4, debido a que se reduce el intervalo de estudio. El modelo propuesto para el periodo sigue la siguiente estructura:

$$\text{Demanda Agregada} = \text{Media móvil de los residuos}(4) + \text{Autorregresivo}(5) + \text{Tendencia} + \text{Constante}$$

Finalmente, el modelo obtiene un R^2 de 0,89 y un error promedio agregado de un 10% promedio en el periodo mientras que la empresa un 14% de error. Se sugiere pronosticar la demanda agregada con apoyo de un modelo que siga la estructura de regresión estudiada, ya que existen patrones definidos de tendencia y autocorrelación, por lo que la demanda no debería estar fuera de un intervalo definido. Por otra parte, el modelo no incluye perturbaciones como la importación dentro del mercado nacional, precio y la consulta directa a clientes, información no disponible para el análisis realizado, pero que sí posee el Área de Ventas. El gráfico y tabla que reflejan lo anterior, se muestra a continuación.

Fig 17. Gráfico Comparación de error de estimación

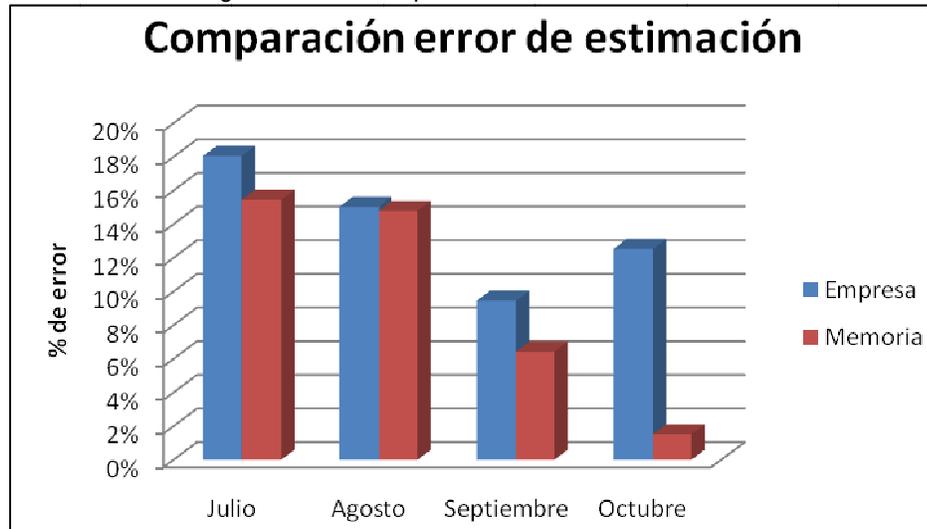


Fig 18. Tabla errores de pronóstico.

Error de Pronostico	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Empresa	18%	15%	9%	13%
Memoria	15%	15%	6%	2%

7.5 Caracterización de productos

Con objeto de disminuir el número de SKU's que analizar (99 en total), se aplican técnicas de segmentación. Para ello se utilizan las variables de venta, presencia en pedidos y margen de cada producto. Los datos son estandarizados para eliminar el riesgo de que algunas variables pesen más que otras en la segmentación. En primer lugar, se realiza una segmentación jerárquica utilizando el programa computacional SPSS mediante el método de Ward, con el fin de determinar el número de clúster a utilizar en la posterior segmentación no jerárquica, el resultado indica que una cantidad aproximada de 3, 4 o 5 clúster puede ser la adecuada de acuerdo al número de líneas que se cortan si se traza una vertical en el dendograma (adjunto en anexo). Corroborando lo anterior, se aplica la regla del codo graficando el "salto" (distancia final – distancia inicial) que tiene el coeficiente de distancia entre los conglomerados. Del gráfico se observa que los mayores saltos en distancia se registran con 9, 4 y tres conglomerados. Sin embargo, sólo a partir de 4 clúster se tiene un crecimiento sostenido de la distancia, es decir, los clúster se hacen más distintos entre ellos.

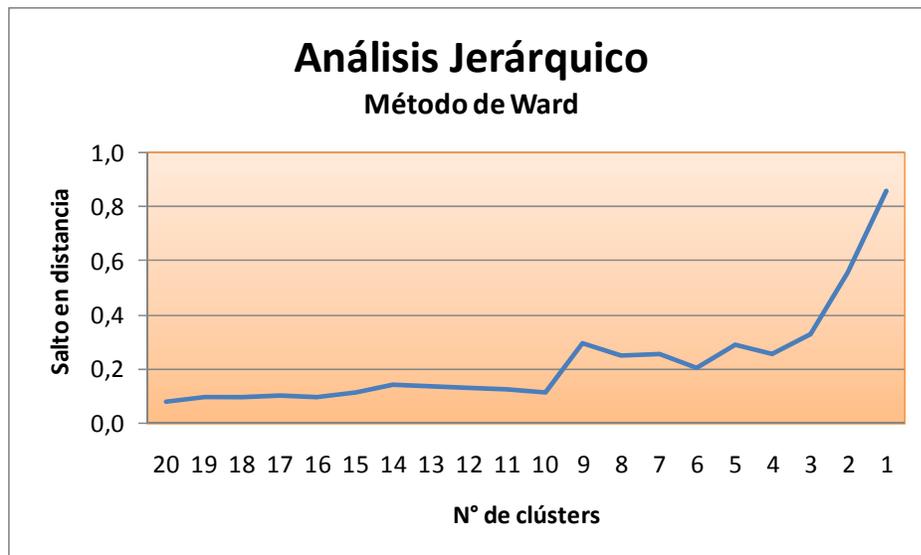


Fig 19. Gráfico de Análisis Jerárquico, con salto de distancia entre conglomerados.

Posteriormente, en SPSS se realiza el análisis no jerárquico de K-medias con el fin de clasificar los productos en clúster. Se determina un número de 4 clúster como representativo y se construye el siguiente gráfico con las variables de presencia en pedidos (porcentaje de pedidos en los que se encuentra el producto), margen según productividad (US\$/hr), y venta total durante el periodo 2009 (representada como el diámetro de la esfera):

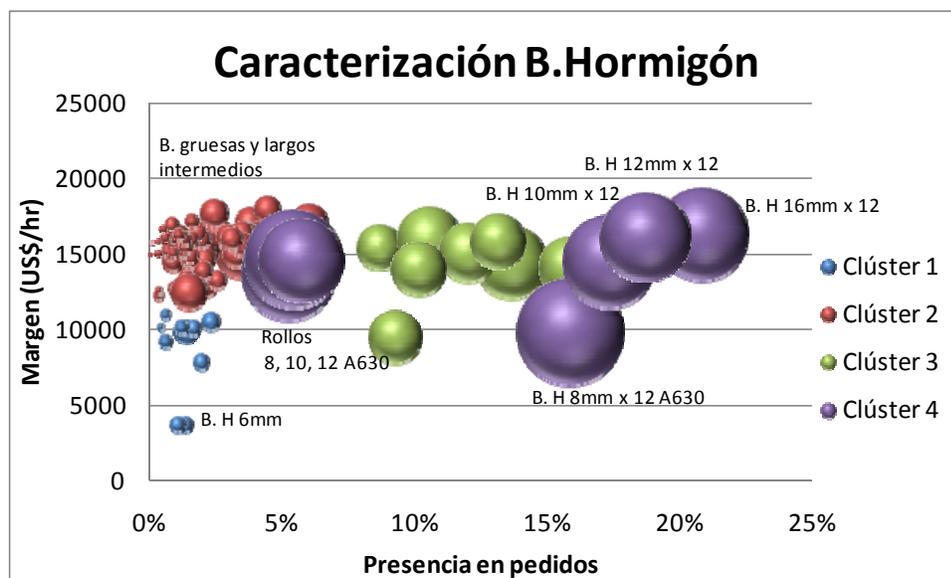


Fig 20. Gráfico de Caracterización B.Hormigón. Variables de Margen, Presencia y Venta.

La segmentación agrupa en el clúster 1, a diez productos de muy baja productividad (margen/hr), baja presencia y muy baja venta, sólo representan un 2% de la venta total. Estos productos no deberían mantenerse en stock, productos **a pedido**, y su producción debiera estar condicionada sólo a un alto margen y tonelaje.

El clúster 2, está formado por 72 productos que en total generan un 28% de la venta y está compuesto por barras de diámetro grueso y productos con medidas extraordinarias. Dado que las barras gruesas tienen alta productividad (mayor margen / hora) y, al igual que las medidas extraordinarias, son solicitadas esporádicamente, el Rol de este clúster se puede catalogar como de **Ocasional o Conveniencia**, según la caracterización propuesta por el Comité de Marketing-Merchandising de AECOC⁵ para la definición del surtido de productos.

El clúster 3, agrupa diez productos de moderada venta y presencia en pedidos que generan un 24% de la venta. Se puede catalogar al clúster con el rol de **Rutina**, es decir, como productos que comúnmente son solicitados.

Finalmente, el clúster 4 contiene siete productos que generan el 46% de la venta, de los cuales, cuatro tienen una muy alta presencia en pedidos (sobre el 15% de los pedidos contienen esos productos). Los tres productos restantes de menor presencia, corresponden a rollos, los cuales son adquiridos en gran volumen, pero por pocos clientes que tienen la capacidad de enderezarlos. Dadas las características de este clúster, se le puede catalogar con el rol de **Destino**, es decir, los productos que captan al cliente. El gráfico que resume la venta que genera cada clúster se muestra a continuación:

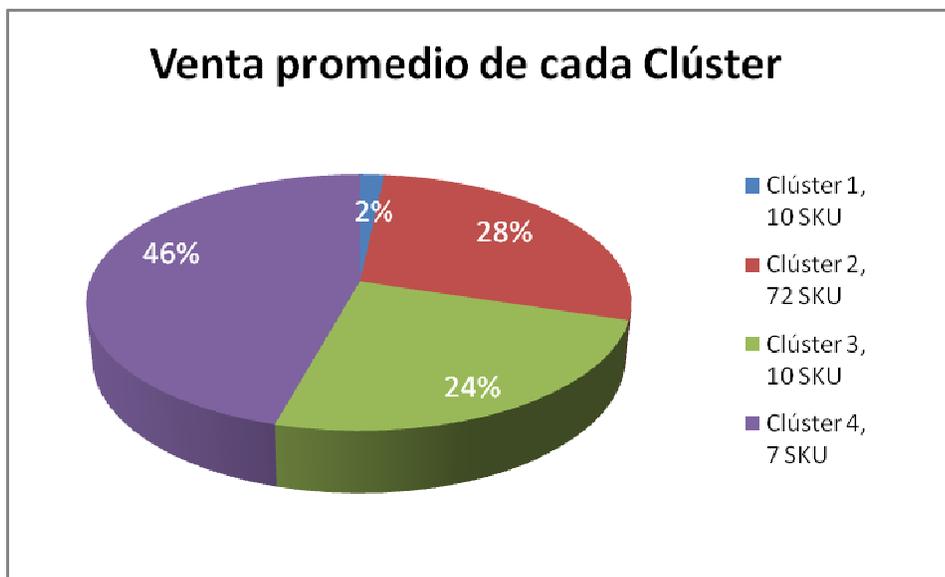


Fig 21. Venta promedio de cada Clúster.

La caracterización desarrollada, aporta una mejor distinción del mix de productos que la actualmente utilizada, dado que se consideran más variables relevantes, tales como, la rotación, el margen y venta. Con ello se pueden establecer distintas valoraciones al quiebre y diferentes niveles de servicio.

⁵ Asociación Española de Codificación Comercial, una de las mayores asociaciones empresariales de España que incluye servicios de investigación y consultoría en las áreas de Logística y transporte, Marketing-Área de la Demanda y Comercio Electrónico entre otras.

7.6 Pronóstico desagregado para cada producto.

Dada la gran cantidad de productos, el pronóstico de cada uno se calcula multiplicando el pronóstico agregado por el porcentaje de venta que ha representado históricamente el producto del total agregado. El error absoluto promedio en el pronóstico desagregado por producto es de un 57%, sin embargo, este varía según cada clúster, como se resume en la siguiente tabla:

Fig 22. Tabla error de pronóstico promedio según clúster a nivel desagregado.

Clúster	Rol	N° de SKU's	Error/venta	Desv. Error / venta
1	A pedido	10	95%	113%
2	Ocasional	72	69%	76%
3	Rutina	10	34%	37%
4	Destino	7	29%	33%

Se observa que el error del pronóstico desagregado es menor en los roles de Rutina y Destino. Lo anterior se explica por tener una mayor rotación o presencia en pedidos y, por lo tanto, se tiene menos variación en el porcentaje que representa el producto de la venta total cada mes. Además como es de esperar, el error por producto es mucho mayor que el pronóstico agregado.

Por otra parte, si se considera que Error = Demanda pronosticada – Demanda real, la suma de errores en varios periodos tenderá a cero. Por ello, la medida propuesta en la literatura es la desviación estándar del error según la fórmula:

$$Sf = \sqrt{\frac{\sum_t (At - Ft)^2}{N - 1}}$$

Donde,

Sf = error estándar del pronóstico

At = demanda real en t

Ft = Pronóstico para el periodo t

N = Número de periodos

Fuente: Ronald H. Ballou, Logística: administración de la cadena de suministro, Pearson Educación, 2004.

La medida posibilita considerar la distribución del error para cada producto, comprobándose que las distribuciones Weibull, Lognormal y Normal, son las más representativas de acuerdo al software estadístico StatFit (detalle en anexo). Por simplicidad y adecuado ajuste, se considera una distribución normal del error para cada producto y se asigna un nivel de servicio según el clúster o Rol definido:

Fig 23. Tabla niveles de servicios propuestos según Rol.

Clúster	Rol	Descripción	Nivel de servicio	Z
1	A pedido	No rentables	50%	0,00
2	Ocasional	De baja presencia	≥ 70%	0,52

3	Rutina	Solicitadas habitualmente	≥ 80%	0,84
4	Destino	Las más solicitadas	≥ 90%	1,28

Finalmente, un pronóstico con un 90% de confianza para el producto i en mes, estará dado por:

$$Y(i, mes) = F(mes) \pm z_{90\%} \times Sf$$

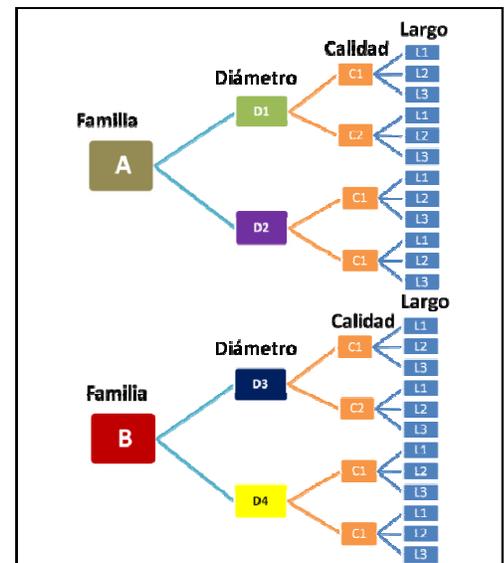
8 MODELO DE PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

8.1 Construcción del Modelo

Bajo la definición de quiebre como la cantidad demanda (toneladas) que supera el stock disponible para la venta, se construye un modelo de programación matemática para un horizonte de tres meses (15 semanas de 6 días cada una), que apoyándose de reglas eficientes de producción y bajo diversas restricciones y supuestos del problema, decide los productos y las cantidades que se deben producir en cada período para minimizar el costo total de quiebres y el tiempo de setup utilizado.

□ Las reglas de eficiencia son:

- Se tienen definidas familias de productos con setup eficientes que se distinguen por letras del alfabeto (A, B C, D, E, F, etc). Es decir, los productos que pertenecen a una familia tienen un tiempo de setup bajo al cambiar un producto dentro de la familia y alto si se cambia a un producto de otra familia. Se intenta por ello, producir la mayor cantidad de productos dentro de una familia antes de pasar a otra.
- Dentro de cada familia eficiente, se tienen distintos diámetros y dentro de cada diámetro, distintas calidades de acero y largos. Productos con distintos diámetros pueden tener igual calidad y largo, pero cada diámetro está asignado a sólo una familia eficiente.



- El orden de eficiencia de menor a mayor tiempo de setup es:
Cambiar largo < Cambiar calidad < Cambiar diámetro
- No es eficiente producir la familia dos veces en una semana, por ejemplo: no se debe producir la familia A, luego B y volver a producir A dentro de la misma semana.

- Se debe mantener un equilibrio entre lo que se produce de un producto y lo que se deja de producir de otro, es decir, una producción muy larga puede traer quiebres en otro, ya que se tiene sólo una línea de producción y el tiempo disponible es limitado.
- Por diámetro se debe producir como mínimo 50 toneladas. Una cantidad menor no es ni productiva ni económicamente eficiente.

Restricciones y supuestos del problema:

□ Capacidad productiva:

- Producción promedio ponderada (Ton/Hrs) = 51 Ton/hrs. Este valor varía según línea, familia y especificaciones del producto (Detalle en anexo).

□ Consideraciones por producto

- Existen productos que tienen mayor importancia que otros, aún cuando tengan una productividad/hora baja.
- Aceros gruesos (28, 32, 36 mm diámetro) necesitan una semana de envejecimiento para ser entregados.
- Existe la posibilidad de importar y exportar.
- Productos de exportación deben ser realizados antes de la fecha límite comprometida y exactamente la cantidad solicitada.
- Se debe producir productos de baja productividad al menos dos o tres veces al mes, con el fin de asegurar el suministro (palanquillas de acero) para la planta de perfiles de la compañía. Lo anterior, debido a que la producción de palanquillas, que es necesaria en la laminación, tiene una mayor productividad (ton/hrs) que el proceso de laminado de la planta en estudio, pero requiere tiempo para poder satisfacer la necesidad de la otra planta de la empresa, productora de perfiles.
- Por acuerdo comercial la familia de Alambrón no debe ser producido en las últimas semanas del mes.

□ Suministro

- El suministro para el proceso de laminado para la planta en estudio se considerará ilimitado, ya que la planificación de la compañía para asegurar el suministro no es parte del objetivo de este proyecto.

□ Inventario

- Capacidad teórica de bodega de 18.000 toneladas.

□ Costos

En el proceso de planificación intervienen tres costos relevantes:

Costo de quiebre: valorizado como el costo de oportunidad de vender el producto o el margen que se podría haber obtenido al venderlo. En promedio se utilizará un costo de quiebre de 141 US\$/Ton, pero los productos de mayor importancia, pertenecientes a la categoría de destino y rutina, tendrán un costo de quiebre de un 40% y 25% mayor al costo de quiebre real respectivamente. El porcentaje adicional se estimó según la representatividad de las soluciones recogidas y se acerca al factor que iguala el margen/hr entre un producto muy conveniente en términos productivos, pero poco

conveniente para el negocio, con uno muy importante para el negocio, pero no conveniente productivamente.

Costo de Setup: igual al gasto por combustible y energía que se tiene por mantener la temperatura en el proceso de laminado mientras no se está produciendo, además incluye el costo de horas hombre del personal y el material utilizado en el proceso. Este proyecto considerará un costo setup igual a US\$ 1000 /Hr.

Costo de inventario:

El costo de inventario está compuesto por el costo de mantenimiento, de aproximadamente 2 US\$/Ton (juicio experto), y el costo financiero. Este último, se estima según la tasa de descuento del Coste Medio Ponderado de Capital o en inglés **WACC (Weighted Average Cost of Capital)** que muestra el valor que crean las corporaciones para los accionistas y es también utilizado para la valorización de nuevas oportunidades de inversión. La tasa considerada es la de una empresa de similares características a la de estudio y cuya información es pública. El valor encontrado es de un 8,11% anual, el cual es llevado a términos mensuales según la siguiente fórmula:

$$(1 + r_{\text{anual}}) = (1 + r_{\text{mensual}}/12)^{12*1}$$

Despejando se obtiene una tasa de un 0,65% mensual, es decir, en un mes el capital rendirá 1,0065 veces el monto inicial. El siguiente gráfico, ilustra los costos bajo la misma unidad de comparación (US\$/hr):

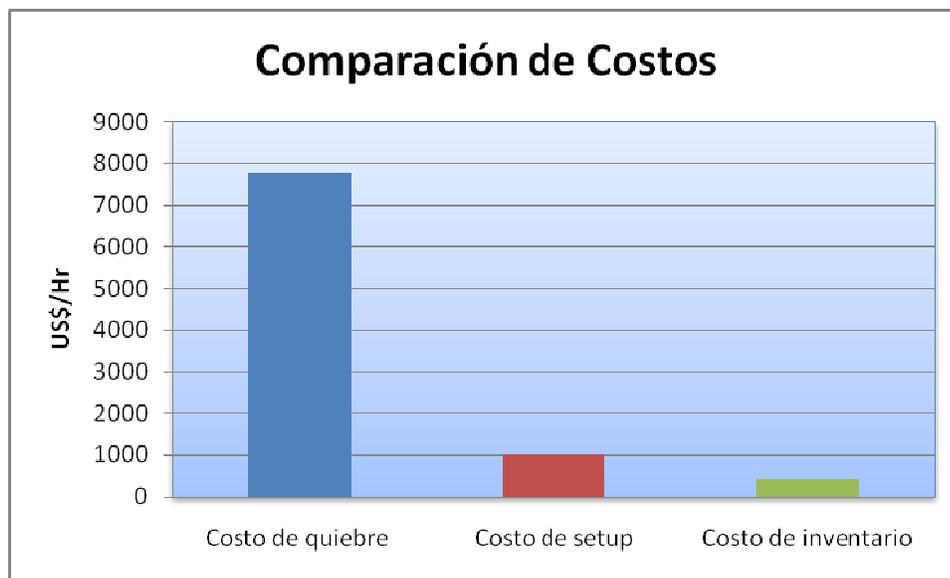


Fig 25. Gráfico comparación de costos.

Se puede incluso aproximar la tasa mensual a un 1% (como el mejor caso), y comprobar que el costo financiero de 5,67 US\$/TON es muy inferior al costo de Quiebre e incluso al costo de setup si es llevado por hora.

Por otra parte, no existe una pérdida en el valor del material si hay un sobre stock del mismo, puesto que el producto (Barras de acero) no es perecible y se puede vender a

igual valor en el futuro (suponiendo que no hay variaciones en el precio). Por lo tanto, el costo al sobrar material (costo por sobrante), es igual al costo financiero más el costo por mantenimiento, resultado un total de 7,67 US\$/TON, mientras que el costo por faltante es igual a 141 US\$/TON. Apoyándose en el conocido problema del “vendedor de diarios”⁶, se calcula el punto en que el costo por sobrante es igual al de faltante como sigue:

$$\textit{Esperanza que sobre} = \textit{Esperanza que falte}$$

$$\textit{Costo Sobrante} * \textit{Prob} [Demanda \leq Q] = \textit{Costo Faltante} * \textit{Prob} [Demanda \geq Q]$$

$$\textit{Prob}[Demanda \leq Q] = \frac{\textit{Costo por faltante}}{\textit{Costo por faltante} + \textit{Costo por sobrante}}$$

Reemplazando,

$$\textit{Prob}[Demanda \leq Q] = \frac{141}{141 + 7,67}$$

$$\textit{Prob}[Demanda \leq Q] = 94\%$$

Luego, bajo una distribución normal se obtiene un Q igual a 19880 toneladas para una demanda de 15000 toneladas y una desviación de 3000. Es decir, la cantidad disponible para la venta no debería superar las 19.880 toneladas o 1.32 veces la demanda para equilibrar los costos en términos probabilísticos y satisfacer con un 94% de probabilidad a toda la demanda. Análogamente, si sólo se considera que un 20% del total de quiebres es venta perdida, el Q resultante es de 17.380 toneladas. De esta manera, debido a que la restricción de costo por inventario es compleja en términos de tiempo de procesamiento y poco significativa en términos probabilísticos para los escenarios de mediano-bajo inventario, se consideran sólo los costos de quiebre y tiempo de setup, controlando el inventario fuera del modelo. En el capítulo 8.4 se analiza la incorporación del costo de inventario en la función objetivo.

❑ **Tiempo:**

De acuerdo a la matriz de tiempos de setup que manejan los encargados de la programación o Scheduling de los productos cada día y que indica el tiempo que toma pasar de un producto i a un producto j, se realiza un levantamiento de los tiempos promedios que se incurren en configurar los equipos para producir una familia eficiente de productos, un determinado diámetro dentro de la familia, calidad del diámetro y largo de la calidad y diámetro anterior. De esta manera, cada vez que el modelo decide producir una determinada familia de productos en un periodo, incurre en un tiempo de setup, al igual que cada vez que produce un diámetro, calidad o largo. Por ejemplo, para producir un producto de largo L, calidad C, diámetro D que pertenece a la familia F, se incurre en la suma de los tiempos señalados, pero para luego producir un diámetro distinto, pero de la misma familia, no se incurre nuevamente en el tiempo setup de la familia. Análogo para cambiar la calidad o largo. La tabla con el tiempo que se incurre cada vez que se produce una familia de eficiente, se muestra a continuación:

⁶ Apuntes de curso IN47A-1 Gestión de Operaciones Semestre Primavera 2007, Departamento de Ingeniería Civil Industrial U. de Chile.

Fig 26. Tabla Tiempo de setup que se incurre al producir la familia

Familia	Promedio (min)	Desviación Est. (min)
A	150	0
B	123	12
C	108	9
D	122	0
E	118	9
F	124	5
R	92	2

De la tabla se observa una baja desviación del tiempo promedio, por lo que se tiene una correcta aproximación. Las tablas con los tiempos de setup para cambios de diámetro, calidad y largo se adjuntan en anexo.

Otros supuestos de tiempo:

- El tiempo disponible depende cada periodo, por lo que se debe considerar la cantidad de días de cada mes y las horas efectivamente trabajadas.
- Se contabiliza una pérdida del 10% promedio del tiempo disponible debido a Interrupciones.
- Existe restricción eléctrica impuesta durante los meses de abril a octubre, se dispone de 18,33 hrs en los días hábiles bajo restricción, 24hrs horas los fines de semana y en los días sin restricción.

□ Demanda:

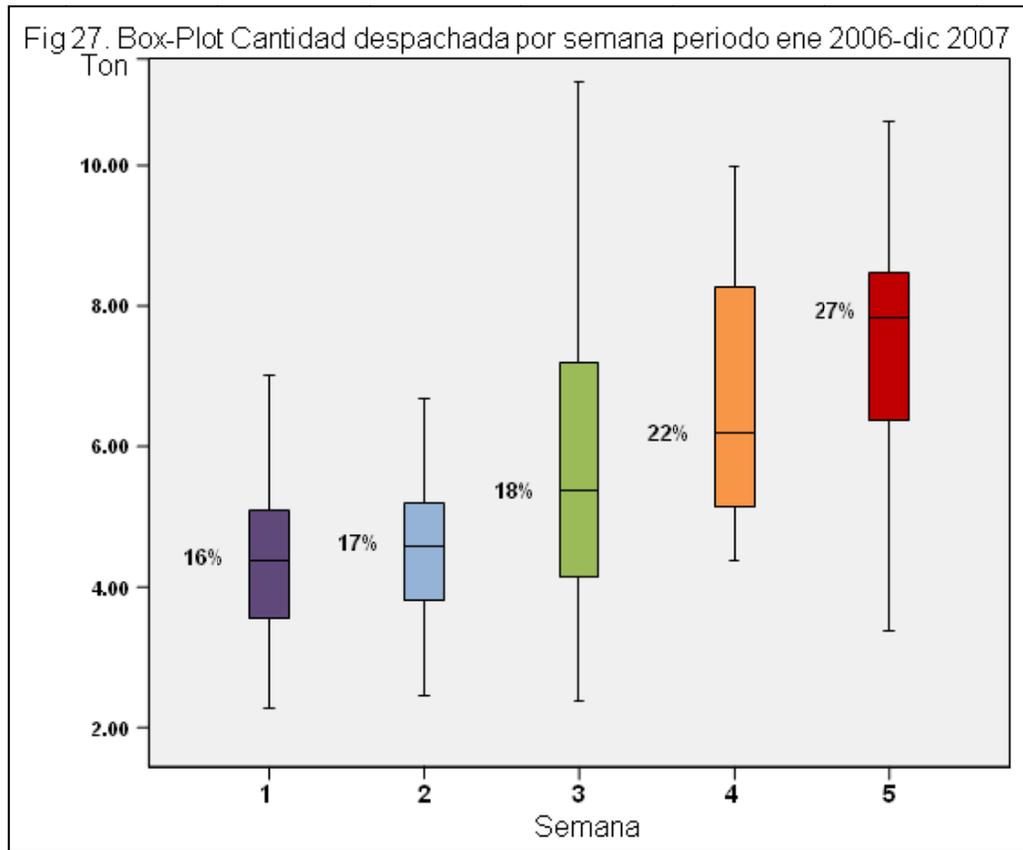
La estimación mensual, que considera el error de pronóstico para cada producto $Y(\text{Producto } i, \text{ mes})$, se distribuye semanalmente según el porcentaje de la venta mensual que concentra el producto históricamente en cada semana. Esto es:

$$D(i, t) = \text{Pronóstico del producto } i \text{ en el mes} \times \% \text{ de venta en semana } t \text{ del producto } i$$

O equivalentemente,

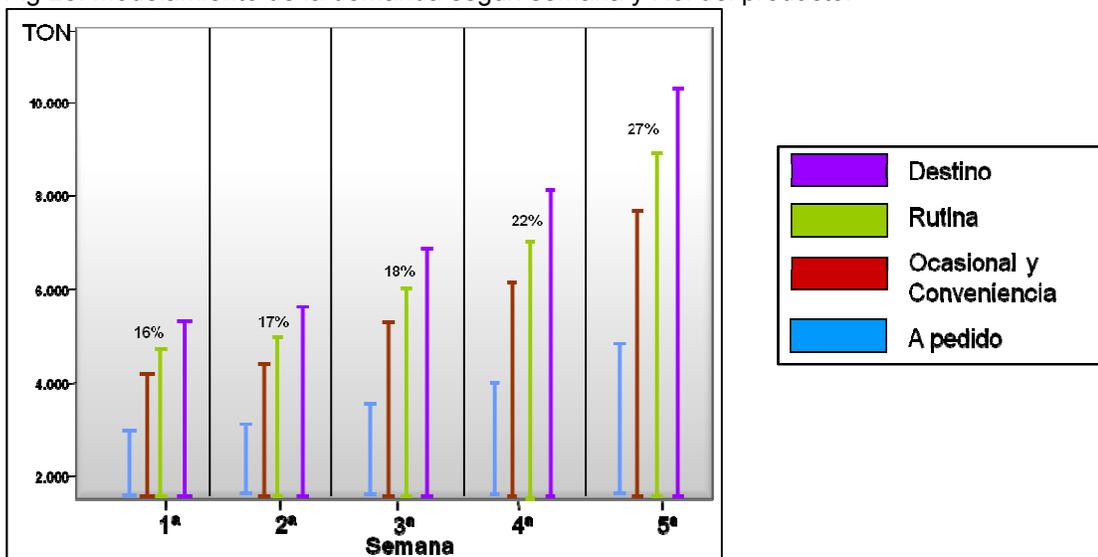
$$D(i, t) = Y(i, \text{mes}) \times \% \text{ de venta en semana } t \text{ del producto } i$$

Bajo el supuesto de despacho = venta, el porcentaje de venta en la semana t del producto i se calcula en base a la estadística de despacho. Se analiza el periodo enero 2006-diciembre 2007, ya que no presenta las distorsiones ocurridas el 2008-2009 debido a la crisis económica y se considera representativo según juicio experto del departamento de Ventas. A continuación, se muestra el diagrama Box-Plot realizado mediante SPSS del despacho a nivel agregado que ilustra el comportamiento de los despachos semanales (promedio y desviación), observándose que casi un 27% de la cantidad despachada (venta) se concentra en la última semana del mes, lo cual también se asemeja a la situación actual:



La siguiente figura grafica el modelamiento de la demanda semanal de cada producto $D(i,t)$ como resultado del comportamiento histórico de los pedidos y el nivel de servicio según el rol:

Fig 28. Modelamiento de la demanda según semana y Rol del producto.



Por otro lado, se modelará la venta mensual (demanda que satisface el modelo), como una variable y no como una cantidad fija. La venta de cada producto estará entre un mínimo y el pronóstico de demanda $Y(i,t)$, puesto que si se obliga a que la venta sea

igual al pronóstico $Y(i,t)$ en forma estricta, se cae muchas veces en problemas de infactibilidad debido a limitaciones de capacidad de la planta.

$$\text{Venta mínima} \leq \text{Venta modelo} \leq \text{Pronóstico}$$

La venta mínima es calculada análogamente que el pronóstico $Y(i,t)$, pero con un menor nivel de servicio, de tal manera que siempre se entregue una solución factible. El modelo intentará acercar la venta al pronóstico $Y(i,t)$ de acuerdo al beneficio de cada producto (costo de quiebre v/s productividad).

8.2 Definición del Modelo

Índices:

- i : corresponde a los productos considerados. El análisis se realizará para un total de 125 productos que incluyen la línea de B.Hormigón, Alambrón y los productos de exportación, ya que estos son producidos en el mismo laminador.
- t : representa cada semana considerada, donde un mes tiene 5 semanas de seis días cada una y el horizonte en estudio será de 15 semanas (3 meses).
- f : 7 familias eficientes de producción.
- z : representa los diámetros existentes, estos son: 6, 8, 10, 12, 16, 18, 22, 25, 32, 36, 9.5, 5.5, 11.5, 7.5, 6.5, 20, 14, Rollo 8, Rollo 10, Rollo 12 mm

Parámetros:

$D(i, t)$: Demanda estimada para el producto i en la semana t .

$So(i)$: Stock inicial del producto i

$IMP(i,t)$: importación del producto i en el periodo t

$Venta_min(i, mes)$: venta mínima que debe realizar en el mes.

$Pro(i)$: Productividad media para el producto i medida en ton/hrs

$M(i)$: Máximo de toneladas que se puede producir del producto i en una semana.

min : cantidad mínima de producción por cada producto.

$Capacidad_bodega$: capacidad máxima de almacenaje.

Parámetros de Tiempo:

$TD(t)$: Tiempo disponible de producción para la semana t considera la restricción eléctrica en septiembre y un 10% de tiempo menos debido al tiempo promedio que se pierde en interrupciones.

$TSF(f)$: Tiempo de setup promedio al realizar una familia f de productos

Tsdiam(z) : Tiempo de setup promedio al producir el diámetro z dentro de la familia a la cual pertenece (cada diámetro pertenece a una única familia eficiente).

Tscal(j, z) : Tiempo de setup promedio al producir la calidad j del diámetro z.

Tslarg (i) : Tiempo de setup promedio al producir el largo del producto i

Costos

C_quiebre(i): Costo por quiebre US\$ por ton, valorizado como el margen de venta promedio del producto.

C_setup : Costo de setup US\$/hr, incluye costo fijo de horas hombre y gasto en combustible por mantener la temperatura del laminador.

Pertenencia

Fam(i,f) : tabla de valores 1 si producto i pertenece a la familia f, 0 si no.

diamfam(z,f) : tabla binaria, 1 si el diámetro z pertenece a la familia f, 0 si no.

diampro(i,z) : tabla binaria, 1 si el producto i pertenece al diámetro z, 0 si no.

calidad(i,j) : tabla binaria, 1 si el producto i tiene la calidad j, 0 si no

Variables de decisión:

- Variables positivas:

Q (i,t) = Cantidad a producir del producto i en la semana t (Toneladas)

Quiebre(i,t) = quiebre efectivo del producto i en el periodo t

Venta (i,t) = cantidad vendida del producto i en el periodo t

Setup(t) = variable auxiliar igual al tiempo de setup utilizado en el periodo t

CostoQuiebre = variable auxiliar igual al costo total de quiebres

CostoSetup = variable auxiliar igual al costo total de setup

- Variable continua, negativa o positiva:

S(i,t) = Stock al inicio de la semana t.

S(i,t1) = So(i)

Aux_Quiebre(i,t) = Diferencia entre la demanda y la venta del producto i en el periodo t

- Variables binarias:

X (i,t) = 1 si produzco producto i en t, 0 si no.

PF(f,t) = 1 si produzco familia f en semana t, 0 si no.

Sdiam(z,t) = 1 si produzco diámetro z en semana t, 0 si no.

Sical(z,j,t) = 1 si produzco calidad j del diámetro z en el periodo t.

Restricciones:

- 1) Sólo se produce el diámetro si se decidió producir la familia a la que pertenece

$$sidiam(z, t) \times diamfam(z, f) \leq PF(f, t) \quad \forall z, f, t$$

- 2) Sólo se produce producto si se decidió producir el diámetro al que pertenece

$$X(i, t) \times diampro(i, z) \leq sidiam(z, t) \quad \forall i, z, t$$

- 3) Sólo se produce si se decidió producir calidad asociada al producto

$$X(i, t) \times calidad(i, j) \times diampro(i, z) \leq sical(z, j, t) \quad \forall i, z, j, t$$

- 4) Sólo se produce producto si se decidió hacerlo

$$Q(i, t) \leq X(i, t) \times M(i) \quad \forall i, t$$

- 5) Cantidad a producir por sobre el mínimo

$$Q(i, t) \geq X(i, t) \times min \quad \forall i, t$$

- 6) Definición de venta igual al stock más lo importado y producido. Para barras gruesas sólo se puede vender lo que se ha importado o está en stock previamente, ya que se requiere una semana de envejecimiento para ser entregados a partir de la fecha de producción.

$$Venta(i, t) \leq S(i, t) + Q(i, t) + IMP(i, t) \quad \forall i \in \{\text{barras no gruesas}\}, \forall t$$

$$Venta(i, t) \leq S(i, t) + IMP(i, t) \quad \forall i \in \{\text{barras gruesas}\}, \forall t$$

- 7) Venta positiva

$$Venta(i, t) \geq 0 \quad \forall i, t$$

- 8) Rango de venta mensual

$$Venta_{min(i, mes)} \leq \sum_{t \in mes} Venta(i, t) \leq \sum_{t \in mes} D(i, t) \quad \forall i, mes$$

- 9) Lote mínimo de producción por diámetro

$$\sum_{i=1}^{i=125} Q(i, t) \times diampro(i, z) \geq sidiam(z, t) \times lotemin \quad \forall t$$

10) Flujo de inventario

$$S(i, t) = S(i, t - 1) + Q(i, t - 1) + IMP(i, t - 1) - Venta(i, t - 1) \quad \forall i, t > 1$$

11) Tiempo de setup

$$\begin{aligned} Setup(t) = & \sum_{f=1}^n PF(f, t) \times TSF(f) + \sum_{z=1}^z sidiam(z, t) \times Tsetdiam(z) \\ & + \sum_{z=1}^z \sum_{j=1}^{j=4} sical(z, j, t) \times Tcal(z, j) + \sum_{i=1}^{i=125} X(i, t) \times Tlarg(i) \end{aligned}$$

12) Cumplimiento de Tiempo disponible

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q(i, t)}{PRO(i)} + Setup(t) \leq TD(t) \quad \forall t$$

13) Variable auxiliar de quiebre

$$Aux_Quiebre(i, t) = D(i, t) - Venta(i, t) \quad \forall i, \forall t$$

14) Definición de quiebre

$$Quiebre(i, t) = \max\{0, Aux_Quiebre(i, t)\} \quad \forall i, \forall t$$

15) Quiebre de productos de exportación igual a cero. Se modela la demanda en la semana requerida para la salida del barco y se produce íntegramente la cantidad demandada.

$$Quiebre(i, t) = 0 \quad \forall i \in \{exportación\}, \forall t$$

16) Alambión no debe ser producido en las últimas semanas del mes.

$$X(i, t) = 0 \quad \forall i \in \{Alambión\}, \forall t \in \{Fin de mes\}$$

17) Producir, al menos tres veces al mes, productos de baja productividad (producto lento), para asegurar suministro de planta de perfiles.

$$\sum_{to \in mes}^{tf \in mes} \sum_{zo \in lento}^{zf \in lento} sidiam(z, t) \geq 3$$

18) Capacidad de bodega

$$\sum_{i=1}^{i=125} S(i, t) \leq \text{Capacidad_Bodega} \quad \forall t$$

19) Costo total de quiebre

$$\text{CostoQuiebre} = \sum_{t=1}^{t=15} \sum_{i=1}^{i=125} \text{Quiebre}(i, t) \times C_quiebre(i)$$

20) Costo total de setup, equivalente a la suma de costos por cambiar familia, diámetro dentro de la familia y producto dentro del diámetro.

$$\text{CostoSetup} = \sum_{t=1}^{t=15} \text{Setup}(t) \times C_Setup$$

Función objetivo:

Minimización de costos relevantes en la planificación: costos de quiebres y costos por tiempos muertos (setup), ya descontados a la tasa antes indicada.

$$\text{Min CostoQuiebre} + \text{CostoSetup}$$

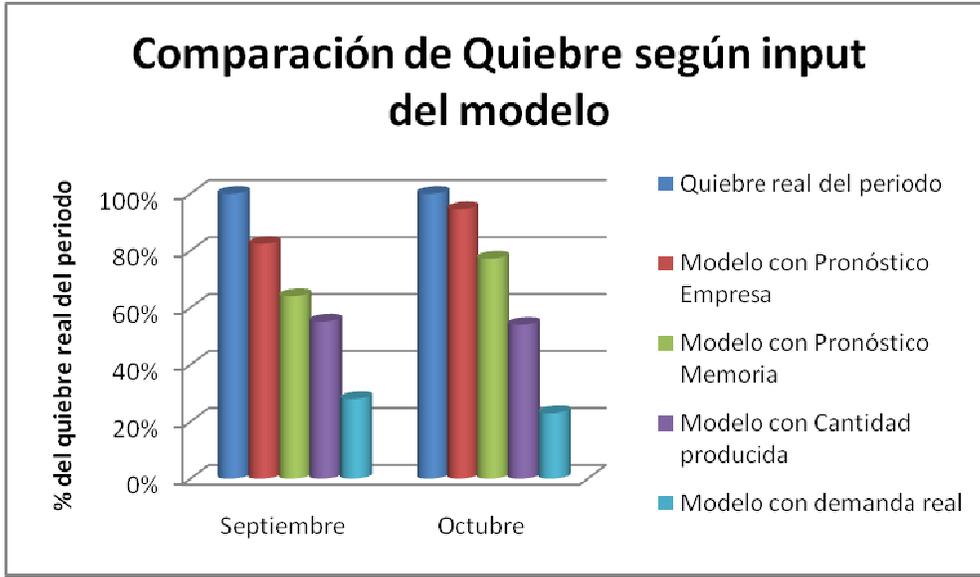
En el capítulo 8.4, se estudia la incorporación del costo de inventario a la función objetivo.

8.3 Resultados

8.3.1 Modelo con estimación que se tenía en Septiembre

El modelo es ejecutado en el software GAMS con diferentes inputs de demanda o pronóstico para distinguir cuanto aporta el modelo v/s cuanto aporta una mejor estimación y se compara con la venta real ocurrida en los meses de septiembre y octubre. No se incluirá en el análisis el mes de noviembre, puesto que no se cuenta con la venta completa del mes, sin embargo, se observa que el comportamiento de los quiebres en las primeras dos semanas de noviembre es similar a lo ocurrido en octubre. La ejecución del modelo se limitó a un tiempo máximo de 3 hrs. A continuación, se grafica como varía el porcentaje de quiebres del periodo según el input recibido:

Fig 29. Gráfico comparación de quiebre según input de demanda.



En primer lugar, se corre el modelo con el pronóstico que tenía la empresa en septiembre para el periodo septiembre-octubre-noviembre, el cual a nivel agregado tiene una desviación del error de un 10% c/r a la venta y un error absoluto desagregado por productos de un 53%. Dado lo anterior, la solución del modelo obtiene una reducción de un 17,7% de los quiebres de stock en septiembre y un 5,4% en octubre.

Posteriormente, se utiliza el pronóstico propuesto en este proyecto con un error de un 4% promedio a nivel agregado y un error desagregado absoluto de un 47%, se obtiene una reducción en los quiebres de stock de un 36% y un 22% en septiembre y octubre respectivamente. Es decir, una disminución de 6 puntos porcentuales en el error desagregado se traduce en 17 puntos porcentuales menos de quiebres en promedio.

También, se ejecuta el modelo para que produzca exactamente la cantidad producida por la empresa en el periodo, pero decidiendo cuando y como producirlo, resultando una reducción de un 44% y un 46% en septiembre y octubre respectivamente. La menor cantidad de quiebres, se explica porque cada semana se ajusta la producción según los pedidos que han ingresado, por lo que se acerca a la demanda real solicitada.

Finalmente, se ejecuta el modelo con el input de la demanda real del período, obteniéndose una reducción del 72% de los quiebres en septiembre y 77% en octubre. Los indicadores relevantes se resumen en las siguientes tablas:

Fig 30. Tabla de indicadores relevantes, resultados septiembre.

Indicadores Septiembre	Situación Real Sept	(-) Calidad del input de demanda (+)			
		Pronóstico Empresa	Pronóstico Memoria	Con Cantidad producida	Modelo con demanda real
Quiebres (Mil ton)	4,1	3,3	2,6	2,2	1,1
Tiempo de setup (hrs)	40	52	50	53	57
Costo Quiebre + Costo Setup (Mil US\$)	611	522	416	368	217
Reducción F.O (%)	0	12	32	40	65
Cantidad mensual Producida (Mil ton)	25,4	26,3	25,6	25,4	25,0
Stock fin de mes (Mil ton)	6,8	7,7	7,0	6,8	6,4

Se observa de la tabla que mientras mejor sea el pronóstico menor es el stock con que se finaliza el mes, porque al tener menos incertidumbre, menos es el stock de seguridad o sobre stock necesario (no se produce de más). Por otro lado, se observa un aumento de la cantidad de tiempo de setup empleado conforme aumenta la calidad de la estimación, pero que como máximo representa un 10,5% del tiempo utilizado, lo cual está dentro del rango de tiempo de setup utilizado por la empresa de 10% a 15% del tiempo disponible total. Análogamente, los resultados obtenidos para octubre con la estimación que se tenía en septiembre, se muestra a continuación:

Fig 31. Tabla de indicadores relevantes, resultados Octubre.

Indicadores Octubre	Situación Real Octubre	(-) Calidad Input de demanda (+)			
		Pronóstico Empresa	Pronóstico Memoria	Con Cantidad producida	Modelo con demanda real
Quiebres (Mil ton)	3,2	3,0	2,4	1,7	0,7
Tiempo de setup (hrs)	54	48	54	53	53
F.O(septiembre) = Costo Quiebre + Costo Setup(MUS\$)	501	471	399	294	155
Reducción F.O (%)	0	22,98	34,68	51,85	74,51
Cantidad Producida (Mil ton)	29,8	28,0	28,0	28,6	28,1
Stock fin de mes (Mil ton)	7,7	6,9	6,1	6,6	5,9

Se aprecia en la tabla que al producir las mismas cantidades que realizó la empresa en octubre, también es posible obtener menos quiebres. Esto se debe a que se decide mejor cuando producir al aprovechar la estacionalidad de la demanda por semana y, además, se programa eficientemente evitando aumentar el tiempo de setup empleado. Por último, salvo el escenario con la cantidad producida por la empresa, también se observa un menor stock a medida que aumenta la calidad del Input de demanda y el tiempo de setup representa como máximo un 9,1% del tiempo disponible.

8.3.2 Resultado Octubre 2009 con la estimación de Octubre

Conocida la venta de septiembre y el stock del 1 de octubre, se ejecuta el modelo con la estimación para el periodo Octubre-Noviembre-Diciembre, obteniéndose una reducción de los quiebres de un 25% para el pronóstico de la empresa que tiene un 13% de error agregado y 51% de error desagregado total. También, se obtiene una

reducción un 43% utilizando el pronóstico de esta memoria (con un 2% de error agregado y un 40% de error total desagregado). Como puede observarse en la tabla a continuación, el número de horas empleadas en tiempo de setup es mayor que las propuestas por el modelo para el periodo Sept-Oct-Nov. Esto se puede explicar por el hecho que el modelo para el periodo Sept-Oct-Nov intenta producir en septiembre la cantidad eficiente que evita quiebres y costos de setup de octubre, mientras que el modelo del periodo Oct-Nov-Dic se debe ajustar obligatoriamente al stock real al inicio de Octubre. Además, al mejorar la solución del modelo con un scheduling (secuenciamiento) diario de los productos en octubre, parte de los cambios de setup se diluyen aprovechando las paradas programadas en la producción y otros tiempos muertos, por lo que el tiempo disponible utilizado en setup sería menor. Por último, se aprecia que mientras mejor pronóstico, menos quiebres y stock son necesarios.

Fig 32. Tabla de indicadores relevantes, resultados Octubre.

Indicadores Octubre	Situación Real	Pronóstico empresa	Pronóstico memoria
Quiebres (Mil ton)	3,2	2,4	1,8
Tiempo de setup (hrs)	54	70,5	80,7
F.O(septiembre) = Costo Quiebre + Costo Setup	501	408,2	336,3
Reducción F.O (%)	0	0,19	0,33
Cantidad Producida (Mil ton)	29,8	28,7	28,2
Stock fin de mes (Mil ton)	7,7	6,9	6,4

Cabe señalar, que para el mes de noviembre se estimó una reducción de un 45% en los quiebres, pero por los plazos del proyecto no se expone esa solución.

8.3.3 Resultados por producto

A partir de los resultados del modelo con el input de estimación de demanda propuesta en este proyecto para septiembre - octubre, se puede analizar las cantidades a producir de diferentes productos. Por simplicidad y relevancia, se muestra en las siguientes tablas la cantidad producida de los siete productos de mayor venta y mayor rotación (rol de destino):

Fig 33. Tabla Cantidad producida real

ID	Producto	Familia eficiente	Productividad (Ton/hr)	mes 1					mes 2				
				t01	t02	t03	t04	t05	t06	t07	t08	t09	t10
1	B. 8 mm	C	38	1470						881			660
2	B.10 mm	C	55				370	591		1013			
3	B.12 mm	B	59					1421			745	382	502
4	B.16 mm	D	59		806				1524				
5	Rollo 8 mm	R	55		681			581		269		187	397
6	Rollo 10 mm	R	55				416	216		1024			844
7	Rollo 12 mm	R	59					1152				1029	

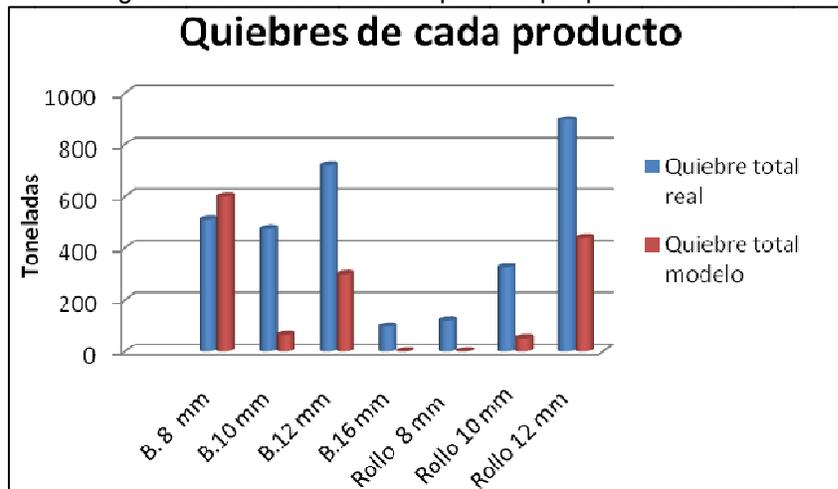
Fig 34. Tabla Cantidad producida según modelo

ID	Producto	Familia eficiente	Productividad (Ton/hr)	mes 1					mes 2				
				t01	t02	t03	t04	t05	t06	t07	t08	t09	t10
1	B. 8 mm	C	38	183		550		479		663		370	633
2	B.10 mm	C	55	372		544		554		415		354	399
3	B.12 mm	B	59		310		413		469		528		500
4	B.16 mm	D	59	154	1019				1036				579
5	Rollo 8 mm	R	55	257		794					993		
6	Rollo 10 mm	R	55	847						751			591
7	Rollo 12 mm	R	59	680						1156			

De la tabla de producción real, se observa la decisión de la empresa de producir el primer producto en gran cantidad una sola vez al mes. Esta decisión sigue la idea de que al ser uno de los productos de mayor demanda, se debe tener siempre disponible el material para evitar quiebres y, como también se persigue minimizar el tiempo de setup, la empresa decidió una producción larga ocupando sólo un setup del producto en el primer mes, a diferencia de lo señalado por el modelo que propone dividir la producción semana por medio. La solución del modelo indica que como es un producto de baja productividad, al producirlo de una sola vez se pierde tiempo valioso que podría ocuparse para reducir los quiebres en otros productos. Además, como se comprobó al analizar la demanda, las primeras semanas del mes presentan la menor concentración de la venta mensual, por lo que no es necesario contar con toda la cantidad demanda del mes desde la primera semana. Similarmente, en el modelo el producto número 4 se produce cada dos veces al mes, debido a que tiene una productividad mayor, a diferencia de lo realizado por la empresa de producirlo sólo una vez al mes.

Por otra parte, la solución del modelo propone producir los dos primeros productos en las mismas semanas, ya que pertenecen a la misma familia de setup eficiente y, por lo tanto, se minimiza el tiempo empleado. También, se observa un patrón de producir semana de por medio el producto 3, mientras en el caso de los rollos la cantidad de veces que se producen al mes, es menor a lo realizado por la empresa. Finalmente, se comparan los quiebres reales con los obtenidos mediante el modelo arrojando una reducción de un 45% de los quiebres del rol de destino y un 41% en rol de rutina. La comparación para los productos de destino se muestra a continuación:

Fig 35. Gráfico resultado de quiebres por productos de destino.

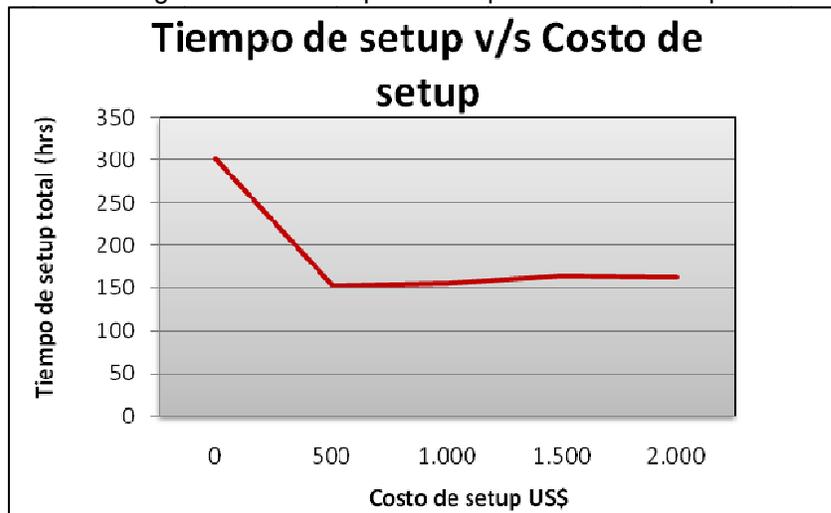


8.4 Análisis de sensibilidad

8.4.1 Sensibilidad al costo de setup

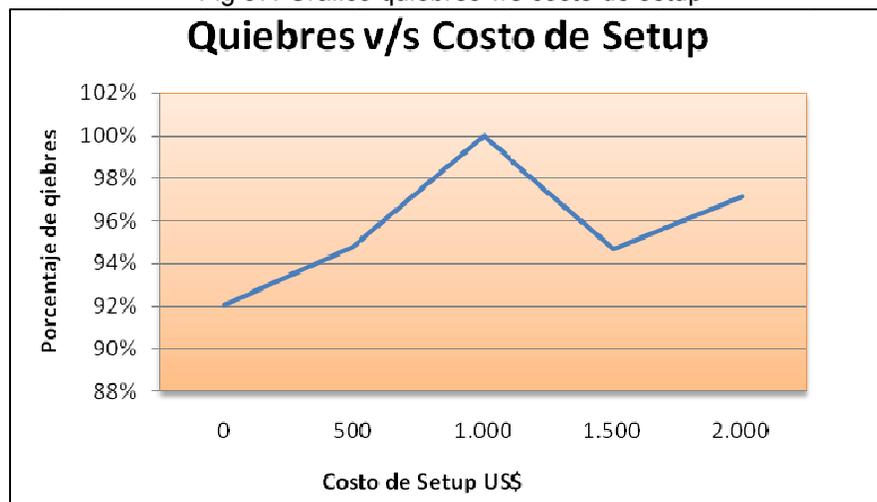
Se corre el modelo para distintos valores del parámetro de tiempo disponible, dejando fijos los otros parámetros participantes. Como se muestra en siguiente el gráfico, un costo de setup de cero, equivale a un 100% más de tiempo utilizado en setup que el obtenido con el costo de setup estudiado en este proyecto. Además, a partir los US\$ 500, un aumento en costo de setup no produce una variación significativa en el tiempo.

Fig 36. Gráfico tiempo de setup v/s costo de setup



Por otra parte, un costo de setup igual a cero genera una reducción de un 8% en los quiebres, pero a partir de los US\$ 500 la variación de los quiebres no es clara, ya que el modelo puede incluso reducir las toneladas de quiebre. Lo anterior debido a que puede encontrar, por ejemplo, soluciones de menor costo de quiebre que costo de setup, como también soluciones de una mayor cantidad de quiebres con tal de disminuir el tiempo de setup. El siguiente gráfico muestra lo señalado:

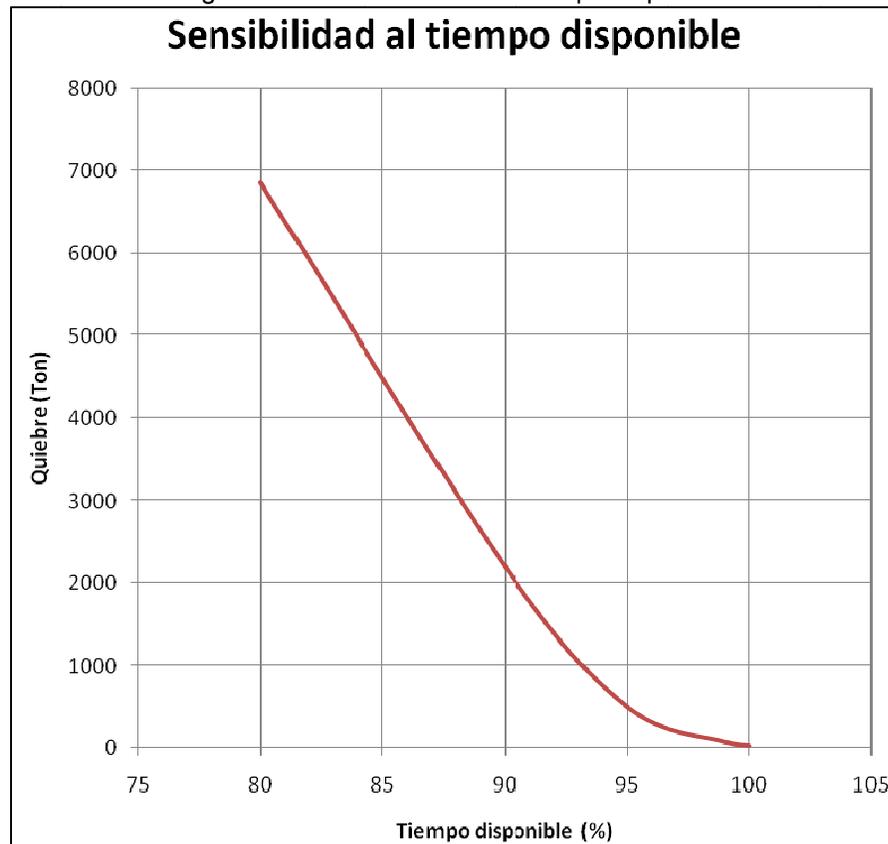
Fig 37. Gráfico quiebres v/s costo de setup



8.4.2 Sensibilidad al tiempo disponible

El gráfico a continuación muestra que la cantidad de quiebres es muy sensible al tiempo disponible:

Fig 38. Gráfico Quiebres v/s Tiempo disponible



Considerando el escenario en que se tiene el 100% del tiempo disponible (24 hrs diarias, sin interrupciones ni feriados) y la demanda real de un periodo de dos meses (septiembre-octubre), la cantidad de quiebres en total alcanza las 31 toneladas. En cambio, una disminución de un 1% en el tiempo disponible (-20 hrs) ocasiona un quiebre de 79 toneladas en total. Sin embargo, a medida que disminuye más el tiempo, la curva de quiebres se hace cada vez más marcada. La reducción de un 10% del tiempo disponible total (casi una semana) genera quiebres por sobre las 2000 toneladas (equivalente a un 11,1% de la venta promedio) mientras que contar con sólo un 80% del tiempo total, eleva el quiebre a 6855 toneladas (38% de la venta promedio).

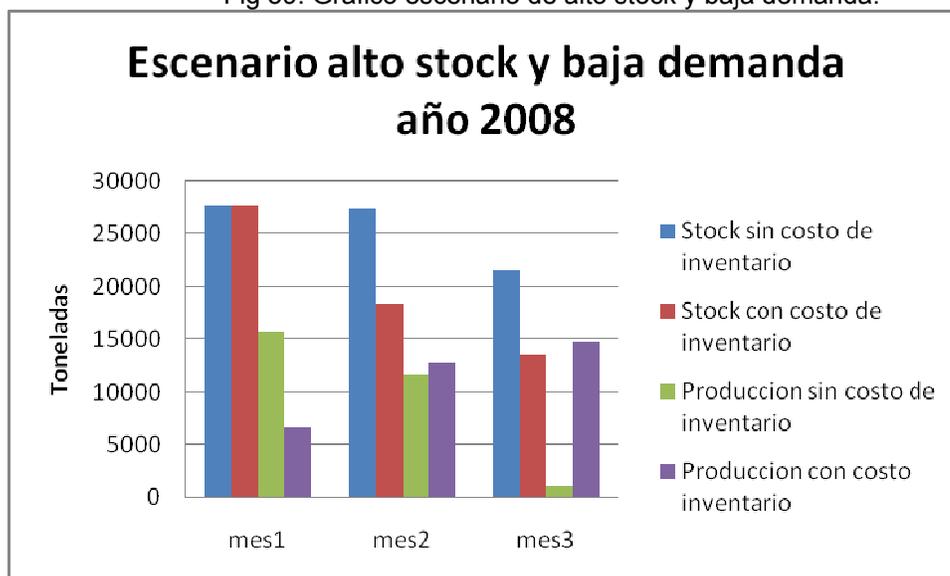
El modelo apoya la toma de decisiones de planificación (como importar producto para evitar quiebres), ante situaciones previsibles que afecten el tiempo disponible de producción como lo son las paradas de mantenimiento, restricción eléctrica, interrupciones, feriados y vacaciones. Por otra parte, es de gran importancia estimar correctamente este parámetro antes de ejecutar el modelo desarrollado.

8.4.3 Inventario

Se ejecuta el modelo para el periodo septiembre – octubre - noviembre 2008 que presentó un stock muy alto que incluso superaba la capacidad física teórica de bodega

(se almacenaba fuera de bodega y a través de terceros), pero con una demanda que cayó estrepitosamente con el comienzo de la crisis económica 2008-2009, llegando a ser casi la mitad de la cantidad inventariada en un comienzo. Al no existir quiebres dado el alto stock, el modelo entrega como solución una producción alta en los dos primeros meses para casi dejar de producir el tercer mes y así ahorrar costos de setup. Esta solución deja de lado el alto costo financiero que bordea los US\$ 215.000 mensuales. Por este motivo y dado que la instancia recibida es de rápida resolución para el modelo (30 min), se incorpora en la función objetivo el costo de inventario estudiado en el capítulo 8.1. La solución entregada se asemeja a lo realizado por la empresa en el periodo, que consistió en reducir la producción en el primer mes con tal de disminuir el stock que genera un alto costo financiero y luego mantener un nivel estable de producción que permitiera no tener quiebres del producto. Ante un escenario como el señalado, se sugiere agregar en el modelo el costo financiero en la función objetivo, ya que se ejecuta en un tiempo razonable (1hr) y entrega una solución representativa. El siguiente gráfico representa lo indicado:

Fig 39. Gráfico escenario de alto stock y baja demanda.



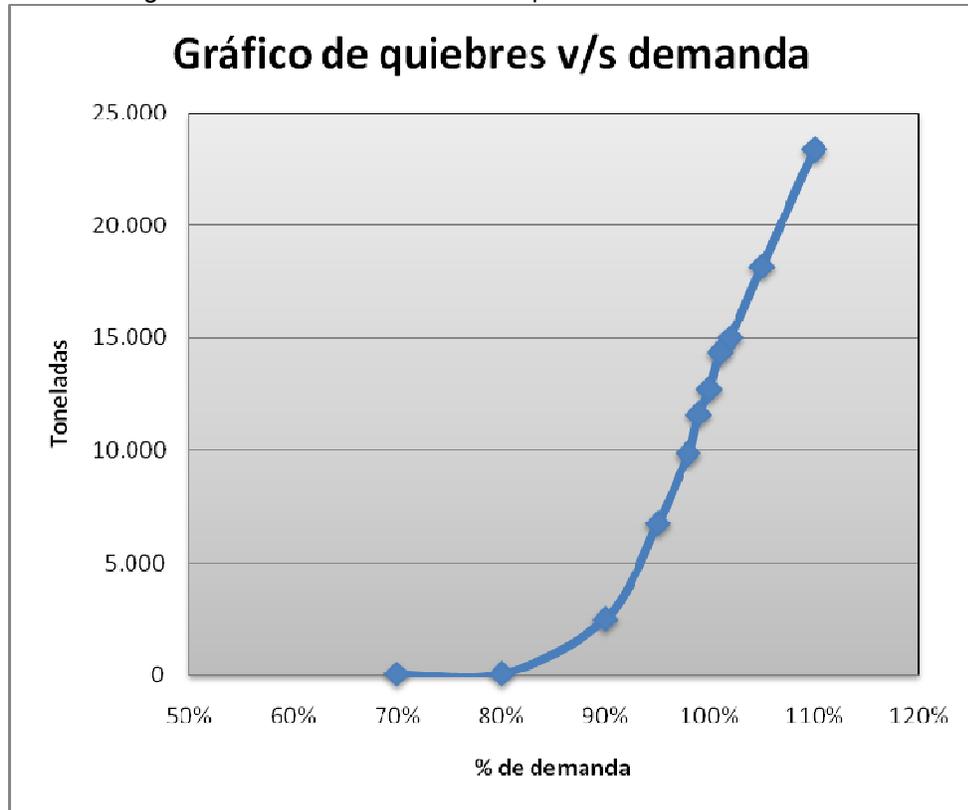
A diferencia del escenario anterior, el periodo marzo-abril-mayo 2008, presentó un alto stock inicial de 14.815 y una demanda muy alta, superior a las 30.000 toneladas. La solución del modelo propone un stock promedio de 14.800 toneladas produciendo a máxima capacidad y una tasa de quiebre del 24%. Al incluir en la función objetivo el costo por inventario, se tiene un resultando un stock promedio de 13.900 toneladas y una tasa de quiebre del 25% c/r a la venta real. El tiempo de ejecución del modelo aumentó considerablemente, sobre pasando las 4 hrs. Debido a que el modelo indica una tasa de quiebres superior al 20% c/r a la venta promedio, la decisión que tomó la empresa de importar productos en el periodo demuestra ser correcta.

8.4.4 Demanda

Se corre el modelo variando porcentualmente la demanda del periodo septiembre-octubre-noviembre. El resultado indica que un aumento de la demanda tiene un mayor efecto en los quiebres que una disminución de ella. Por ejemplo, al aumentar en un 1% la demanda total del periodo (demanda igual a un 101% de la demanda inicial), se tiene

un aumento de un 6% en promedio en los quiebres mensuales, con un aumento de un 2% en el tiempo de setup, mientras que una disminución de un 1% en la demanda, significa una disminución de un 3% más en el promedio de los quiebres mensuales y una disminución de un 1% en el tiempo de setup, como lo muestra el siguiente gráfico:

Fig 40. Gráfico de sensibilidad de quiebres c/r a demanda



Un alcance de relevancia, es que la decisión de importar producto puede disminuir en buena medida los quiebres. Por ejemplo, al importar producto de manera de disminuir en un 5% la demanda neta que tuvo que satisfacer la empresa en el periodo de tres meses, se podría haber reducido un 26% más el total de quiebres. Incluso una demanda un 10% más baja, permite disminuir en un 61% la cantidad quebrada que se tenía con el total de la demanda. Lo anterior, se explica porque una disminución en la demanda se traduce en más tiempo disponible para poder producir y realizar cambios de producto en la fecha más adecuada. La decisión de importar puede sustentarse en el impacto en la disminución de quiebres de stock versus el costo mismo de la importación. Es recomendable analizar el efecto de la importación de cada producto en particular.

Por otra parte, el tiempo de setup se mantiene relativamente cercano al 10% del tiempo total disponible al variar la demanda, ya que hay productos, restricciones y fechas que se tienen que producir/cumplir igual, aún cuando varíe la demanda. Además, dependiendo de los productos que aumentan su demanda, pueden encontrarse soluciones donde a mayor demanda, menos tiempo de setup se utiliza, ya que es más eficiente realizar menos cambios de producto y producir grandes lotes aprovechando mejor el tiempo disponible. El siguiente gráfico muestra el comportamiento del tiempo de setup al aumentar o disminuir la demanda:

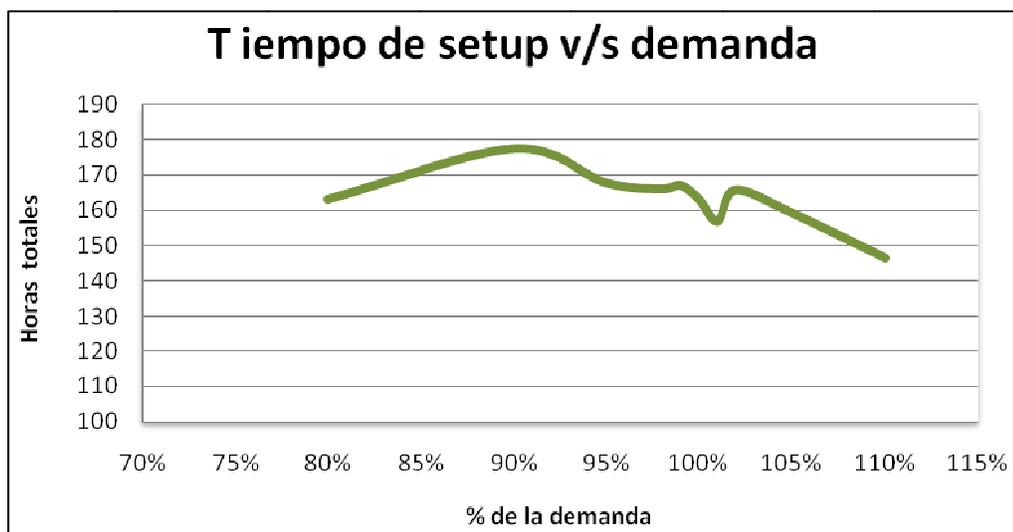
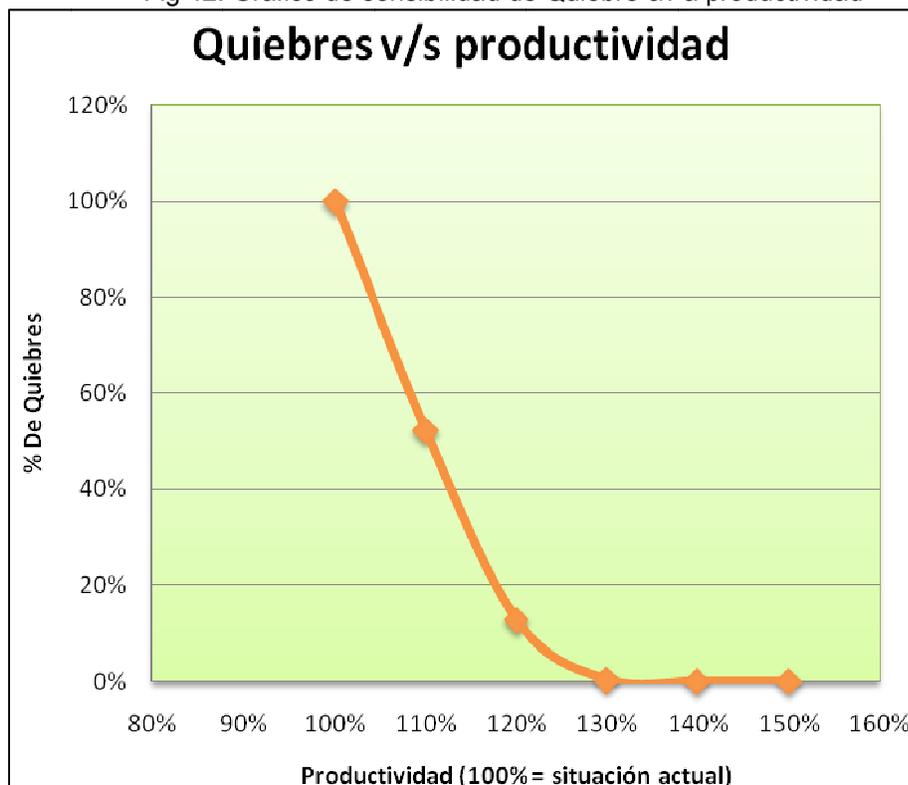


Fig 41. Gráfico de sensibilidad del tiempo de setup c/r a demanda

8.4.5 Productividad

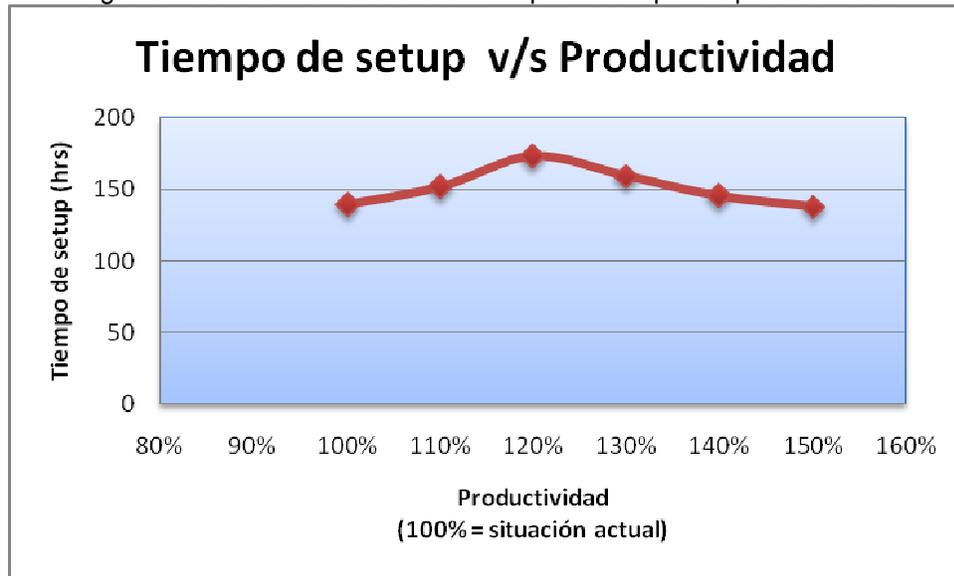
Un alcance relevante de esta memoria es evaluar el impacto de un aumento en la productividad de laminación de la empresa mediante el modelo desarrollado. El resultado del análisis de sensibilidad de este parámetro, con un stock y demanda promedio, indica que un aumento de un 10% de la productividad equivale a una disminución de un 47% de los quiebres, aumentando aún más conforme aumenta la productividad. En el caso de un aumento en la productividad superior al 40% se comienza a tener soluciones con una disminución en los quiebres de stock cercana al 100%. El siguiente gráfico refleja lo anterior:

Fig 42. Gráfico de sensibilidad de Quiebre c/r a productividad



Por otro lado, un aumento moderado de la productividad (menor al 30%), conlleva un aumento en el tiempo de setup de hasta un 24%, ya que se gana tiempo disponible para realizar más cambios de producto en los primeros meses y poder evitar quiebres. Sin embargo, una productividad mayor o igual al 30% revierte la tendencia al alza en el tiempo de setup, con lo cual un aumento de un 50% en productividad presenta un menor tiempo de setup que en el escenario actual y un quiebre de stock igual a cero. A continuación, se gráfica lo señalado:

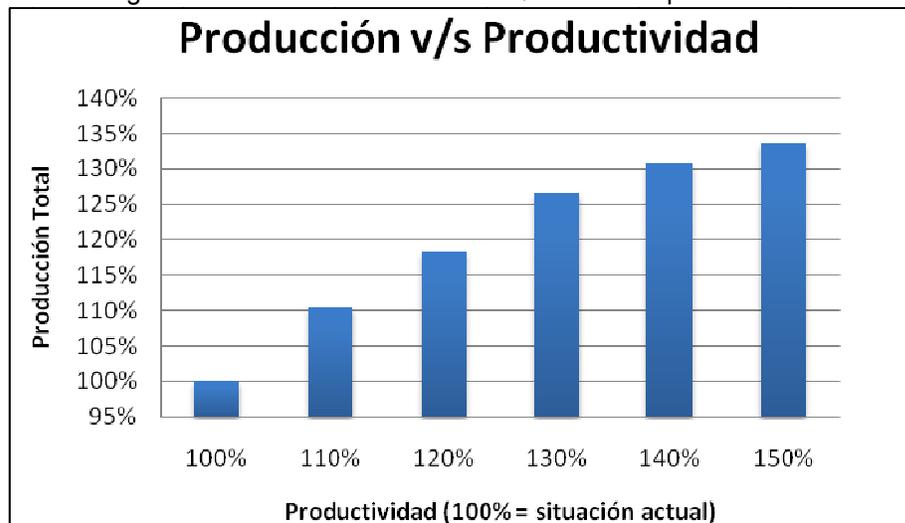
Fig 43. Gráfico de sensibilidad de tiempo de setup c/r a productividad



También, en el análisis se incorporó a la función objetivo el costo de inventario, ya que para evitar quiebres y setup, una fácil solución es aumentar el inventario, pero al incorporar su costo se tiene un aumento de sólo un 2% en promedio en el inventario y, para el caso de un aumento de un 50% en la productividad, el inventario es un 7% superior al inicial, óptimo en términos de costos de setup y quiebres.

Además, el gráfico a continuación muestra el comportamiento de la producción ante un cambio en la productividad:

Fig 44. Gráfico de sensibilidad de Quiebre c/r a productividad



La producción total para tres meses aumenta conforme aumenta la productividad, pero en una menor proporción o pendiente, puesto que el aumento de un 40% en la productividad, equivale a una producción un 30% superior. Esto se debe a que la producción también depende del tiempo disponible, el setup utilizado y las restricciones, tales como, programar producto lento y cumplir las fechas de exportación, por lo que el aumento de producción no es completamente directo.

Por último, se recomienda analizar económicamente la inversión de aumentar la productividad del laminador en un porcentaje cercano o superior a un 30% para disminuir los costos estudiados, tal como se demostró en este capítulo.

9 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se exponen tres escenarios de evaluación que suponen el hecho de que no toda la cantidad valorada como quiebre de stock es efectivamente una venta perdida. Esto se debe a que ante falta de material, se puede llegar a un acuerdo con el cliente para recibir el producto con atraso en la fecha de entrega solicitada, pero efectivamente existe una fuga de clientes no medible que cotiza inmediatamente en la competencia al observar un bajo stock en la empresa, o importa el producto, ya que les favorece el tipo de cambio.

El primer caso supone por juicio experto del departamento de ventas que como mínimo un 20% de los quiebres son pérdida de venta propiamente tal, además se compara la situación real con la solución entregada por el modelo con la estimación propuesta en este proyecto para sept-oct-nov con una reducción de un 36% y un 22% de los quiebres de septiembre y octubre respectivamente. La comparación arroja un ahorro de \$ 17.635.80 y \$ 12.317.760 para los meses estudiados, equivalente a una reducción de un 18% total de los costos por quiebre y setup. La tabla que resume lo señalado se muestra a continuación:

Fig 45. Tabla Escenario en que un 20% de los quiebres estimados son venta perdida.

TABLA DE COSTOS	EMPRESA		MEMORIA	
	Septiembre	Octubre	Septiembre	Octubre
Quiebres (mil Ton)	4,1	3,2	2,6	2,4
Costo por quiebre US\$	578.100	451.200	366.600	338.400
Porcentaje real de quiebres = 20%	115.620	90.240	73.320	67.680
Tiempo de setup (hr)	40	54	50	54
Costo de setup US\$	40.000	54.000	50.000	54.000
Costo total US\$	155.620	144.240	123.320	121.680
COSTO TOTAL PESOS \$	\$ 84.968.520	\$ 78.755.040	\$ 67.332.720	\$ 66.437.280

El segundo escenario, supone que un 40% de los quiebres de stock son venta perdida, presentado un ahorro de \$ 40.731.600 y \$ 24.635.520 en cada mes, con una reducción de los costos totales de un 24%:

Fig 46. Tabla Escenario en que un 40% de los quiebres estimados son venta perdida.

TABLA DE COSTOS	EMPRESA		MEMORIA	
	Septiembre	Octubre	Septiembre	Octubre
Quiebres (Ton)	4,1	3,2	2,6	2,4
Costo por quiebre US\$	578.100	451.200	366.600	338.400
Porcentaje real de quiebres = 40%	231.240	180.480	146.640	135.360
Tiempo de setup (hr)	40	54	50	54
Costo de setup US\$	40.000	54.000	50.000	54.000
Costo total US\$	271.240	234.480	196.640	189.360
COSTO TOTAL PESOS \$	\$ 148.097.040	\$ 128.026.080	\$ 107.365.440	\$ 103.390.560

Finalmente, se muestra la valoración máxima del proyecto, suponiendo que el 100% de los quiebres de stock se traduce en venta perdida. La solución propone un ahorro de \$110.019.000 y \$61.588.800 en cada mes, representado una disminución de un 28% de los costos estudiados.

Fig 47. Tabla Escenario en que un 100% de los quiebres estimados son venta perdida.

TABLA DE COSTOS	EMPRESA		MEMORIA	
	Septiembre	Octubre	Septiembre	Octubre
Quiebres (Ton)	4,1	3,2	2,6	2,4
Costo por quiebre US\$	578.100	451.200	366.600	338.400
Porcentaje real de quiebres = 100%	578.100	451.200	366.600	338.400
Tiempo de setup (hr)	40	54	50	54
Costo de setup US\$	40.000	54.000	50.000	54.000
Costo total US\$	618.100	505.200	416.600	392.400
COSTO TOTAL PESOS \$	\$ 337.482.600	\$ 275.839.200	\$ 227.463.600	\$ 214.250.400

En cualquier caso el proyecto supera el costo de instalar la licencia del software GAMS de aproximadamente US\$ 6000 para implementar la solución. Por otro lado, la evaluación no considera el costo de horas hombre que actualmente se utiliza en la programación y planificación mensual.

Cabe señalar, que ejecutar el modelo con un costo de quiebre menor en el periodo en estudio no genera cambios tan significativos, puesto que este periodo se caracteriza por un tiempo y stock disponible limitado, además de compromisos como la exportación, que impiden gran variación en la solución. Para otros períodos, la valoración del quiebre de stock puede ser parte de la negociación de las Áreas involucradas, puesto que Ventas desea la mayor valoración al quiebre, mientras que el Área Productiva privilegia el costo de setup y Finanzas el de quiebre. Como se indicó anteriormente, actualmente se realiza la programación bajo el supuesto que toda la cantidad quebrada o atrasada es realmente venta perdida, ya que los clientes tienen la posibilidad de comprar a la competencia o importar si el producto no está disponible en el mercado nacional. Además, un atraso en la entrega puede generar un irreparable deterioro en la relación con el cliente.

10 CONCLUSIONES

El presente proyecto arroja resultados de relevancia para el proceso en estudio. Se distinguieron los productos dependiendo rol que cumple cada producto en el negocio, exigiéndole un mayor nivel de servicio a las categorías de destino y rutina por sobre el resto. El modelo reduce en un 45% los quiebres del rol de destino y un 41% del rol de rutina.

El pronóstico de demanda propuesto contribuyó a una reducción de un 36% y 22% de los quiebres setup de septiembre y octubre versus un 17,7% y un 5,4% utilizando el pronóstico actual de la empresa. Además, se demuestra que un pronóstico exacto igual a la demanda real contribuye a disminuir en hasta un 77% los quiebres con el modelo construido.

En el análisis de sensibilidad se comprueba que el tiempo disponible de producción es el parámetro de mayor relevancia, puesto que un 10% menos de este ocasiona al menos 2000 toneladas de quiebre casi un 11% de la venta total. Además, se incluyó el costo de inventario en la función objetivo, comprobando su relevancia en escenarios donde el nivel de stock fuera superior al promedio, o en términos probabilísticos, cuando la cantidad disponible para venta es superior a 1,32 veces la demanda.

Se propone aprovechar la estacionalidad de la demanda en cada semana, en donde el 27% de la venta se concentra en la última semana del mes, no siendo necesario producir toda la cantidad del mes en una sola campaña. Además, los productos deben ser producidos asociando las familias eficientes, observándose que los de mayor demanda deben producirse al menos dos veces al mes en periodos de bajo y mediano stock.

El modelo comprueba que menos producción puede traducirse en menos quiebres. Mientras mejor es el pronóstico menos es la cantidad que se debe producir para protegerse de la incertidumbre.

Por otra parte, se demostró que el modelo permite apoyar la toma de decisiones como importar producto, ya que se observó que una importación que satisfaga sólo un 5% de la demanda total del periodo Sept-Oct-Nov, podría disminuir los quiebres hasta en un 26% más en el periodo. Además, fue posible evaluar un aumento en la productividad de la planta, sobre un 30% como recomendación, para una disminución de los costos estudiados.

Finalmente, la evaluación económica indica que aun cuando un 20% de los quiebres sean considerados como venta perdida, el modelo genera a la compañía un ahorro de hasta 17 millones de pesos mensuales, equivalente a una reducción de un 18% en el total de costos de setup y quiebres. Mientras que considerando que todos los quiebres son ventas perdidas, el modelo estaría reduciendo en promedio 86 millones de pesos en costos de setup y quiebres, con un peak en septiembre de \$110.000.000 de ahorro en quiebres, es decir, \$110.000.000 adicionales para la compañía.

11 BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Ronald H. Ballou, Logística: administración de la cadena de suministro, Pearson Educación, 2004.

Salazar Muñiz, Ximena Antonieta. Diseño de un sistema de planificación de la producción para máquinas laminadoras en Papeles Cordillera S.A. Tesis (ingeniero civil industrial)--Universidad de Chile, 2005.

Unanue González, Oscar Germán. Estudio y pronóstico de demanda a nivel de sku para la cadena regional de supermercados BRYC. Tesis (ingeniero civil industrial)--Universidad de Chile, 2006.

Muñoz Sarmiento, Cristián Andrés. Programación de la producción en una fábrica confeccionadora de calzado. Tesis (ingeniero civil industrial)--Universidad de Chile, 2000.

Administración de Producción y Operaciones. 8° edición Chase, Aquilano y Jacobs, McGrawhill; Colombia; 2000

Aquilano y Jacobs. Administración de Producción y Operaciones. 8ª edición Chase. McGrawHill, Colombia, 2000

E. Fernández. Dirección de la Producción, Editorial Civitas, Madrid, 1993

Maynard. Manual del Ingeniero Industrial. 4° Edición W. K. Hodson. McGraw-Hill, México, 1996

12 ANEXOS

Anexo A. ACP Periodo 2006-2009

	Componente	
	1	2
ENERO06	,800	,559
FEBRERO 06	,799	,587
MARZO06	,866	,476
ABRIL06	,834	,516
MAYO 06	,870	,469
JUNIO06	,834	,516
JULIO06	,840	,469
AGOSTO06	,834	,501
SEPTIEM06	,784	,590
OCTUBRE06	,860	,467
NOVIEMB06	,752	,636
DICIEMB06	,829	,497
ENERO07	,830	,538
FEBRERO07	,814	,513
MARZO07	,813	,561
ABRIL07	,830	,512
MAYO07	,858	,497
JUNIO07	,827	,510
JULIO07	,597	,726
AGOSTO07	,797	,525
SEPTIEMB07	,607	,733
OCTUBRE07	,818	,531
NOVIEMB07	,757	,628
DICIEMB07	,678	,700
ENERO08	,501	,667
FEBRERO08	,573	,740
MARZO08	,856	,452
ABRIL08	,713	,645
MAYO08	,721	,620
JUNIO08	,655	,734
JULIO08	,751	,531
AGOSTO08	,845	,506
SEPTIEMB08	,631	,624
OCTUBRE08	,519	,802
NOVIEMB08	,371	,901
DICIEMB08	,456	,862
ENERO09	,596	,764
FEBRERO09	,451	,822
MARZO09	,457	,809
ABRIL09	,725	,650
MAYO09	,533	,820
JUNIO09	,546	,778

Tabla extraída mediante SPSS, con rotación Varimax para un mayor entendimiento de las componentes. Notar que a partir de octubre 08 se tiene mayor relación con la segunda componente.

ACP 2006 -2007 Varianza
total explicada

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de la varianza	% acumulado
1	22,3506639	93,1277663	93,1277663
2	0,50223486	2,09264526	95,2204115
3	0,32838544	1,36827266	96,5886842

ACP Varianza total explicada
periodo 2009

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6,17812917	88,2589881	88,2589881
2	0,46426762	6,63239464	94,8913828
3	0,15792137	2,25601957	97,1474024

**Anexo B. Pronósticos realizados
Julio 2009**

El forecast para pronosticar el mes de Julio 2009 entregó un error medio absoluto de un 15,5% v/s un 18% del error que se comete actualmente.

Imagen. Correlograma Venta septiembre 2008-junio 2009

Sample: 2008M09 2009M06 Included observations: 10						
Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	-0.332	-0.332	1.4725	0.225
		2	-0.098	-0.234	1.6165	0.446
		3	0.106	-0.014	1.8093	0.613
		4	-0.072	-0.068	1.9140	0.752
		5	-0.196	-0.270	2.8391	0.725
		6	0.045	-0.200	2.8990	0.821
		7	-0.004	-0.173	2.8998	0.894
		8	0.000	-0.111	2.8998	0.940

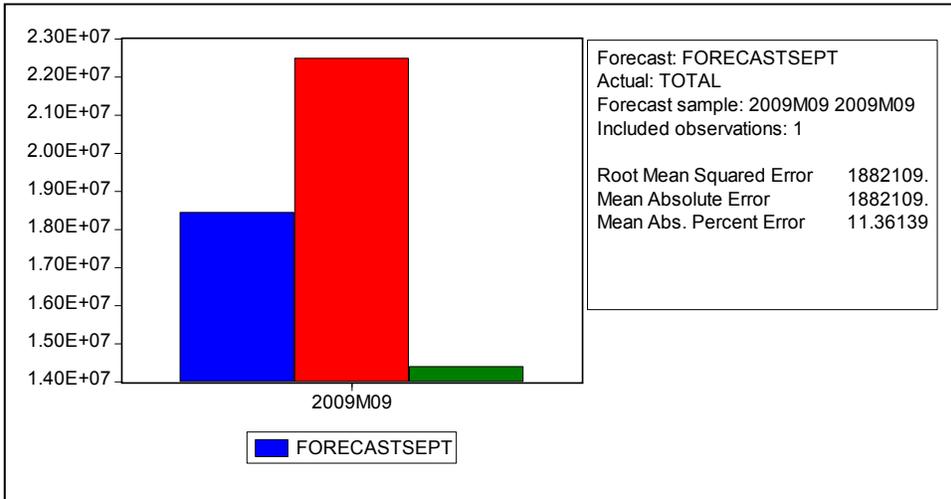
Imagen. Estimación Venta septiembre 2008-junio 2009

Sample: 2008M09 2009M06 Included observations: 10 Convergence achieved after 18 iterations Backcast: 2008M06 2008M08				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	29061630	8140208.	3.570134	0.0118
@TREND()	-192386.5	114973.7	-1.673308	0.1453
AR(1)	-0.829318	0.224147	-3.699885	0.0101
MA(3)	0.978940	0.028019	34.93888	0.0000
R-squared	0.817319	Mean dependent var		15099534
Adjusted R-squared	0.725978	S.D. dependent var		1950459.
S.E. of regression	1021009.	Akaike info criterion		30.79965
Sum squared resid	6.25E+12	Schwarz criterion		30.92069
Log likelihood	-149.9983	F-statistic		8.948031
Durbin-Watson stat	2.679103	Prob(F-statistic)		0.012386
Inverted AR Roots	-.83			
Inverted MA Roots	.50-.86i	.50+.86i	-.99	

Estimación Septiembre

Sample: 2009M01 2009M08
 Included observations: 8
 Convergence achieved after 26 iterations
 Backcast: 2008M09 2008M12

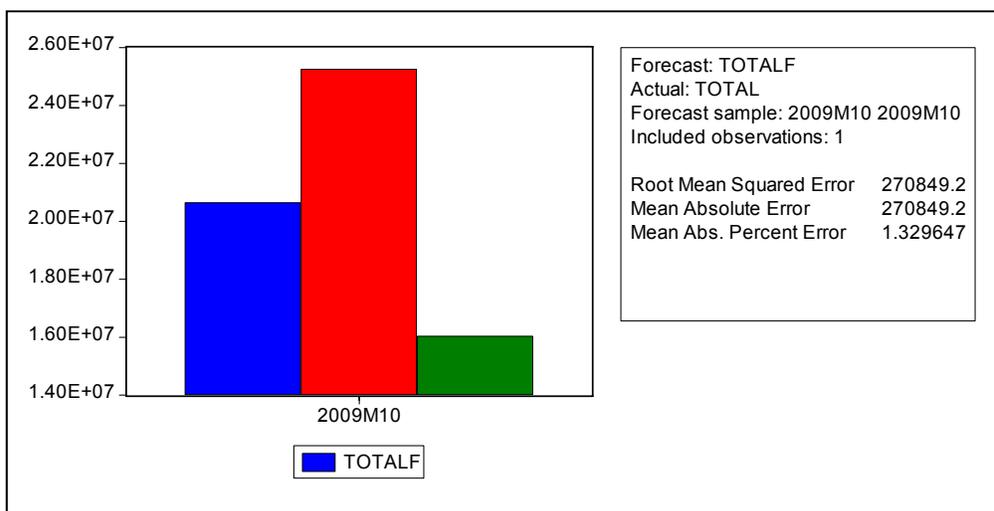
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
@TREND(2)	2331936.	1207032.	1.931958	0.1255
C	-2.00E+08	1.18E+08	-1.685552	0.1672
AR(5)	0.364831	0.287015	1.271124	0.2726
MA(4)	-0.981023	0.038296	-25.61715	0.0000
R-squared	0.897055	Mean dependent var	15818468	
Adjusted R-squared	0.819846	S.D. dependent var	2343689.	
S.E. of regression	994768.4	Akaike info criterion	30.76526	
Sum squared resid	3.96E+12	Schwarz criterion	30.80498	
Log likelihood	-119.0610	F-statistic	11.61854	
Durbin-Watson stat	2.786667	Prob(F-statistic)	0.019175	
Inverted AR Roots	.82	.25+ .78i	.25- .78i	-.66- .48i
		-.66+ .48i		
Inverted MA Roots	1.00	.00+1.00i	-.00-1.00i	-1.00



Estimación Octubre

Sample: 2009M01 2009M09
 Included observations: 9
 Convergence achieved after 22 iterations
 Backcast: 2008M09 2008M12

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
@TREND(2)	2014158.	944191.9	2.133208	0.0998
C	-1.68E+08	90227207	-1.867207	0.1353
SEPTIEMBRE	-1608380.	1613218.	-0.997001	0.3752
AR(5)	0.279117	0.281077	0.993027	0.3769
MA(4)	-0.989993	0.041131	-24.06954	0.0000
R-squared	0.903510	Mean dependent var	15901508	
Adjusted R-squared	0.807019	S.D. dependent var	2206429.	
S.E. of regression	969274.8	Akaike info criterion	30.70666	
Sum squared resid	3.76E+12	Schwarz criterion	30.81623	
Log likelihood	-133.1800	F-statistic	9.363728	
Durbin-Watson stat	2.759434	Prob(F-statistic)	0.026134	
Inverted AR Roots	.77	.24+ .74i	.24- .74i	-.63- .46i
		-.63+ .46i		
Inverted MA Roots	1.00	.00+1.00i	-.00-1.00i	-1.00



Anexo C. ACP meses del 2000-2009. Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	97,106	84,440	84,440	38,358	33,355	33,355
2	3,971	3,453	87,893	23,913	20,794	54,149
3	3,200	2,783	90,676	22,905	19,917	74,066
4	2,069	1,799	92,475	21,127	18,372	92,438
5	1,256	1,092	93,567	1,215	1,057	93,495
6	1,094	,952	94,518	1,177	1,024	94,518

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

Matriz de componentes rotados(a)

	Componente					
	1	2	3	4	5	6
Ene00	,370	,265	,769	,368	-,071	-,086
Feb00	,415	,423	,753	,184	-,045	-,007
Mar00	,435	,290	,732	,106	,093	-,095
Abr00	,446	,333	,689	,345	,045	-,125
May00	,306	,233	,657	,598	-,012	,044
Jun00	,338	,494	,673	,328	,009	,205
Jul00	,327	,449	,675	,192	-,039	,254
Agost00	,403	,257	,723	,406	-,095	,198
Sept00	,466	,166	,604	,540	,024	,042
Oct00	,488	,305	,580	,500	,046	-,113
Nov00	,490	,203	,484	,676	,055	-,056
Dic00	,363	,404	,629	,510	-,105	,013
Ene01	,482	,153	,557	,632	,057	,044
Feb01	,482	,131	,593	,511	,160	,155
Mar01	,485	,346	,600	,424	,054	,170
Abr01	,525	,350	,267	,619	,100	,033
May01	,493	,389	,569	,400	-,129	-,205

Jun01	,348	,521	,535	,460	-,029	-,165
Jul01	,305	,583	,625	,217	-,137	,195
Agost01	,297	,495	,648	,414	-,093	,080
Sept01	,311	,326	,775	,261	-,047	-,115
Oct01	,304	,388	,719	,388	,047	,108
Nov01	,410	,242	,587	,609	,082	-,139
Dic01	,337	,424	,582	,550	,085	-,048
Ene02	,410	,339	,698	,455	,004	,018
Feb02	,484	,318	,609	,440	-,014	,010
Mar02	,418	,185	,441	,741	-,016	,034
Abr02	,345	,360	,547	,623	,014	-,058
May02	,239	,476	,525	,564	-,106	-,109
Jun02	,558	,359	,615	,288	,076	,150
Jul02	,433	,431	,387	,628	,105	-,144
Agost02	,554	,163	,453	,622	,091	,132
Sept02	,334	,345	,355	,752	,011	,081
Oct02	,539	,350	,473	,530	-,073	-,023
Nov02	,673	,346	,413	,299	,236	,084
Dic02	,414	,368	,401	,690	-,103	-,015
Ene03	,423	,436	,433	,513	-,139	,279
Feb03	,283	,406	,562	,338	,293	-,056
Mar03	,364	,554	,276	,560	-,241	-,039
Abr03	,713	,371	,250	,452	-,009	-,020
May03	,546	,300	,238	,713	,031	,062
Jun03	,672	,320	,250	,501	,056	-,204
Jul03	,613	,477	,322	,347	-,079	,187
Agost03	,657	,363	,318	,526	-,054	,084
Sept03	,620	,495	,442	,347	,104	-,061
Oct03	,766	,388	,386	,280	-,031	-,003
Nov03	,604	,442	,518	,325	,047	,050
Dic03	,730	,310	,495	,315	,007	,002
Ene04	,737	,331	,454	,349	,083	,014
Feb04	,533	,565	,467	,373	,037	-,039
Mar04	,650	,468	,469	,309	-,083	,025
Abr04	,658	,359	,437	,461	-,040	,070
May04	,533	,543	,450	,378	,148	,028
Jun04	,798	,380	,364	,107	-,089	,089
Jul04	,728	,298	,322	,496	,068	,095
Agost04	,433	,486	,350	,641	-,012	,084
Sept04	,749	,238	,278	,463	-,064	,033
Oct04	,654	,396	,404	,450	,087	,050
Nov04	,395	,620	,402	,480	,046	-,032
Dic04	,628	,479	,382	,371	,081	,213
Ene05	,436	,543	,454	,473	-,129	,000
Feb05	,551	,512	,311	,546	,028	-,042
Mar05	,484	,594	,390	,466	,026	,069
Abr05	,714	,397	,436	,319	-,102	,039
May05	,556	,446	,338	,591	,111	-,015
Jun05	,583	,386	,294	,524	-,334	,101
Jul05	,712	,440	,359	,354	,145	,039
Agost05	,650	,517	,399	,291	-,054	-,179
Sept05	,723	,382	,401	,314	-,232	-,027

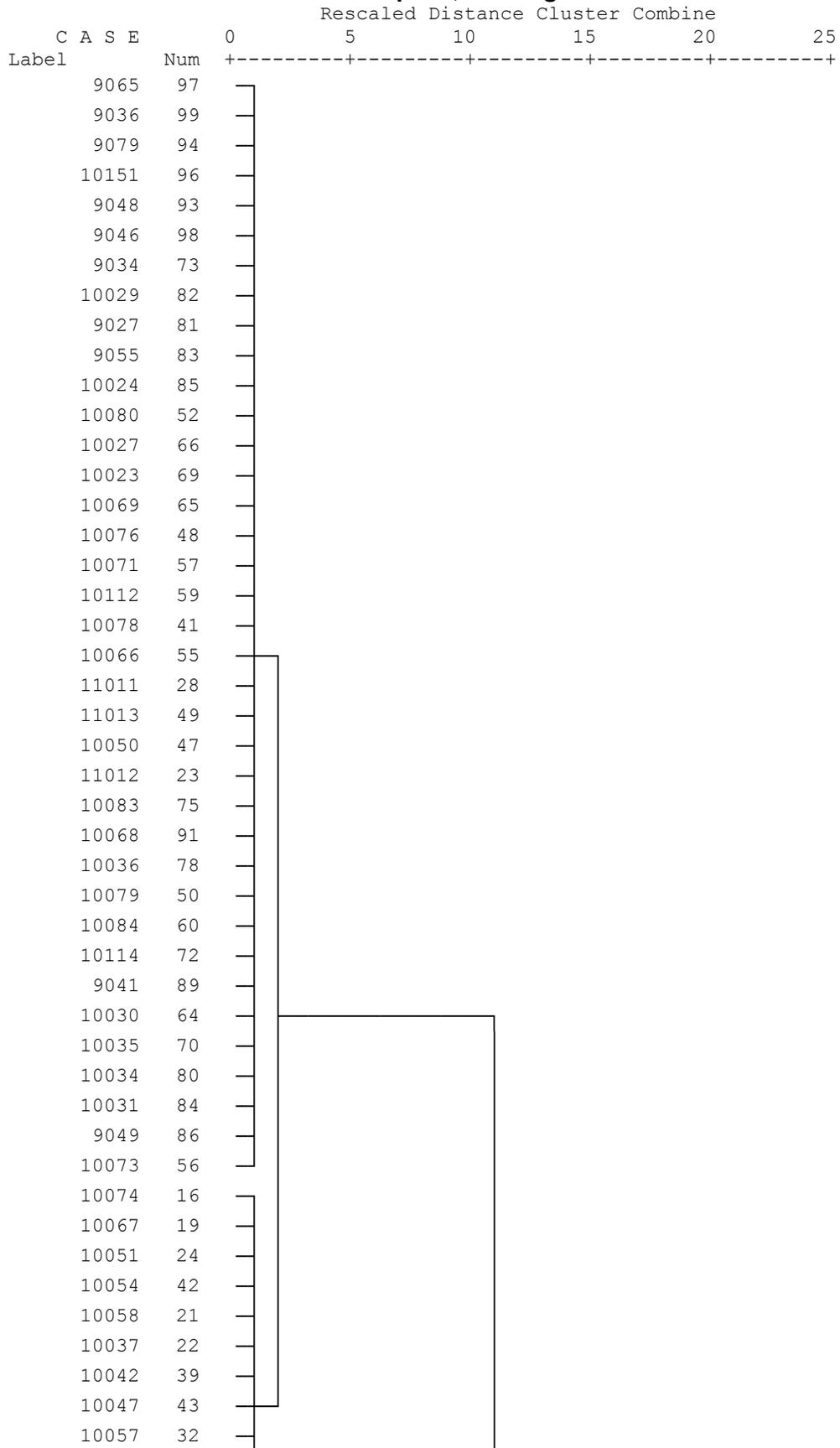
Oct05	,673	,502	,384	,350	-,087	-,055
Nov05	,778	,334	,329	,402	-,073	-,020
Dic05	,733	,399	,393	,356	,098	-,021
Ene06	,680	,342	,386	,487	-,078	-,075
Feb06	,676	,479	,372	,392	-,023	-,015
Mar06	,748	,289	,386	,436	-,009	-,068
Abr06	,746	,394	,361	,344	-,152	-,021
May06	,809	,308	,344	,332	,079	,023
Jun06	,766	,393	,368	,307	-,115	-,024
Jul06	,751	,379	,378	,287	,196	,034
Agost06	,792	,424	,307	,262	-,068	,036
Sept06	,726	,527	,341	,220	,056	-,029
Oct06	,850	,251	,325	,280	,004	,094
Nov06	,658	,432	,367	,452	,027	,043
Dic06	,743	,303	,311	,445	-,131	,131
Ene07	,707	,398	,365	,430	,032	-,009
Feb07	,697	,267	,363	,490	-,143	,020
Mar07	,739	,426	,285	,410	-,019	,016
Abr07	,678	,427	,366	,420	,097	-,082
May07	,790	,315	,293	,413	,006	-,020
Jun07	,732	,379	,310	,412	-,048	-,098
Jul07	,543	,448	,263	,562	,031	,240
Agost07	,721	,444	,337	,290	,052	,133
Sept07	,502	,679	,296	,342	-,055	-,056
Oct07	,764	,464	,330	,247	,066	,092
Nov07	,597	,599	,344	,347	-,003	-,090
Dic07	,639	,590	,317	,313	-,072	,077
Ene08	,311	,743	,230	,330	,339	-,006
Feb08	,564	,629	,297	,295	-,159	-,053
Mar08	,797	,415	,285	,237	,074	-,025
Abr08	,625	,602	,293	,305	,090	,007
May08	,588	,610	,323	,320	-,048	,034
Jun08	,567	,658	,379	,281	,009	-,012
Jul08	,614	,575	,331	,259	,137	-,163
Agost08	,676	,530	,304	,269	,173	-,057
Sept08	,492	,554	,317	,462	-,019	-,122
Oct08	,480	,591	,340	,440	-,014	,230
Nov08	,332	,764	,283	,404	-,058	,158
Dic08	,405	,782	,352	,253	,071	,058
Ene09	,547	,631	,323	,339	-,020	,111
Feb09	,442	,700	,292	,345	-,151	-,094
Mar09	,388	,836	,335	,026	-,014	-,014
Abr09	,635	,387	,331	,450	,052	,104
May09	,526	,585	,340	,372	-,174	,169
Jun09	,439	,776	,388	,099	-,023	-,037
Jul09	,431	,756	,289	,297	,084	,054

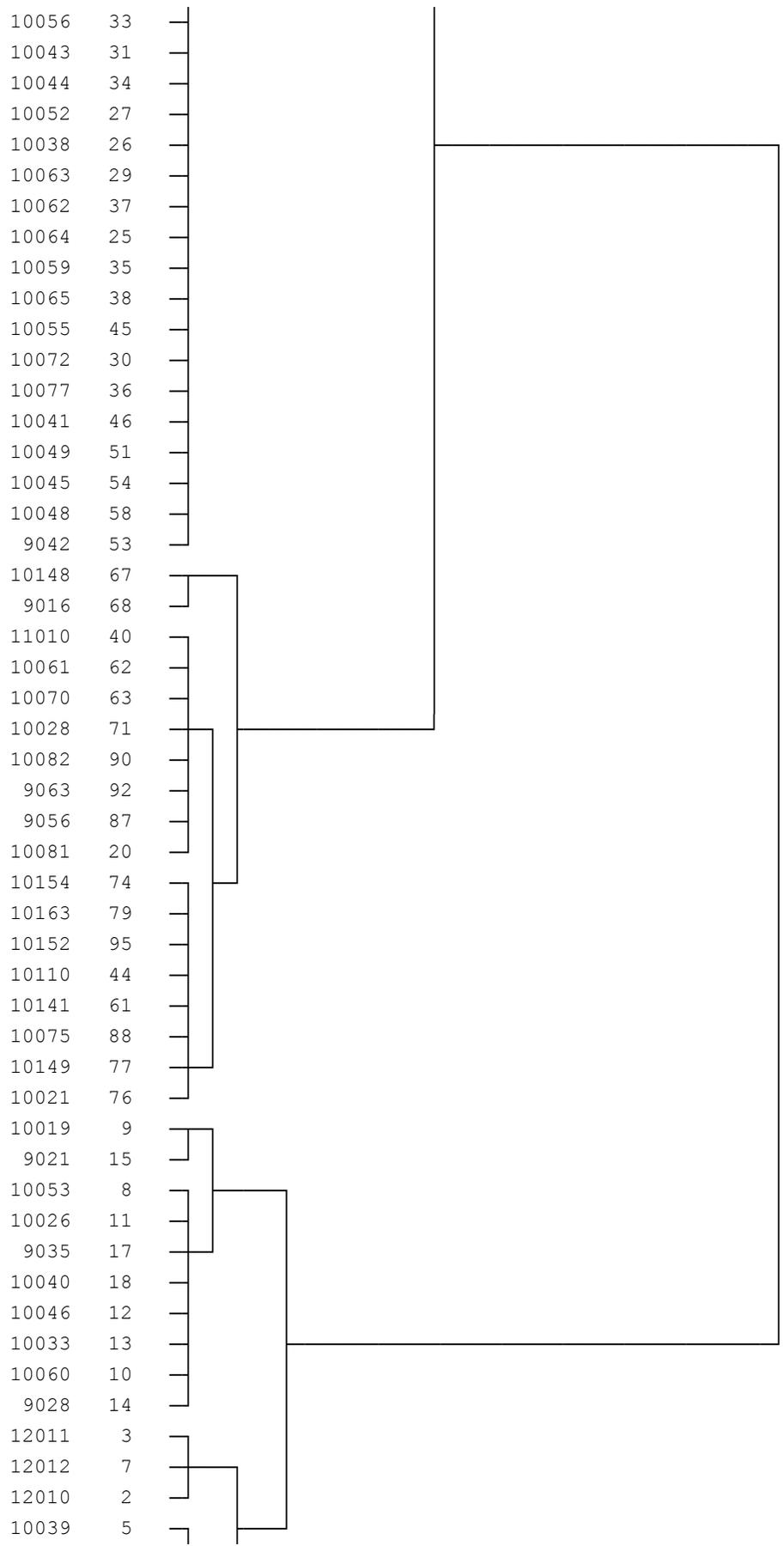
Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Método de rotación: Normalización Varimax con Kaiser.

a La rotación ha convergido en 15 iteraciones.

Anexo D. Análisis de cluster Jerárquico, Dendograma usando método de Ward



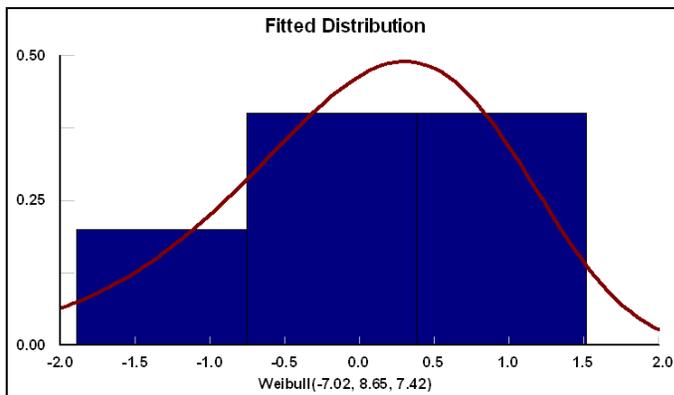


10032	6	
10025	4	
10018	1	

Anexo E. Tabla Capacidades productivas.

CAPACIDADES PRODUCTIVAS					
Unidad Productiva	Familia	Dimensiones	Largos (mts)	Productividad (Ton/hr)	% Producción
Laminación Colina	Barra de hormigón	8 mm	6 a 12	37	12%
Laminación Colina	Barra de hormigón	10 mm	6 a 12	56	11%
Laminación Colina	Barra de hormigón	12 mm	6 a 12	59	11%
Laminación Colina	Barra de hormigón	16 mm	6 a 12	60	12%
Laminación Colina	Barra de hormigón	18 mm	6 a 12	56	5%
Laminación Colina	Barra de hormigón	22 mm	6 a 12	55	8%
Laminación Colina	Barra de hormigón	25 mm	6 a 12	58	5%
Laminación Colina	Barra de hormigón	28 mm	6 a 12	56	4%
Laminación Colina	Barra de hormigón	32 mm	6 a 12	57	4%
Laminación Colina	Barra de hormigón	36 mm	6 a 12	55	2%
Laminación Colina	Rollo de hormigón	6 mm	-	55	1%
Laminación Colina	Rollo de hormigón	8 mm	-	53	8%
Laminación Colina	Rollo de hormigón	10 mm	-	57	5%
Laminación Colina	Rollo de hormigón	12 mm	-	56	5%
Laminación Colina	Rollo de alambón	5,5 a 12 mm	-	44 a 52	8%
Laminación Colina	Barra lisa	10 mm	6	49	0%

Anexo F. Distribución error de pronóstico.



Auto::Fit Distributions		
distribution	rank	acceptance
Weibull(-7.02, 8.65, 7.42)	99.9	accept
Lognormal(-470, 6.15, 0.00202)	99.7	accept
Normal(1.09e-15, 0.949)	99.5	accept
Logistic(1.09e-15, 0.551)	99	accept
Pearson 5(-16, 275, 4.37e+03)	98.8	accept
Triangular(-2.41, 1.91, 0.493)	92.3	accept
Extreme Value(-0.488, 0.966)	89.9	accept
Beta(-3.41, 1.51, 4.52, 2.35)	79.9	accept
Uniform(-1.89, 1.51)	52.9	accept

Anexo G, tiempos de setup (Hrs).

Tiempo de setup, cambio de Diámetro:

Diámetro	Hrs
6	0,333
8	0,367
10	0,350
12	0,583
16	0,000
18	0,583
22	0,583
25	0,217
28	0,125
32	0,125
36	0,833
9,5	0,727

5,5	0,727
11,5	0,727
7,5	0,727
6,5	0,810
20	0,753
14	0,717
R8	0,500
R10	0,500
R12	0,500
RED8	0,693
RED10	0,625
RED12	0,750

Tiempo de setup, cambio de Calidad:

Diámetro	Calidad			
	A630	A440	1005 o 1006	1020
6	0,67	0,67	0,67	0,17
8	0,42	0,42	0,17	0,17
10	0,42	0,42	0,17	0,17
12	0,42	0,42	0,17	0,17
16	0,42	0,42	0,17	0,17
18	0,58	0,58	0,17	0,17
22	0,58	0,58	0,17	0,17
25	0,58	0,58	0,17	0,17
28	0,58	0,58	0,17	0,17
32	0,58	0,58	0,17	0,17
36	0,17	0,17	0,17	0,17
9,5	0,17	0,17	0,25	0,25
5,5	0,17	0,17	0,25	0,25
11,5	0,17	0,17	0,25	0,25
7,5	0,17	0,17	0,25	0,25
6,5	0,17	0,17	0,17	0,17
20	0,17	0,17	0,17	0,17
14	0,17	0,17	0,17	0,17
R8	0,42	0,42	0,17	0,17
R10	0,42	0,42	0,17	0,17
R12	0,42	0,42	0,17	0,17
RED8	0,17	0,17	0,25	0,25
RED10	0,17	0,17	0,25	0,25
RED12	0,17	0,17	0,25	0,25

Tiempo de setup, cambio de Largo:

Producto	Hr
i001	0,05
i002	0,05
i003	0,05
i004	0,05
i005	0,05
i006	0,05
i007	0,05
i008	0,05
i009	0,05
i010	0,05
i011	0,05
i012	0,05
i013	0,05
i014	0,05
i015	0,05
i016	0,05
i017	0,05
i018	0,05
i019	0,05
i020	0,05
i021	0,05
i022	0,05
i023	0,05
i024	0,05
i025	0,05
i026	0,05
i027	0,05
i028	0,05
i029	0,05
i030	0,05
i031	0,05
i032	0,05
i033	0,05
i034	0,05
i035	0,05
i036	0,05
i037	0,05
i038	0,05
i039	0,05
i040	0,05
i041	0,05
i042	0,05

i043	0,05
i044	0,05
i045	0,05
i046	0,05
i047	0,05
i048	0,05
i049	0,05
i050	0,05
i051	0,05
i052	0,05
i053	0,05
i054	0,05
i055	0,05
i056	0,05
i057	0,05
i058	0,05
i059	0,05
i060	0,05
i061	0,05
i062	0,05
i063	0,05
i064	0,05
i065	0,05
i066	0,05
i067	0,05
i068	0,05
i069	0,05
i070	0,05
i071	0,05
i072	0,05
i073	0,05
i074	0,05
i075	0,05
i076	0,05
i077	0,05
i078	0,05
i079	0,05
i080	0,05
i081	0,05
i082	0,05
i083	0,05
i084	0,05
i085	0,05

i086	0,05
i087	0,05
i088	0,05
i089	0,05
i090	0,05
i091	0,05
i092	0,05
i093	0,05
i094	0,05
i095	0,05
i096	0,05
i097	0,05
i098	0,05
i099	0,05
i100	0,05
i101	0,05
i102	0,05
i103	0,05
i104	0,05
i105	0,05
i106	0,05
i107	0,05
i108	0,05
i109	0,05
i110	0,05
i111	0,05
i112	0,05
i113	0,05
i114	0,05
i115	0,05
i116	0,05
i117	0,05
i118	0,05
i119	0,05
i120	0,05
i121	0,05
i122	0,05
i123	0,05
i124	0,05
i125	0,75

Anexo H. Cantidad producida por modelo con estimación propuesta del proyecto.

	t01	t02	t03	t04	t05	t06
i001	493.444		455.795		825.000	
i002			460.546		1.050.000	
i003	907.049					
i004		835.691			633.000	
i005		804.611			600.000	
i006		283.753		439.000		673.000
i007			440.000			
i008	775.635					
i009			62.555		407.000	
i010	557.043					
i011			259.525		268.000	
i012	464.584					
i013				185.574		287.000
i014	297.940				201.000	
i015	85.946				429.000	
i016			206.000			
i017		237.738				221.087
i018		35.713			135.000	
i019			316.000			
i020				90.000		
i021	143.307					
i022		89.059			97.000	
i023	244.657					
i024	183.539					
i025	161.831					
i026		80.000			117.791	
i027	115.000					
i028					169.000	
i029	96.212					
i030			110.645			
i031		57.277			44.000	
i032	99.094					
i033	99.689					
i034	37.000					
i035	111.886					
i036			40.000			
i037	83.000					
i038			122.000			
i039		62.896			68.000	
i040				208.133		
i041			89.684			
i042	104.392					
i043	101.284					
i044	96.000				96.000	
i045	70.727					

i046		34.000		37.893
i047	54.000			
i048			48.000	
i049			244.087	
i050				78.000
i051	54.003			
i052				71.000
i053				112.774
i054	53.528			
i055			76.000	
i056			59.820	
i057			53.000	
i058	75.538			
i059				40.000
i060				83.905
i061				40.000
i063			57.473	
i066			37.000	
i069			36.998	
i070		26.879		28.000
i071		45.231		
i072		55.000		19.000
i073		25.812		28.000
i074	10.000			
i075				68.890
i076	15.902			22.000
i077	16.889			27.000
i079			11.000	
i081	26.983			
i082			25.988	
i085		22.326		
i087	30.356			
i088			16.258	
i089				14.552
i090				26.549
i095	6.479			
i100		1.545.000		2.607.000
i101				15.000
i103		388.000		
i105		134.000		
i106				35.000
i108				107.000
i110		138.000		162.000
i113	100.000			
i115			424.000	
i116		344.000		
i117			460.000	
i118	52.000			
i119			45.000	
i121				1.540.000
i122		129.000		

i124				2.000.000		
+	t07	t08	t09	t10	t11	t12
i001		711.000		620.000		403.000
i002				595.000		894.101
i003	750.000			480.000		729.000
i004		740.000		462.000		609.000
i005		633.546	570.454		521.000	
i006			596.000		665.000	
i007	1.008.000			384.844		1.040.000
i008	753.000			415.000		
i009		355.000		286.000		189.000
i010	493.000			355.000		
i011		331.000		158.000		252.000
i012	356.000			286.000		
i013			224.000		266.000	
i014		345.000				311.000
i015				155.000		126.000
i016	230.000		134.000		379.000	
i017			148.913		272.000	
i018		161.000	1.000		117.000	
i019			78.000		231.000	
i020			58.000		148.000	
i021	126.000			109.000		
i022		165.000	1.000		85.000	
i023	214.000					211.000
i024	121.000			91.000		
i025	93.152			88.000		
i026			92.000		66.000	
i027	80.000			65.000		
i028				131.000		
i029	84.000			72.000		
i030	82.000		30.000		118.000	
i031		103.000			56.000	
i032	90.000			75.000		
i033	82.000			67.000		
i034	93.000			64.000		
i035	92.000			55.000		
i036	37.000		20.000		56.000	
i037	82.000			61.000		
i038			25.000		93.000	
i039			87.000		54.000	
i041	71.000				67.000	
i042	66.000			36.000		
i043	49.000			41.000		
i044		57.000		50.619		88.000
i045	68.000			53.000		
i046		49.169			37.000	
i047	49.000			76.000		
i048	43.000		23.000		69.000	

i049					157.000
i050			40.000	100.000	
i051	46.000			44.000	
i052			18.000		60.000
i053					69.000
i054	45.000			44.000	
i055			22.000		74.000
i056	55.000				57.000
i057			15.000		44.000
i058				40.462	
i059		67.000		45.000	68.000
i060			29.000		71.000
i061				23.000	26.000
i062	24.000			19.000	
i063			14.000		39.000
i064			24.000		28.000
i065			28.654		30.346
i066		22.000			26.000
i069		37.000			38.000
i070			24.000		29.000
i071				19.299	32.000
i072			42.000		26.000
i073			14.000		31.000
i074				29.000	19.000
i075			2.453		44.000
i076		26.000			25.000
i077				14.000	
i079		10.000		22.000	
i080			7.000		17.459
i081		33.000			32.000
i082		23.000			26.000
i084			14.000		19.000
i085		22.000			24.000
i088					9.000
i090					16.000
i091					6.000
i095		7.000			7.000
i100					863.885
i101					59.000
i102	301.000				312.000
i103					280.000
i104		329.000			238.000
i105					133.000
i106					36.000
i107	163.000				168.000
i109		165.000			
i110					53.000
i113	92.000				
i114	96.000				
i115		626.000			
i116			407.000		

i117		508.000	
i118	82.000		
i119			48.000
i120	50.000		
i121		1.560.000	
i122		142.000	
i124		1.985.000	