

UNIVERSIDAD  
TORCUATO DI TELLA



ESCUELA DE NEGOCIOS  
MBA VESPERTINO 2010  
"OPTIMIZACION DEL COSTO DE  
OPERACION DE UNA PLANTA DE  
CORDON PRETENSADO  
MEDIANTE MODELADO Y  
SIMULACION"

*AUTOR: GUILLERMO R. GUEVARA*

*TUTOR: ROBERTO ARTERO*

*Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Junio  
de 2012*

## AGRADECIMIENTOS

A Sil, mi esposa y compañera, por acompañarme con paciencia durante la cursada del MBA y el transcurso de la presente investigación. A mis compañeros de grupo del MBA Vespertino 2010, Grupo VIII, por dar lo mejor de sí en cada uno de los trabajos que hicimos juntos. A Roberto, mi tutor, por la orientación en la investigación y el desarrollo de la tesis. A mis colegas y compañeros de trabajo por ayudarme con la investigación, proporcionando datos y puntos de vista. A todo el cuerpo de profesores que integran el MBA de la UTDT, por guiarnos en la búsqueda del conocimiento.

Guillermo Guevara  
Buenos Aires, Junio 2012

## RESUMEN

La presente investigación fue motivada por la necesidad actual que tienen varios sectores de la industria local, consistente en aumentar la rentabilidad sin tener la posibilidad de aumentar los precios de venta. Si bien se ha seleccionado una planta en particular para el trabajo, la metodología puede ser aplicada de la misma manera en cualquier tipo de fábrica para la optimización económica de sus operaciones.

Para adquirir las herramientas adecuadas para tratar el problema, fue necesario profundizar en los Sistemas de Costeo y la Teoría de las Operaciones, hallando que la Teoría de las Restricciones otorgaba las herramientas apropiadas para conducir la investigación, que permiten vincular ambos mundos de manera sencilla, asociando las variables que se manejan en el día a día en la planta con las variables financieras, y la manera de incidir sobre ellas en el corto plazo.

Luego, como instrumento de análisis, se recurrió al Modelado y Simulación de Operaciones, mediante programas de computadora dedicados a ello. La utilización de estas herramientas fue necesaria para la caracterización de la planta y el estudio de la incidencia de las distintas variables que afectan a los indicadores performance. Se describió cómo se construyó el modelo, y mediante simulaciones de Montecarlo se realizó una caracterización de la planta. A continuación se compararon los resultados de la simulación con los datos relevados en los historiales de producción, y de las discrepancias surgieron de manera natural las oportunidades de mejora de la operación, y su impacto en el margen de ganancia, identificando que la eliminación de la principal causa de baja performance traería como consecuencia un aumento del margen antes de impuestos del 11 %. Otras acciones fueron identificadas para aumentar los márgenes, aunque su impacto es secundario frente a la acción principal.

## **PALABRAS CLAVES**

Simulación de Operaciones

Optimización de Costos

Performance de las Operaciones

Teoría de las Restricciones

## TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN.....	2
PALABRAS CLAVES.....	3
TABLA DE CONTENIDOS.....	4
INTRODUCCION.....	7
CAPITULO I: MEDICION DE LA PERFORMANCE DE LAS OPERACIONES....	11
1.1 Medidas de Performance .....	11
1.1.1 Medidas asociadas al Costo.....	11
1.1.2 Costeo por absorción y costeo directo.....	12
1.1.3 Costeo ABC.....	16
1.1.4 La contabilidad según la Teoría de las Restricciones.....	16
1.1.5 Comparación de la contabilidad propuesta por TOC y el modelo tradicional .....	18
1.2 Inventario y Calidad de Servicio.....	19
1.2.1 Costo de acarreo de inventarios.....	20
1.2.2 Costo de incumplimiento de pedidos.....	23
1.3 Puntos destacados.....	24
CAPITULO II: LA TEORIA DE LAS RESTRICCIONES Y LA ESTRATEGIA DE OPERACION DE UNA PLANTA.....	25
2.1 La Teoría de las Restricciones.....	25
2.2 Estrategias de Operaciones.....	27
2.3 DBR.....	28
2.3.1 Introducción .....	28
2.3.2 Dependencia de sucesos, fluctuaciones estadísticas y su incidencia en la performance de una planta balanceada.....	29
2.3.3 Dependencia de sucesos, fluctuaciones estadísticas y su incidencia en la performance de una planta no balanceada.....	35
2.3.4 Implementación de DBR en el modelo de ejemplo.....	37
2.4 La Naturaleza de la Restricción .....	40
2.5 Puntos desatacados.....	40
CAPITULO III: DESCRIPCION DEL PRODUCTO Y EL MERCADO.....	42
3.1 Descripción del producto.....	42

3.2 El mercado local y las variables macroeconómicas que lo afectan.....	45
3.3 Oportunidades en el exterior .....	47
3.4 Precio.....	48
3.5 Perspectivas futuras.....	50
3.6 Puntos destacados.....	51
<b>CAPÍTULO IV: MODELADO Y SIMULACION DE LA PLANTA DE CORDON PRETENSADO .....</b>	
4.1 Descripción de la planta .....	52
4.2 Diagrama de Flujos de la planta.....	55
4.3 Modelo por computadora .....	56
4.3.1 Datos de procesos y operaciones.....	56
4.3.2 Construcción del modelo en EXTEND® .....	62
4.4 Caracterización de la planta a partir de la simulación por computadora .	68
4.4.1 Capacidad .....	68
4.4.2 Cuellos de botella .....	70
4.4.3 WIP .....	72
4.4.4 Stock Intermedio.....	73
4.4.5 Tiempo de ciclo.....	75
4.5 Análisis de Sensibilidad de la capacidad de producción .....	76
4.5.1 Análisis de Sensibilidad de la capacidad de producción frente a las velocidades de cada máquina .....	76
4.5.2 Análisis de sensibilidad de la capacidad de producción frente a los tiempos de set-up de cada máquina.....	78
4.5.3 Resumen de sensibilidades.....	79
4.6 Agregado de una segunda trefiladora .....	80
4.7 Modificación del tamaño del batch .....	82
4.8 Influencia del mix de producción .....	83
4.9 Puntos destacados.....	85
<b>CAPÍTULO V: PERFORMANCE ACTUAL DE LA PLANTA .....</b>	
5.1 Throughput.....	88
5.2 WIP .....	89
5.3 Gastos de Operación .....	95
5.4 Cumplimiento de programas .....	99
5.6 Puntos destacados.....	99

CAPÍTULO VI: PROCESO DE MEJORA CONTINUA .....	101
6.1 PASO 1: Identificar las restricciones del sistema .....	101
6.1.1 Problemas relevados en la trefiladora .....	102
6.1.2 Calidad de la materia prima .....	103
6.2 PASO 2: Explotar las restricciones del sistema .....	105
6.3 PASO 3: Subordinar todos los procesos a la restricción del sistema ....	106
6.4 PASO 4: Elevar la(s) restricción(es) del sistema.....	106
6.5: Verificar si la restricción ha sido superada .....	107
6.6 Puntos destacados.....	107
CAPÍTULO VII: EVALUACION DE PROYECTOS .....	109
7.1 Evaluación Financiera de Decisiones.....	109
7.2 Inversión en Reparación Integral de la Cableadora .....	111
7.2.1 Cuantificación económica de los escenarios .....	112
7.2.1.1 OPCION 1: Reparación Programada durante 2012.....	112
7.2.1.2 OPCION 2: No reparar .....	118
7.2.1.3 Cálculo del Valor Actual del Flujo de Fondos Diferencial de ambos escenarios .....	118
7.3 Evaluación destinación de una trefiladora extra para la producción de alambre para cordón .....	119
Bibliografía.....	128

## INTRODUCCION

En varios sectores de la industria las empresas locales se ven hoy obligadas a mejorar la rentabilidad del negocio para sobrevivir. Dada la creciente competencia que representa la industria China, la gran capacidad ociosa de producción en todo el mundo, el incremento de costos locales, y finalmente dado que un aumento de precios aumentaría el riesgo de ingreso de nuevos jugadores al mercado, la minimización de costos parecería ser fundamental para revertir la continua disminución de los márgenes. La tarea de minimizar los costos de una empresa es responsabilidad de todas las áreas que la integran, sin embargo, según se mostrará a lo largo de este trabajo, no podemos garantizar que la optimización local de los costos conduzca a la optimización global de la empresa, y tal filosofía de pensamiento puede en determinadas circunstancias conducir a resultados opuestos a los buscados, por ello es necesario profundizar el análisis y llegar a las causas primarias que restringen la rentabilidad en cada caso.

Dentro del área de Operaciones, los costos que se desea minimizar son aquellos que son afectados precisamente por la estrategia de operación. La estrategia de operación puede dar lugar a la acumulación de inventarios innecesarios, al atraso o pérdida de pedidos y a la necesidad de incurrir en horas extra para cumplir con los pedidos. Cada una de estas componentes da lugar a un costo asociado, y existe una relación de compromiso entre cada una de ellas, no pudiendo en general actuar de manera independiente sobre éstas.

La Teoría de las Operaciones otorga un marco adecuado para el estudio de estos problemas, pero dada la complejidad de estos problemas resulta de utilidad complementar la Teoría de Operaciones con simulaciones por computadora. Las herramientas de simulación se vienen usando en el marco de la Investigación Operativa desde un largo tiempo atrás (D.G. Kendall, 1953). Por simulación se entiende a la técnica de armar un modelo estocástico de una situación real, y llevar a cabo muestreos sobre el mismo. El carácter estocástico es lo que realmente diferencia a la simulación de un experimento de muestreo clásico, ya que en lugar de tomar muestras de datos históricos



para sacar conclusiones, estos se utilizan para construir un modelo abstracto para ser estudiado (J. Harling , 1957). Según la APICS (The Association for Operations Management) la simulación consiste en utilizar información representativa para reproducir en un modelo varias condiciones que son dadas en el sistema real. Las ventajas de la simulación frente a la experimentación directa son mayormente el bajo costo y tiempo de la simulación frente a la experimentación. Los nuevos programas por computadora de bajo costo y sencilla programación han hecho posible que la simulación sea utilizada como una herramienta de todos los días por profesionales de la industria, consultores, profesores y estudiantes. Sin embargo, para que la simulación sea una herramienta de uso adecuado en casos reales ciertos recaudos deben ser tenidos en cuenta en el diseño y validación del modelo (Monish Madan, 2005). Se propone en la siguiente tesis analizar un caso real de una planta de Cables de Acero para Hormigón Pretensado, que debe afrontar determinadas restricciones y un cierto grado de variabilidad en la disponibilidad de las instalaciones, con el objetivo principal de encontrar la estrategia de operación de la planta que optimiza económicamente la operación, utilizando técnicas de simulación por computadora para complementar la teoría de las operaciones, de modo de evitar hacer simplificaciones. En base a lo descrito anteriormente se plantean los siguientes interrogantes:

¿Qué factores restringen hoy la rentabilidad de la planta? ¿Es posible mejorar la rentabilidad de la planta modificando la estrategia de operación? ¿En cuánto?

Como objetivo principal se propone *establecer las medidas necesarias para aumentar la rentabilidad de la planta, sin afectar negativamente la calidad del producto o la calidad de servicio, y estimar la magnitud en la que se puede mejorar*. Como objetivos secundarios, se propone:

- *caracterizar la planta mediante parámetros definidos por la Teoría de las Operaciones*
- *evaluar la incidencia de distintas variables en la performance de la planta*
- *evaluar una inversión destinada a aumentar la capacidad de uno de los procesos (reparación integral de máquina cableadora)*

- *evaluar el mix de producción óptimo para la planta, dadas las actuales capacidades y demandas del mercado*
- *evaluar las ventajas de la utilización de simulaciones para la Gestión de las Operaciones*

Distintos factores justifican el objetivo de la presente investigación:

- Costos crecientes seguirán disminuyendo los márgenes de las empresas de la industria: se espera seguir teniendo inflación en U\$\$ en el país durante los próximos años, por lo cual la mano de obra y otros costos locales seguirán aumentando también en U\$\$ . Se espera también en el mediano plazo que los costos de la energía también aumenten, como ya ha comenzado a suceder con la quita de subsidios a partir de principios del año 2012. Por otro lado, es de esperar que el costo del capital de las empresas suba dado a que la tasa de interés en todo el mundo está subiendo, aumentando el costo financiero de todas las inversiones de las empresas, como por ejemplo, las inversiones en inventario.
- La creciente competencia internacional representan una amenaza para la industria local: debido a gran capacidad ociosa en todo el mundo se incrementa el riesgo de ingreso de nuevos jugadores al mercado local dispuestos a vender barato, siendo esta una de las principales razones por las que el precio final en muchos casos no puede ser aumentado para aumentar la rentabilidad.
- La continua pérdida de competitividad de la industria argentina debido a un sostenido de costos locales en dólares.
- Las herramientas tradicionales de análisis y optimización de las operaciones son difíciles de aplicar a sistemas reales, además en general sus resultados no son precisos debido al grado de simplificación que es necesario para su aplicación
  - Las herramientas de simulación dejaron de ser costosas, su uso ahora es posible para la gestión cotidiana de los negocios

Los costos de operación en una planta en general están directamente relacionados con variables como la utilización de los equipos, el nivel de inventario, la velocidad de respuesta, el tiempo de ciclo, etc. En el Capítulo I será presentado el marco teórico que utilizaremos para el análisis de costos de

las operaciones, presentando las principales corrientes de pensamiento. En una planta industrial existen relaciones de compromiso entre todas estas variables por lo cual no pueden ser tratadas individualmente, y se debe buscar el mejor balance entre ellas a través de una adecuada estrategia de operación. Existen varias corrientes de pensamiento a la hora de diseñar la estrategia de operaciones para lograr este objetivo, en el Capítulo II se presentarán las principales corrientes, se justificará la adopción de la Teoría de las Restricciones como marco de la gestión de las operaciones, y se introducirá la simulación como herramienta para su análisis.

Las características de la industria, mercado y producto, descritas en el Capítulo IV, son los principales condicionantes de la operación de la empresa y el entendimiento de estos factores es fundamental para optimizar la operación. El detalle de las operaciones, instalaciones y recursos necesarios para producir son descritos y modelados en el Capítulo IV, el resultado de este capítulo incluye una herramienta de gestión de las operaciones construida a partir de una aplicación comercial de computadoras, y una descripción de la planta en términos de la performance esperada, para luego contrastarla con la performance real en el Capítulo V. De esa comparación surgen las posibles oportunidades de mejora y los puntos a trabajar para mejorar la performance actual, desarrollados en el Capítulo VI. Finalmente, en el Capítulo VII se analizan posibles proyectos de inversión para mejorar la rentabilidad en el mediano plazo de la planta y se establece el mix de producción óptimo para las condiciones actuales.

El procedimiento llevado a cabo para la planta bajo análisis, podría ser llevado a cabo en cualquier otro escenario o industria, y podría ser considerado un procedimiento elemental para la optimización de las operaciones de una planta industrial. El solo hecho de analizar y armar el modelo de simulación para contrastar con la realidad, da lugar al descubrimiento y comprensión de numerosos fenómenos ocultos que restringen la rentabilidad y que de otra manera pasarían desapercibidos. A lo largo de este trabajo se ha comprobado que la detección de las instalaciones, políticas o procesos que restringen la rentabilidad le da los lineamientos elementales a toda la estructura para actuar en consecuencia y obtener grandes beneficios.

## **CAPITULO I: MEDICION DE LA PERFORMANCE DE LAS OPERACIONES**

El éxito de una empresa depende de su habilidad de generar dinero de manera sustentable. Para ello es necesario que la empresa tenga los instrumentos adecuados que permitan medir la performance con respecto a su meta y tomar las decisiones adecuadas. Existen distintas medidas utilizadas para evaluar la performance de una planta, algunas de estas medidas están asociadas con márgenes y costos de fabricación, otras medidas pueden estar asociadas a la calidad de servicio y los niveles de inventarios (Bih-Ru Lea, Hokey Min, 2003). Tanto el nivel de inventario como la calidad de servicio son medidas de performance tienen la particularidad de que su impacto económico es difícil de medir, aunque indudablemente lo tienen. Una pobre calidad de servicio puede traer aparejados reclamos, que se traducen en pérdida de ventas futuras, y un alto nivel de inventarios trae aparejados muchos costos difíciles de estimar o asociar. Existen algunas consecuencias financieras fácilmente identificables asociadas tanto al nivel de inventarios como a la calidad de servicio, por ejemplo, una disminución o aumento de estos parámetros traería aparejada en el corto plazo un cambio en el capital de trabajo o en los costos respectivamente, no obstante las consecuencias a mediano y largo plazo son más difíciles de estimar.

El objetivo de este capítulo es describir los distintos enfoques que existen para evaluar la performance económica de una fábrica, y seleccionar el enfoque más adecuado para este trabajo.

### **1.1 Medidas de Performance**

#### **1.1.1 Medidas asociadas al Costo**

Estas medidas en general parten del costo de producción para luego obtener estimaciones de costos unitarios, márgenes de ganancia, eficiencia de producción, costos totales, etc. Históricamente el desvío del Costo Actual de producción frente al Costo Estándar, determinado por las cantidades y precios teóricos o presupuestados para fabricar los productos, ha sido la medida de performance por excelencia, de la cual se deriva la noción tradicional de

eficiencia de fabricación. Sin embargo, esta medida de performance tomada sin los recaudos necesarios puede llevar a una empresa a la dirección contraria a su objetivo. La determinación del costo de un producto ha sido materia de discusión y han surgido distintos enfoques dando lugar a diferentes sistemas de costeo a lo largo de la historia, con sus ventajas y desventajas, en respuesta a los cambios que se han ido dando en la industria. Existen enfoques distintos para la determinación de los costos, podemos hacer una primer clasificación según se traten de sistemas de costeo por absorción o sistemas de costeo directo (D. Dugdale, T.C. Jones, 2003). También se puede hacer una clasificación según se utilicen cantidades y precios reales o presupuestadas para la determinación de los costos de los productos (Dennis Caplan, 2010) dando lugar los sistemas de Costeo Actual, Normal o Estándar.

### **1.1.2 Costeo por absorción y costeo directo**

Según Spencer (1994) la teoría de costos, estudiada por la contabilidad, nace para facilitar a la dirección con información a partir de la cual tomar decisiones de negocios, además brinda herramientas para la aplicación de impuestos, y valuación objetiva de empresas para accionistas y acreedores. Por ello la migración de un sistema de costeo a otro ha sido y será siempre un trabajo difícil de llevar a cabo, dando lugar a que en una misma empresa convivan distintos sistemas de costeo para la toma de decisiones y para las presentaciones formales de la contabilidad, como ser declaraciones de balances y resultados. Para este trabajo, el interés radica únicamente en la determinación del sistema de costeo apropiado para la toma de decisiones. Las decisiones pueden ser tales como las cantidades a fabricar, el precio al que vender, el mix de producción, la cantidad de inventario a almacenar, etc.

Según Spencer (1994), las teorías de costos tienen sus fundamentos en la economía. Los costos tradicionalmente fueron mecanismos para la imputación de recursos escasos a través de un sistema de precios. En su origen, la teoría económica incluía únicamente 3 factores de la producción: tierra, trabajo y renta. El precio de cada factor era equivalente a su costo, y por lo tanto el precio de cualquier producto era equivalente a la suma de los precios de los

factores utilizados para su producción. Recién con el surgimiento de la microeconomía el concepto de precio se separa del concepto de costo, concluyendo que el precio es establecido por el mercado en un contexto competitivo, y los costos solamente intervienen en la ecuación de largo plazo de una empresa a través de la cual decide la conveniencia o no de fabricar y vender un producto, o de ingresar o salir de un mercado, de ahí la importancia de conocer el costo del producto a vender.

J. D. Edwards (1958) describe que previo a la era industrial, el costo total asociado a los emprendimientos era fácil de conocer en poco tiempo, y la determinación del éxito o fracaso de tal emprendimiento podía esperar a su conclusión. Luego, con la revolución industrial, la naturaleza de los negocios se vio afectada de tal forma que se necesitó un concepto totalmente distinto de resultado de un negocio. En primer lugar, porque los negocios post-revolución industrial tenían un carácter continuo, y el resultado final del negocio estaba lejos en el tiempo, de manera que las decisiones no podían esperar a la conclusión del negocio para evaluar el éxito o fracaso del mismo. De esta manera surge la necesidad de tener herramientas que permitan conocer momento a momento los progresos que han sido logrados, herramientas que fueron otorgadas por la contabilidad a través de los costos e ingresos durante determinados períodos de tiempo. Edwards establece que la intención de todo sistema de costeo es imputar costos incurridos con los efectos atribuibles a dichos costos, concepto conocido como Principio de Congruencia, y que existe una falencia debido a que se fuerza a la contabilidad a asociar todos los gastos con los ingresos del período, es decir, costos con productos vendidos en el período, no obstante a largo plazo resulta lógico pensar que el costo total que la empresa afrontó a lo largo de su vida es igual al costo total de los productos que vendió. Igualmente, reconoce Edwards, la finalidad original de los sistemas de costeo fue brindar una herramienta de control más que de toma de decisiones.

Se pueden identificar varios tipos distintos de costos en los que una empresa incurre para realizar la producción. En una fábrica los costos pueden ser variables, fijos o inclusive semifijos, según cómo sea su comportamiento con el volumen de producción. Los costos variables aumentan proporcionalmente con

el volumen, el costo variable unitario se mantiene constante en un determinado rango de volumen de producción. Los costos fijos se mantienen fijos en un rango determinado de volumen de producción, por lo que el costo fijo unitario decrece hiperbólicamente con el volumen producido.

Los costos también se pueden clasificar en directos o indirectos según estén asociados a un solo producto o abarquen a varios de ellos. Cuando una fábrica produce solamente un único producto, la determinación del costo de este producto resulta ser trivial, ya que todo costo incurrido está asociado a éste. Por el contrario, cuando una misma fábrica produce distintos productos comienzan a aparecer costos asociados a más de un producto y es necesario conocer cómo y en qué proporción cada producto es responsable del costo incurrido, o dicho de otra manera, qué porción de estos costos absorbe cada producto. La técnica de costeo por absorción, utilizada desde fines del siglo XIX, centró su atención en la atribución de todos los costos incurridos por la empresa a los productos o servicios que ésta vende. Los costos se agrupan, ya sean costos de producción, de administración, de ventas o distribución, y mediante alguna técnica se distribuyen a los productos. La teoría explicita únicamente que los costos deben ser distribuidos de una manera apropiada, no explicita cómo hacerlo (D. Dugdale, T.C. Jones, 2003). En la práctica, las variables utilizadas para distribuir los costos fueron tradicionalmente el volumen de producción de cada producto, o las horas hombre incurridas en su fabricación.

Durante la primera mitad del siglo XX el costeo por absorción fue ampliamente difundido y aceptado. Inicialmente, los costos preponderantes fueron aquellos asociados directamente al producto, básicamente la mano de obra directa, por lo cual las complicaciones para distribuir correctamente los costos indirectos de fabricación no producían mayores problemas. Con los avances tecnológicos, los costos directos han ido disminuyendo en relación a los costos indirectos, haciendo cada vez más importante que la absorción de costos sea hecha de manera correcta, ocupándose la contabilidad de analizar y dar soluciones a esta problemática, perfeccionando el costeo por absorción.

Existen registros de métodos alternativos al costeo por absorción desde antes de mitad del siglo XX (Harris, 1936). Aparentemente las empresas americanas, si bien utilizaban formalmente los sistemas de costeo por absorción, a la hora de hacer reportes de ganancias creaban un informe en el cual sustraían los costos directos de las ventas para mostrar el margen operativo (D. Dugdale, T.C. Jones, 2003). Así nació un nuevo enfoque llamado costeo directo, o marginal, en el cual se plantea que para la toma de decisiones los únicos costos a considerar son la materia prima y la mano de obra directa (J. D. Edwards, 1958). La diferencia es que bajo la mirada del costeo directo, los costos fijos no son cargados a los productos ni al inventario, mientras que en la mirada tradicional, los costos fijos del período se hubieran interpretado como costos necesarios para hacer la producción, y por ende, atribuibles a los productos e inventario fabricados. De esta manera el costo unitario, bajo la mirada del costeo directo, es prácticamente independiente de la cantidad producida, salvo cuando por ejemplo un gran volumen permite obtener menores costos de adquisición de los insumos. Diversas críticas surgen también para esta nueva mirada, ya que en el largo plazo, todos los costos son atribuibles a los productos.

Como consecuencia de las diferencias conceptuales entre ambos sistemas, la valuación de inventarios en uno y otro sistema de costeo dan resultados muy distintos, dando lugar a grandes alteraciones en el cuadro de resultados de una empresa. En un sistema de costeo por absorción todos los costos que se incurren en el período son atribuibles a los productos, aquellos productos fabricados pero no vendidos tienen acumulados costos que no aparecen en los resultados hasta el momento de su venta, difiriendo la asimilación de los costos fijos para el momento de la venta, lo cual puede mejorar el aspecto de los resultados de un período a costas de empobrecer resultados futuros, incentivando la acumulación innecesaria de inventarios. Por el contrario, en un sistema de costeo directo, los costos fijos totales se deducen en el período. Este fue el principal aporte del costeo directo, que generó una controversia hacia mediados del siglo XX que aún no ha sido resuelta, por lo que muchas empresas en la prácticas usan una combinación de ambas.



### 1.1.3 Costeo ABC

Spencer (1994) describe las falencias de los sistemas de costeo tradicionales, y atribuye gran parte de sus problemas a la utilización de costos promedios de los productos para la toma de decisiones, que nace con la imposición de alocar todo costo incurrido a algún producto fabricado. La utilización de costos imputados a productos para la toma de decisiones ha estado en discusión casi desde el mismo momento en que aparecieron los sistemas de costeo por absorción (L. Boyd, M. Gupta, 2004). Tradicionalmente, las variables utilizadas para la absorción de costos eran derivados del volumen de producción o del consumo de horas hombre para la producción, sin embargo estas variables no siempre conducían a absorciones correctas de los costos. En respuesta a esta problemática surgen los sistemas de costeo basados en actividad, o costeo ABC, que se caracteriza por imputar costos según el uso o consumo de actividades de cada producto, perfeccionando la absorción de los costos.

El costeo ABC reconoce que los costos indirectos son atribuibles a distintas actividades necesarias para la producción, y que los productos consumen recursos al utilizar dichas actividades. Los recursos no consumidos en el período por ningún producto, pero que igualmente confieren un costo, son clasificados como costo de capacidad ociosa en el estado de resultados. De esta manera el costeo ABC resuelve en gran parte los problemas de absorción de costos, asignándole a cada producto el costo real que fue necesario para su producción, pero no resuelve el problema de costos diferidos por acumulación de inventarios, por lo tanto el costeo ABC utilizado aisladamente tampoco es una medida adecuada, debiendo combinarlo con otras medidas de performance.

### 1.1.4 La contabilidad según la Teoría de las Restricciones

La Teoría de las Restricciones es una filosofía de management desarrollada por M. Goldratt, que nace cuestionando la utilidad de los sistemas de costeo y propone una visión diferente, basada en el flujo de dinero (C. J. Coate, 1999). En contraste con el costeo ABC y el costeo directo, la Teoría de las Restricciones se basa en la adopción de 3 nuevas medidas de performance:

- Flujo o throughput: la tasa a la que la empresa genera dinero mediante las ventas, igual al precio de venta menos el costo de la materia prima
- Inventario: todo el dinero que la empresa invierte para comprar los materiales que la empresa transformará y venderá
- Gastos Operativos: todo el dinero que la empresa necesita para transformar el inventario en flujo

Las siguientes relaciones se forman a partir de las variables definidas:

Beneficio Neto: Flujo – Gastos Operativos

ROI = Beneficio Neto/Inventario

Según la Teoría de las Restricciones, la mayoría de los costos de una empresa son fijos, y el único costo realmente variable, y asociado a un determinado producto, es la materia prima. Todos los otros costos, incluida la mano de obra, casi siempre son Gastos Operativos Generales. Según este enfoque, la mano de obra directa tampoco es en general un costo marginal, dado que el plantel de la fábrica en general difícilmente varíe en el corto plazo ante modificaciones en el volumen de producción. De esta manera, la Teoría de las Restricciones rechaza la imputación de costos a los productos, invalidando a su vez el concepto de costo de un producto. El inventario es valuado según el precio de la materia prima, sin imputar costos directos o indirectos, evitando que se difieran costos al acumular inventarios. Toda la mano de obra, directa o indirecta, es considerada como gasto operativo. La Teoría de las Restricciones se asemeja de alguna manera al enfoque que se planteaban los defensores del costeo directo, y aún va más allá, dado que la valuación del inventario es simplemente el valor de la materia prima utilizada sin incluir otros costos que tradicionalmente se consideraban directos.

La visión de flujo que aporta la Teoría de las Restricciones asegura que todas las medidas que mejoren los indicadores propuestos estén enfocadas en la meta principal de la empresa, que es ganar dinero hoy y en el futuro. En la mirada tradicional, la manera de mejorar la performance es aumentar la eficiencia mediante la reducción de costos o aumento del volumen, lo cual muchas veces conduce a una optimización local que no mejora la performance del conjunto. Desde el punto de vista de la Teoría de las Restricciones, una optimización local no necesariamente mejora la performance del conjunto,

solamente lo haría en el caso en que la mejora impacte sobre la restricción que limita el throughput (L. Boyd, M. Gupta, 2004).

La Teoría de las Restricciones plantea que la Contabilidad falla en la tarea de brindar información para la toma de decisiones, dado que la utilización de los costos de los productos para ello es inválida (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986). Para convertir la materia prima en producto final, la misma atraviesa varios procesos. Cada paso en el proceso ocurre en un centro de costos, en el cual se le agrega valor al producto. La teoría contable asume que el valor agregado a un producto es igual a la suma de los costos en los que se incurrió para su fabricación. Se comete un error cuando se asume que todos los costos de una empresa deben ser asociados a un producto. El costo asociado a un producto es igual a la suma de todos los costos en que se incurrió para su producción, que son atribuibles únicamente a ese producto, es decir, el costo marginal. En la contabilidad de costos, se hace un esfuerzo por imputar todos los costos de la empresa a algún producto, aún los gastos generales de la empresa son imputados de alguna manera a los distintos productos con alguna técnica de costeo. Para la toma de decisiones es importante tener la precaución de utilizar los costos verdaderamente incrementales o marginales y no utilizar los costos medios, cualquier costo fijo independiente del volumen es irrelevante para el análisis (Willem J Selen, 1987).

### **1.1.5 Comparación de la contabilidad propuesta por TOC y el modelo tradicional**

Existen diferencias entre la contabilidad propuesta por la Teoría de las Restricciones, llamada Contabilidad de Flujo (Throughput Accounting) y los sistemas tradicionales:

- **Valuación de Inventarios:** la diferencia más sustancial que tiene la Contabilidad de Flujo propuesta por la Teoría de las Restricciones frente a los sistemas de Costeo por Absorción, es la valuación del inventario. Según los sistemas de costeo por absorción, como ser el costeo ABC, el inventario es valuado como la suma del costo de la materia prima y todos los costos incurridos para su fabricación, estos costos son

estimados de manera precisa por el costeo ABC. El costeo basado en la Contabilidad de Flujo en cambio, valúa los inventarios por el costo de la materia prima únicamente. La diferencia entre estos dos tipos de valuación se manifiesta en los estados de resultado de la empresa. En una empresa que utiliza Costeo por Absorción, el Inventario es un activo cuyo valor expresado en moneda incluye aquellos costos incurridos para su fabricación, por lo cual estos costos no aparecen como un gasto incurrido en el período, mostrando resultados mejores a los realmente alcanzados, incentivando comportamientos oportunistas de la dirección.

- Origen de los costos: el costeo basado en la Contabilidad de Flujo no se preocupa por rastrear los orígenes de los costos incurridos en la producción, los sistemas de Costeo por Absorción modernos, como el ABC, se enfocan en conocer el verdadero origen de los costos, y cómo se asocian éstos a los diferentes productos.
- Plazo: los sistemas de costeo basados en la Contabilidad de Flujo consideran que el único costo variable es el de la materia prima, por ello puede decirse que tienen una visión de corto plazo. Dado que en el largo plazo todos los costos pueden considerarse variables, un sistema de costeo ABC permite obtener optimizaciones en el mediano y largo plazo.

Dado que ambos tipos de costeo tienen ventajas y desventajas, es usual su combinación para evaluar la performance de una empresa. A su vez, para la toma de decisiones, es conveniente optar por una métrica o la otra en función del horizonte de tiempo de la decisión.

## 1.2 Inventario y Calidad de Servicio

Tanto el inventario como la calidad de servicio son contempladas por la Teoría de las Restricciones como medidas de performance. El inventario, como ya se ha mencionado, es una de los tres indicadores de performance que utiliza la Teoría de las Restricciones. El nivel de servicio al cliente está directamente relacionado con otro parámetro propuesto por Goldratt y Cox (1986), el throughput, dado que conociendo con precisión el throughput pueden estimarse correctamente las fechas de entrega. A ambas medidas puede asignarse un

valor económico equivalente, aunque dichos valores no aparezcan en los informes contables de las empresas, mediante el Costo de Acarreo de Inventarios y el Costo de Incumplimiento de Pedidos, y numerosos esfuerzos han sido realizados por distintos autores en cuantificar estos costos. Ello se debe a que cuando los plazos de entrega requeridos por los clientes superan los tiempos de proceso, puede ser necesario mantener cierto nivel de inventarios para no incumplir pedidos, y en consecuencia el nivel adecuado de inventarios sería función de los costos de acarreo y los costos de incumplimiento de pedidos si tales costos pudieran conocerse realmente.

### **1.2.1 Costo de acarreo de inventarios**

Según varios autores, los inventarios son los activos principales de una empresa, representando entre el 20% y 40% del total de los activos (Carol A. Ptak, 1988). Otros autores han tratado a los inventarios de productos terminados como un pasivo, alegando que cuando una empresa mantiene inventarios que no se podrán vender a un precio mayor al costo de su producción la diferencia debería ser computada como una pérdida (Dr. Lloyd J. Taylor, 2004). Este último enfoque se basa en que al tomar al inventario como un activo, la contabilidad tradicional incentiva de alguna manera el crecimiento de los inventarios. Esta controversia ha sido tratada también por E. M. Goldratt y J. Cox (1986), quienes sostienen que el inventario debería ser tomado como un pasivo y no como un activo, y por ello debe ser minimizado. Según dichos autores, además la obsesión del management en la eficiencia local incentivaba a la acumulación de inventario por largos períodos. Según la Teoría de las Restricciones, el valor total del inventario es tomado como indicador de performance, si bien los costos asociados a los mismos no son utilizados como medida de performance prevalece la premisa de minimizar el inventario siempre que como consecuencia no se disminuya el throughput o suban los gastos.

El nivel de inventarios óptimo para una empresa depende de varios factores. En primer lugar el mercado y tipo de demanda pueden condicionar a una empresa a mantener cierto nivel de inventario para satisfacer pedidos spot, que de otra manera se perderían. De la misma manera, en otro contexto de

mercado, el no tener inventarios suficientes puede no significar la pérdida de una venta pero si una demora y un perjuicio para el cliente quien percibe una menor calidad de servicio, en situaciones donde el plazo requerido por el cliente es menor al tiempo de fabricación. Operativamente también pueden existir incentivos para mantener inventarios, en industrias donde la demanda no sea uniforme a lo largo del tiempo, o tenga un carácter estacional, puede ser deseable sobre-producir en períodos de baja demanda para poder abastecer al mercado en períodos de alta demanda, obteniendo además la ventaja de trabajar con una utilización alta y uniforme durante períodos de alta y baja demanda. Por último, la existencia de buffers o stocks de seguridad antes de los cuellos de botella permiten igualar el throughput del sistema a la demanda del mercado (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986) y mejorar la performance general de la planta a expensas de aumentar el nivel de inventario intermedio (WIP). Si los niveles de WIP no son controlados podrían crecer excesivamente, aún en puntos de la cadena productiva donde no se necesiten. Los insumos y materias primas también forman inventarios y ocasionalmente puede ser fundamental tenerlos. Muchas veces la necesidad de los proveedores de materia prima de fabricar en lotes económicos implica que existe una cantidad mínima de compra, creciendo el nivel de inventario medio según crece la cantidad mínima de compra.

Dado que existen incentivos para que una empresa mantenga cierto nivel de inventarios, es natural que una empresa invierta cierta cantidad de recursos en ello. La otra cara de los inventarios son los costos en los que se debe incurrir para tenerlos disponibles. Según Goldratt y Cox (1986), todos los costos en los que se incurre para acarrear inventarios forman parte de los Gastos de Operación de la empresa.

El costo de acarrear inventarios es variable en función del tipo de bien producido. Son costos reales y pueden representar un porcentaje elevado de los costos totales. Se han reportado valores de hasta 7,5 % de las ventas o el 25% al 55% del valor total de los inventarios (Carol A. Ptak, 1988). Sin embargo, el costo de mantener inventarios debe ser calculado para cada caso

de manera particular y la utilización de múltiplos o porcentajes promedio de la industria no necesariamente es correcta.

Una de las componentes principales del costo de mantener inventarios es el costo financiero en el que se incurre cuando se decide comprar o producir bienes hoy que serán vendidos en el futuro. Esta componente es fácilmente cuantificable, pudiéndose aproximar por el costo promedio ponderado del capital (WACC) de la empresa. La elección del WACC como costo financiero del inventario es válida debido a que los inventarios de una empresa representan una gran parte de sus inversión, y por ende, el riesgo de los mismos es una de las componentes principales del riesgo de la empresa (Stephen G. Timme, 2003).

Otras componentes del costo de los inventarios incluyen: costo de obsolescencia, impuestos, espacio, seguros, riesgo, personal, manipulación, almacenamiento, y equipamiento. Este grupo de costos ronda un promedio del 10 % por año del valor de los inventarios (Carol A. Ptak, 1988).

Dependiendo de la naturaleza del inventario, los costos asociados pueden ser distintos. Los cuidados que se deben tener para la materia prima no son los mismos que se deben tener para el producto intermedio o el producto terminado, lo cual repercute en el costo final. Por ejemplo, si para evitar la oxidación de un producto terminado es necesario mantenerlo en un ambiente con calefacción, se debe incurrir en una cierta cantidad de energía para mantener el stock, el consumo energético es función en parte de la cantidad de material a calefaccionar. Además, los cuidados que se deben tener con el producto terminado para mantener el embalaje en correctas condiciones también se puede traducir en un mayor costo. Por ejemplo, cada unidad de producto terminado puede necesitar ser colocado en una plataforma diseñada para que el producto no se dañe. Si además estas plataformas, deben ser reparadas luego de una determinada cantidad de maniobras el costo de reparación de las plataformas es un costo directamente asociado al nivel de inventarios.

### 1.2.2 Costo de incumplimiento de pedidos

Los costos de incumplir un pedido han sido estudiados para varios modelos de optimización de inventarios. Éstos toman en cuenta un costo o penalidad por el incumplimiento de los pedidos o por la no disponibilidad de mercadería en el momento en que el cliente la solicita. Este costo o penalidad en general se considera como proporcional al exceso de demanda sobre la oferta para simplificar su tratamiento analítico. Sin embargo este modelo no tiene en cuenta la pérdida de fidelidad del cliente, que podría ser modelado mediante una baja de demanda futura o mediante el valor presente del flujo neto de fondos que se deja de percibir en caso que el cliente cambie de proveedor (Schwartz, 1966).

Por empezar en función del tipo de mercado, ya sea monopolio, oligopolio o competencia perfecta podríamos fácilmente establecer una primera diferenciación del costo que se produce por no poder cumplir con un pedido. Aún en un contexto monopólico, donde es esperable que la venta no se pierda sino que se demore dado que el cliente no tiene opción a elegir, igualmente la empresa tiene que afrontar el costo financiero de atrasar el margen por la venta tardía. En un contexto de competencia perfecta, la venta directamente se pierde y el cliente acude directamente a otro proveedor, con lo cual el costo asociado a no cumplir un pedido se puede aproximar con el margen neto que se deja de percibir, sin embargo se han realizado trabajos donde se ha demostrado que la situación es mejor reflejada con una baja en la demanda futura más que con un costo asociado a una pérdida de oportunidad de venta (Schwartz, 1970). En un contexto de oligopolio tenemos un punto intermedio entre ambos extremos, y es allí donde se sitúan la mayoría de las empresas, en este caso la demora de un pedido puede tener el doble efecto de hacer perder ventas futuras y además retrasar el margen percibido, ocasionando una baja de la demanda y a su vez un costo financiero que se debe afrontar. La baja en la demanda puede ser estimada a partir de datos históricos de ventas, retardos en los pedidos, o conocimiento del personal del departamento comercial.



### 1.3 Puntos destacados

- Se presentaron los sistemas de costeo ABC, Directo y Costeo Basado en la Contabilidad de Flujo, concluyendo que
  - El costeo basado en la Contabilidad de Flujo elimina el problema de costos diferidos ante la acumulación de inventarios.
  - El costeo ABC es apropiado para realizar análisis con horizontes de tiempo lejanos, mientras que el costeo basado en la Contabilidad de Flujo es apto para decisiones de corto plazo.
- Se presentaron los lineamientos para calcular los costos asociados al inventario y al incumplimiento de pedidos. En el caso de que sea necesario mantener inventarios para atender a la demanda, puede buscarse un balance entre estos costos para llegar a una solución económicamente óptima.
- Se presentaron las medidas de performance que utiliza la Teoría de las Restricciones: Throughput, Gastos e Inventarios. Optimizando dichas medidas de performance se optimizaría económicamente la operación de la planta.

## CAPITULO II: LA TEORIA DE LAS RESTRICCIONES Y LA ESTRATEGIA DE OPERACION DE UNA PLANTA

El objetivo de este capítulo es introducir la Teoría de Restricciones y su aplicación como estrategia de operaciones, enumerar sus ventajas y desventajas frente a otras estrategias de operaciones según la literatura difundida.

### 2.1 La Teoría de las Restricciones

En el libro La Meta (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986) se describe en forma de novela la Teoría de las Restricciones y su aplicación como estrategia de operación de una planta manufacturera. Según los autores, la meta de la empresa es ganar dinero hoy y en el futuro. Cualquier acción que no tenga como resultado un acercamiento a la meta debería no ser llevada a cabo. Desde el punto de vista de un gerente de producción, como el protagonista de la novela, la manera de acercarse a la meta es, en orden de importancia, mediante alguna de las siguientes acciones:

- Aumentar el throughput
- Disminuir el inventario
- Disminuir los gastos operativos

Estas tres variables, deben además ser consideradas como las principales medidas de performance de la planta, de las cuales se derivan los siguientes indicadores:

- Beneficio Neto:  $\text{Throughput} - \text{Gastos Operativos}$
- $\text{ROI} = \text{Beneficio Neto} / \text{Inventario}$

Según E. M. Goldratt y J. Cox, los pasos a seguir para llegar a la meta son:

1. Identificar la(s) restricción(es) del sistema
2. Decidir como explotar la(s) limitación(es) del sistema
3. Subordinar todos los procesos a la restricción del sistema
4. Elevar la(s) restricción(es) del sistema

5. Verificar si como resultado de este procedimiento la restricción ha sido superada, si es así volver al punto 1, pero no permitir que la inercia provoque la limitación del sistema

Las restricciones pueden venir de algún proceso de fabricación, como también pueden venir del mercado mismo por una imposibilidad de aumentar las ventas. Dado que la definición de throughput es en términos de ingreso, la naturaleza de la restricción puede estar en cualquier eslabón de la cadena de valor, y puede ser de distinta naturaleza. Además, una vez removida una restricción se debería buscar la nueva restricción del sistema y subordinar el funcionamiento del sistema a la nueva restricción.

Algunos de las conclusiones importantes para la Teoría de Operaciones que se desprenden de la obra de E. M. Goldratt y J. Cox, y serán utilizadas en el presente trabajo, son:

- En sucesos dependientes afectados por fluctuaciones estadísticas las desviaciones negativas se transmiten mientras que las fluctuaciones positivas solo lo hacen ocasionalmente (La Meta, capítulo 13)
- Cuando en una línea de producción se equilibran las capacidades, es decir cuando la capacidad de todos los procesos es igual, se descontrola el flujo de producción y se hace difícil de predecir (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986, capítulo 14)
- La utilización de un proceso que no es cuello de botella queda determinado por la capacidad del cuello de botella (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986, capítulo 18).
- Una hora perdida en un cuello de botella es una hora perdida para toda la planta. Por el contrario, una hora ahorrada en un no cuello de botella, es un espejismo (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986, capítulo 18).
- El inventario dentro de la planta, o WIP, debe ser el mínimo necesario para proteger al flujo (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986, capítulo 36)

- El óptimo del sistema en general no está dado por la suma de óptimos locales (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986, capítulo 36).
- La operación de los procesos no cuello de botella está subordinada al cuello de botella, por lo que en caso de cambiar la naturaleza del cuello de botella se debe cambiar la manera de operar los no cuello de botella (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986, capítulo 36).

## 2.2 Estrategias de Operaciones

Durante las últimas décadas han surgido principalmente 4 variantes de estrategias de operación de plantas industriales (L. Boyd, M. Gupta, 2004):

- ROP (Re-order Point)
- MRP (Material Requirements Planning)
- JIT (Just in Time)
- DBR (Drum, Buffer, Rope), estrategia propuesta por la Teoría de las Restricciones.

L. Boyd, y M. Gupta (2004) realizan una comparación entre estos cuatro sistemas de producción, las siguientes conclusiones pueden ser extraídas de su trabajo:

- El ROP y el MRP tienen varias características en común. Por empezar ambos están basados en encontrar tamaños de lote económicamente óptimos (EOQ). En general, según L. Boyd y M. Gupta, se puede establecer que las estrategias ROP están destinadas a productos o materiales con demandas independientes, mientras que el MRP está destinado a materiales con demanda relacionada. Ambos sistemas intentan minimizar los costos relacionados a los tiempos muertos y de acarreo de inventario, persiguiendo una máxima utilización de los equipos utilizados.
- Por el contrario las metodologías JIT y DBR se basan en intentar igualar el flujo de producción con la demanda, la diferencia entre ambos métodos es que el DBR reconoce que el flujo está limitado por la restricción del sistema, y todo el sistema y la programación de

la producción debería subordinarse a la restricción. De esta manera, los materiales son lanzados a la fábrica solamente a medida que la restricción puede aprovecharlos.

- ROP asume capacidad infinita, al igual que el MRP. Se debe aclarar que luego del MRP surge el MRP a lazo cerrado (Closed Loop MRP) donde se contempla la capacidad disponible y la utilización de los recursos, y posteriormente surge el MRPII (Material Requirement Planning) como una evolución del MRP que incorpora más funcionalidades. La metodología JIT reconoce las limitaciones en capacidad y planifica por debajo de la misma para permitir mantenimiento preventivo y absorber las fluctuaciones estadísticas. El DBR se basa en maximizar la utilización del cuello de botella, y reconoce que existen otros procesos que tienen capacidad sobrante y no deberían ser totalmente utilizados.
- El ROP y MRP tienen un enfoque hacia la reducción de costos de capacidad ociosa, mientras que el JIT y el DBR se enfocan en el throughput.
- El ROP y MRP resultan en general en inventarios más altos que el JIT y DBR. El JIT intenta eliminar todo inventario, mientras que el DBR reconoce la necesidad de utilizar buffers en puntos estratégicos.
- En las metodologías de ROP y MRP no se incluye el concepto de mejora continua, mientras que en JIT mediante TQM, y en DBR mediante los 5 pasos descritos en el apartado anterior, se entra en un ciclo de mejora continua.
- Una práctica común que tiene buenos resultados es utilizar una combinación de DBR, JIT y MRP.

## 2.3 DBR

### 2.3.1 Introducción

La justificación de la selección de la metodología DBR para el presente trabajo se basa en el trabajo de K. J. Watson y A. Patti (2008) donde se muestran

evidencias que indican que la estrategia DBR supera al JIT en plantas donde se cuenta con paradas no planificadas de máquinas, siendo la primera más tolerante a la variabilidad del sistema.

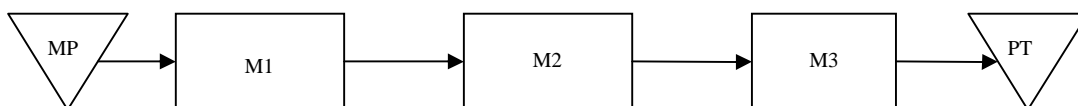
El sistema DBR también ha sido descrito por E. M. Goldratt y J. Cox (1986). En su obra, los autores comparan el funcionamiento de una línea de producción con el andar de una fila de niños que deben llegar a cierto destino en un tiempo dado, utilizando las siguientes analogías:

- Throughput se compara con cada metro avanzado por el último integrante de la fila
- El inventario es el largo total de la fila
- El costo de operación es la energía gastada por el total de los integrantes de la fila

E. M. Goldratt y J. Cox (1986) describen como la mejor estrategia de operación para que la fila de niños avance lo más posible, el ubicar al niño más lento al frente de la fila, y que todos se tomen de las manos para avanzar. En los apartados que siguen se estudiará como se aplica la misma estrategia a un sistema de producción.

### 2.3.2 Dependencia de sucesos, fluctuaciones estadísticas y su incidencia en la performance de una planta balanceada

Se comenzará analizando un sistema ficticio como el descrito en la Figura 1, a manera de ejemplo



**Figura 1 Modelo ficticio de línea de producción a ser utilizado como ejemplo**

Se adoptará la siguiente nomenclatura:

MP: stock de materia prima

M1: máquina o proceso 1

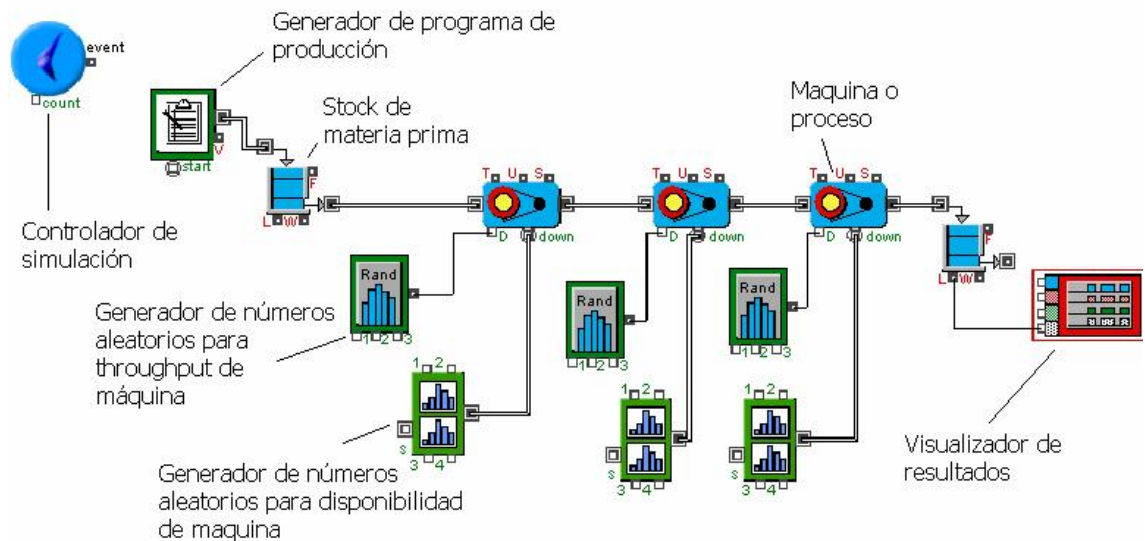
M2: máquina o proceso 2

M3: máquina o proceso 3

PT: stock de producto terminado

En este modelo, la dependencia de sucesos se da debido a que para que un producto sea procesado por la máquina M3, antes debe haber sido procesado por M2 y M1. Suponiendo que todas las máquinas tengan idéntica capacidad, pero que la disponibilidad de las mismas está sometida a fluctuaciones estadísticas, es de esperar que al throughput del sistema también tenga fluctuaciones. Por ejemplo, se establecerá una capacidad para cada máquina de media 1 unidad / hora, pero con una distribución de probabilidades asociada a cada máquina, de manera de que la duración del ciclo para procesar una unidad sea del tipo uniforme [0,5 hs – 1,5 hs]. Para analizar el sistema se utilizará el método de Montecarlo. Este método permite resolver problemas complejos, que difícilmente podrían ser resueltos analíticamente. Es un método probabilístico que utiliza números aleatorios para caracterizar un proceso estocástico. Mediante sucesivas realizaciones del proceso estocástico se obtienen muestras que luego son utilizadas para aproximar a la solución del problema. Típicamente la solución que arroja una simulación de Montecarlo, es un histograma que representa una distribución de probabilidad. En el presente caso, para estudiar la capacidad de un sistema sujeto a fluctuaciones aleatorias, se pueden realizar simulaciones del proceso generando las fluctuaciones a partir de generadores de números aleatorios, y vinculándolas matemáticamente, lo cual podría ser realizado por ejemplo en una planilla de Excel®. Cada corrida de la simulación dará una muestra de la capacidad del sistema, con un número grande de corridas se puede obtener una aproximación bastante exacta de la distribución de probabilidades de la capacidad real del sistema. Existen diversos programas de computadora que permiten realizar este método. En este trabajo se utilizará la aplicación EXTEND®, que fue concebida especialmente para el análisis de procesos productivos sujetos a fluctuaciones aleatorias.

Para realizar la simulación mediante la aplicación EXTEND®, se contruirá un diagrama de la planta utilizando bloques de las librerías ya incluidas en el programa.



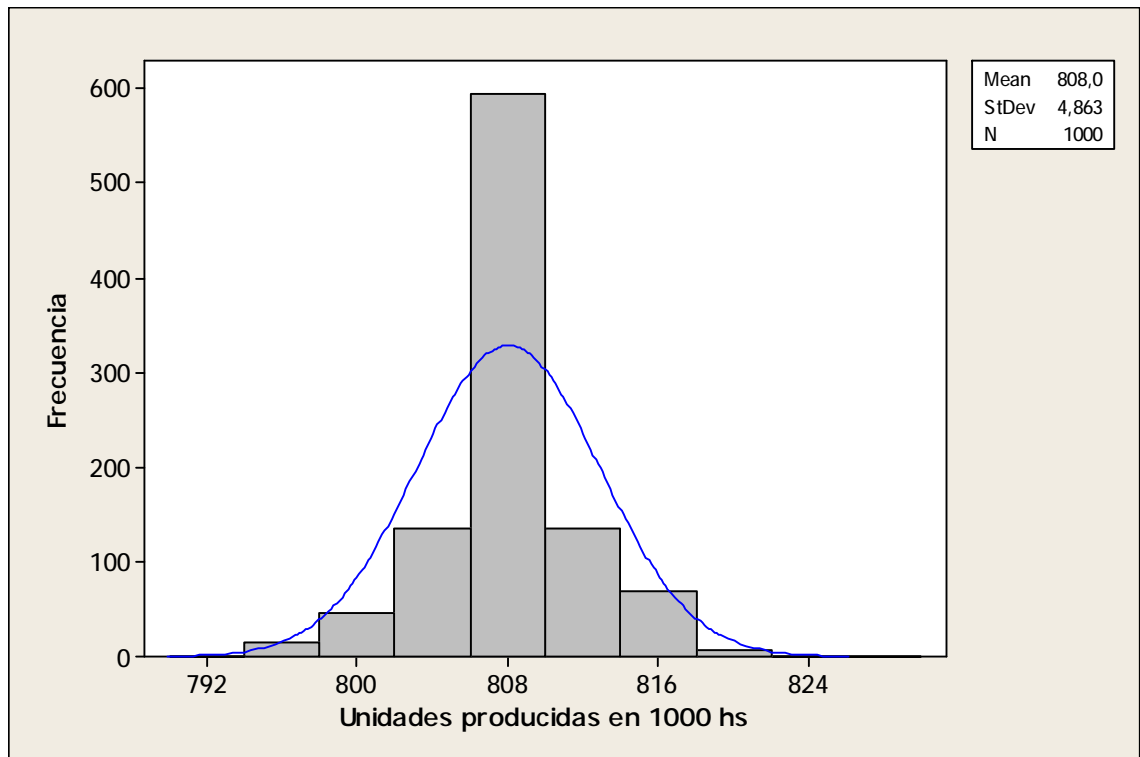
**Figura 2 Modelo en EXTEND®**

El programa EXTEND® trae integrados varios bloques básicos a partir de los cuales se pueden construir modelos más complejos. En la Figura 2 se observa el modelo correspondiente al diagrama en bloques de la Figura 1. Los bloques de proceso o máquina permiten establecer las capacidades a partir de generadores de números aleatorios. La disponibilidad de los equipos también puede asociarse a un generador de tiempos de indisponibilidad. En estos generadores se pueden seleccionar distintas distribuciones de probabilidad según la necesidad.

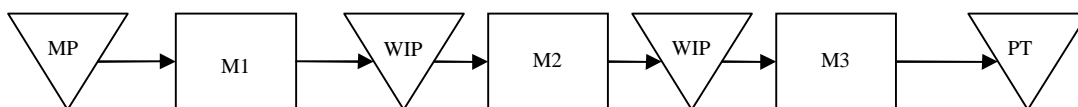
Si las fluctuaciones positivas se promediaran con las negativas, sería de esperar que la capacidad total del sistema de la Figura 1 sea cercana a 1 unidad / hora, sin embargo los resultados que se muestran en la Figura 3 indican lo contrario. En ella se muestra la producción lograda en 1000 hs de trabajo, se observa que la capacidad de la planta tiene una media de 0,8 unidades / hora, bastante menor que la capacidad de cada máquina de 1 unidad / hora. Los resultados se explican fácilmente, dado que en el esquema de la Figura 1 no existe la posibilidad de que entre procesos se almacene material, cualquier caída de producción por parte de una máquina se transmite al resto. Por el contrario, un adelanto de producción de una máquina en



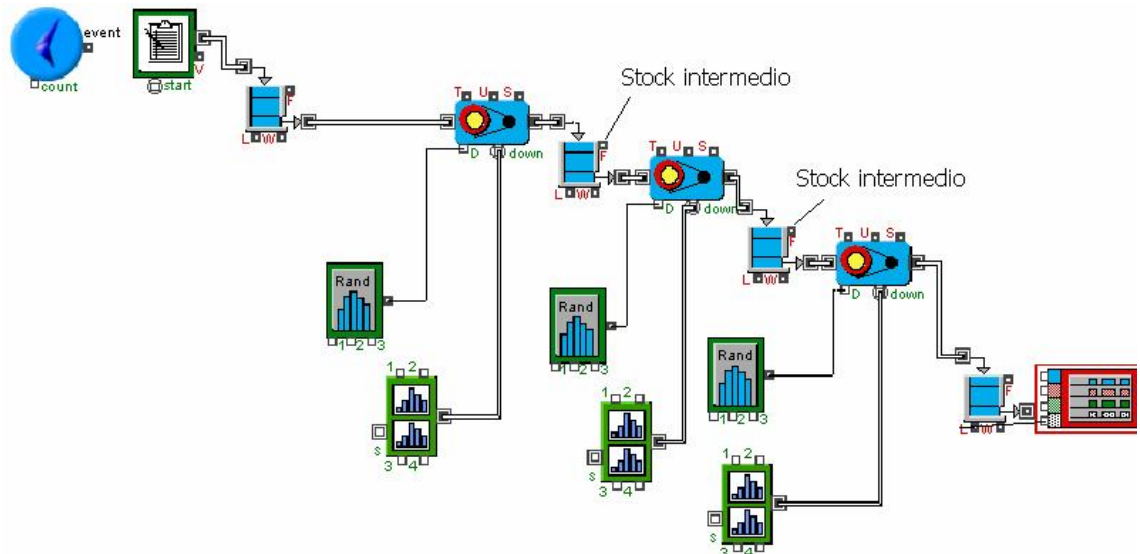
particular solamente se traslada al sistema completo si y solamente si las otras máquinas se encuentran disponibles.



**Figura 3 Resultados de la simulación de Montecarlo para sucesos dependientes con fluctuaciones estadísticas (elaboración propia)**

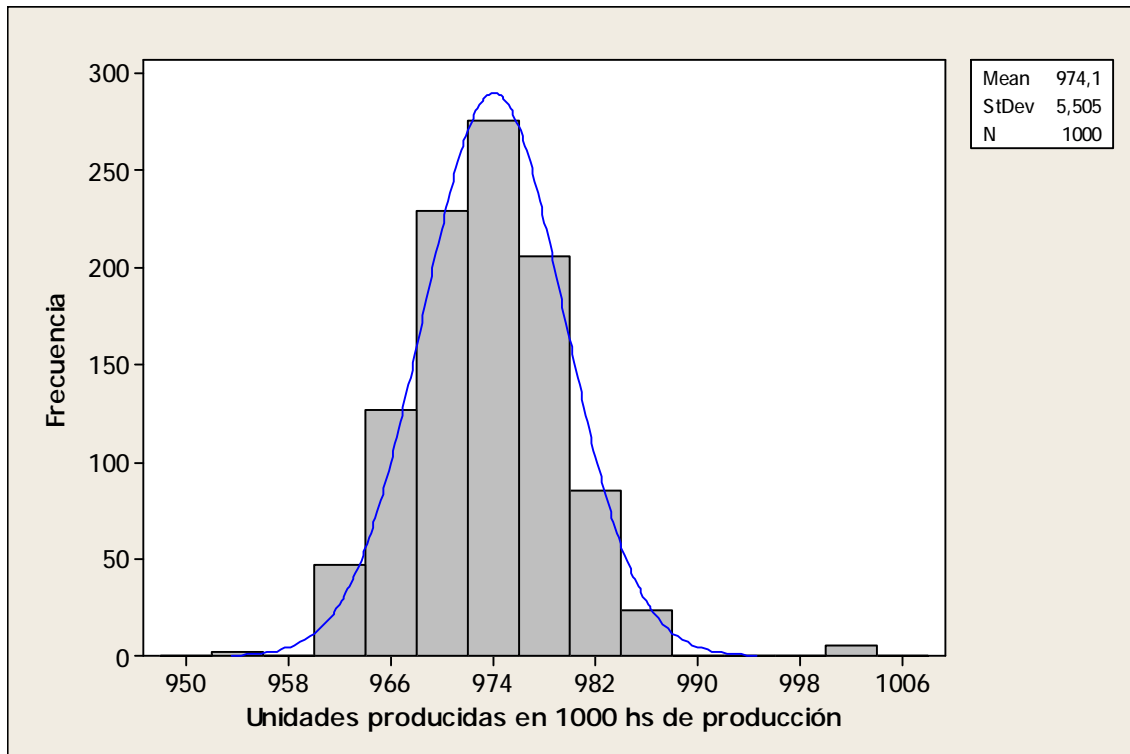


**Figura 4 Modificación al sistema de ejemplo mediante acumulación de inventario entre procesos**



**Figura 5 Modificación del modelo en EXTEND® para permitir acumular stock entre procesos**

En la Figura 4 se muestra un esquema modificado, donde se ha permitido la acumulación de material entre procesos, y en la Figura 5 se observa el modelo de computadora en EXTEND®. Es de esperar, por el efecto de los buffer de producto intermedio, los adelantos de producción puedan ser promediados con los atrasos, de manera de que la media total del sistema sea cercana a 1 unidad / hora. Los resultados de la simulación para el esquema de la Figura 4 se muestran en la Figura 6, vemos que la producción es ahora de 0,975 unidades/hora, el efecto de almacenar productos entre procesos tuvo la función de desacoplar los procesos, permitiendo que fluctuaciones positivas y negativas se cancelen en gran medida. Para ello fue necesario permitir que ante fluctuaciones positivas, los adelantos de producción sean acumulados en stocks intermedios. El nivel medio del stock intermedio fue de 12 unidades entre la máquina 1 y la 2, y de 4 unidades entre las máquinas 2 y 3. El tiempo promedio de espera del material en cada stock fue de 12 y 4 hs respectivamente.



**Figura 6 Resultados de la simulación de Montecarlo para sucesos independientes con fluctuaciones estadísticas (elaboración propia)**

De estas dos simulaciones se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El throughput del sistema es menor a la capacidad del cuello de botella en una línea de producción donde se presentan fluctuaciones aleatorias y los procesos no están desacoplados.
- La conformación de stocks de productos intermedios tuvo efectos benéficos en el throughput, pero requiere aumento del nivel de WIP y del tiempo de espera del producto dentro del sistema. Dado que el WIP, como todo inventario, trae a su vez gastos asociados, el nivel de Gastos de Operación necesariamente tuvo que haber crecido.
- En una planta balanceada, donde los procesos o recursos tienen igual capacidad, necesariamente se deben incluir stocks intermedios si se quiere maximizar el throughput.

### 2.3.3 Dependencia de sucesos, fluctuaciones estadísticas y su incidencia en la performance de una planta no balanceada

Se supondrá una planta no balanceada donde las capacidades de cada máquina sean las siguientes:

- M1 y M2: capacidad promedio de 1,6 piezas por hora. Tiempos de ciclo distribuidos uniformemente entre 30 y 45 minutos
- M3: capacidad promedio de 1 pieza por hora. Tiempos de ciclo distribuidos uniformemente entre 30 y 90 minutos.

Además, se incluirá en el modelo la posibilidad de que las máquinas no estén disponibles por roturas, a partir de las siguientes distribuciones:

- Tiempo entre roturas: variable aleatoria exponencial de media 10 hs
- Tiempo para reparar: variable normal con media 1 h y desvío 1 h, pero acotada a valores positivos.

Se analizarán 2 escenarios distintos:

- Escenario 1: sistema sin capacidad de almacenar stock intermedio entre procesos (Figura 7)
- Escenario 2: sistema con buffers para acumular stock intermedio entre procesos (Figura 8)

Un primer análisis del sistema indica que la capacidad teórica del mismo es de 1 u / h, dado que es la capacidad del cuello de botella M3. Por otro lado, dado que se han incluido tiempos de indisponibilidad de máquina, es de esperar que el throughput sea menor. Analizando las distribuciones de probabilidad, se observa que en promedio, la indisponibilidad de cada máquina es de un 10 %, por lo cual el máximo throughput obtenible en este sistema sería en promedio 0,9 u / h.

Los escenarios serán comparados a partir de las siguientes variables: throughput (Thr), WIP, y tiempo de tránsito (T). El mejor escenario será aquel que maximice el throughput con el menor WIP, siendo el tiempo de tránsito una variable dependiente de las otras según la Ley de Little,

$$T = WIP / Thr$$

La simulación será efectuada nuevamente con el método de Montecarlo. Se realizarán 100 simulaciones de 1000 hs de producción cada una.

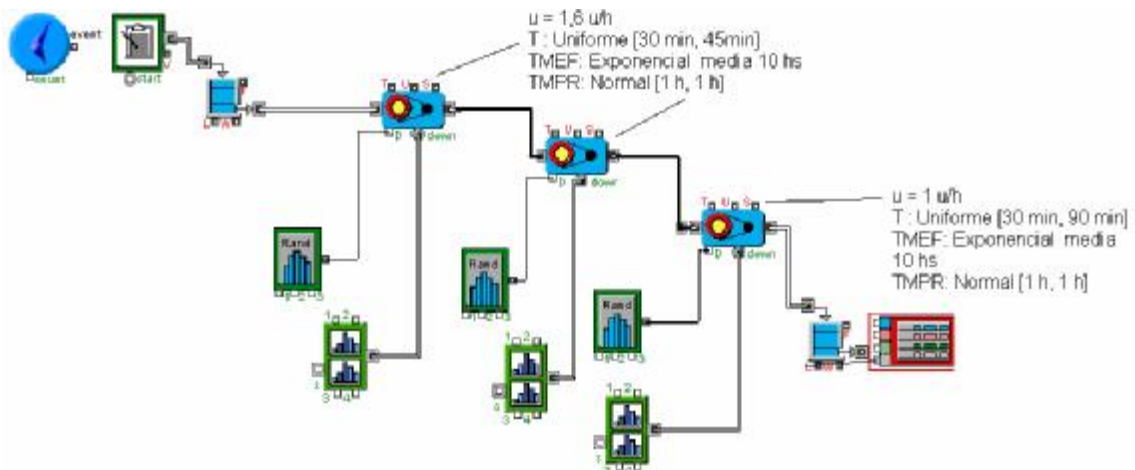


Figura 7 Escenario 1

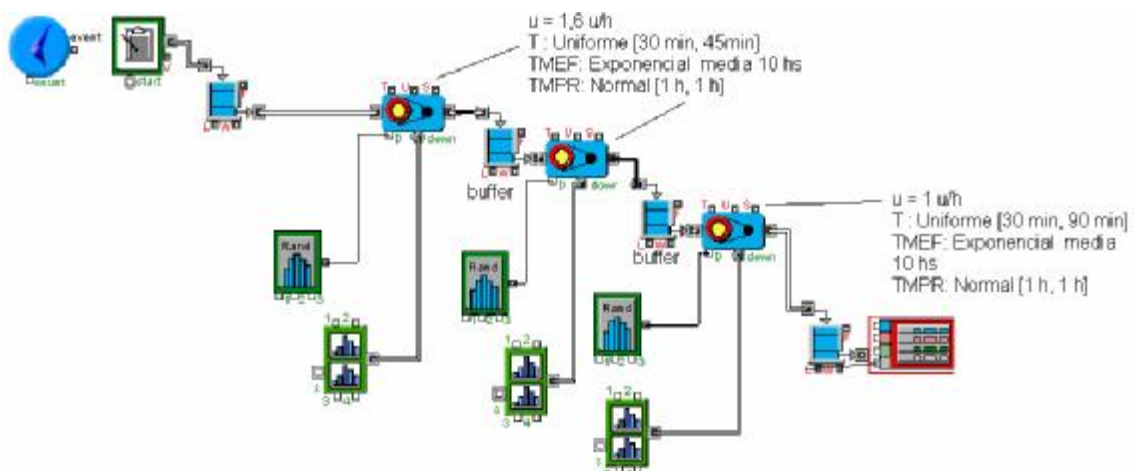


Figura 8 Escenario 2

<b>Sin Buffer intermedio</b>	<b>Thr [unidades/hs]</b>	<b>WIP [unidades]</b>	<b>T [hs]</b>	<b>Utilización M1</b>	<b>Utilización M2</b>	<b>Utilización M3</b>
<b>Valor medio</b>	0,8	2,42	3,4	62%	67%	89%
<b>Desvío</b>	0,014	0,56	1			
<b>Con Buffer intermedio</b>	<b>Thr [unidades/hs]</b>	<b>WIP [unidades]</b>	<b>T [hs]</b>	<b>Utilización M1</b>	<b>Utilización M2</b>	<b>Utilización M3</b>
<b>Valor medio</b>	0,9	260	180	100%	100%	100%
<b>Desvío</b>	0,013	160	100	-	-	-

**Tabla 1 Resumen de resultados de la simulación de una línea no balanceada**

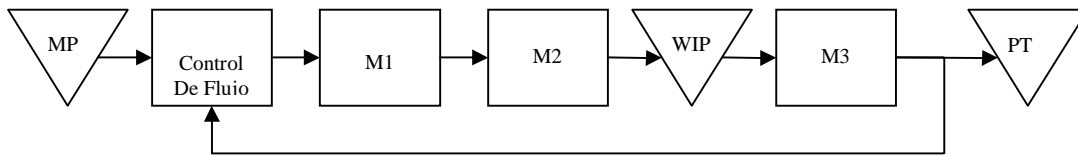
Los resultados de la Tabla 1 muestran que intercalando buffers intermedios se puede lograr un incremento del 12,5 % en el throughput de la línea simulada. Además, el throughput alcanzado en el escenario 2 es igual al máximo throughput estimado teóricamente. Debido a que ningún tipo de control de flujo de la producción fue implementado, el WIP y el Tiempo de tránsito crecieron enormemente. Es difícil imaginar que una situación así pueda darse en una línea de producción, pero si M1, M2 y M3 en lugar de máquinas representaran sectores o plantas distintas, físicamente separadas, con distintos gerentes de producción, podría darse que los gerentes de M1 y M2 produjeran de más para ganar eficiencia y mejorar sus balances. Sin embargo, la eficiencia local ganada no se traslada al sistema total, y en definitiva, el conjunto pierde dinero.

### 2.3.4 Implementación de DBR en el modelo de ejemplo

Para evitar las consecuencias negativas expuestas anteriormente, se debe establecer un sistema de control de flujo de productos. Los siguientes puntos deben ser implementados:

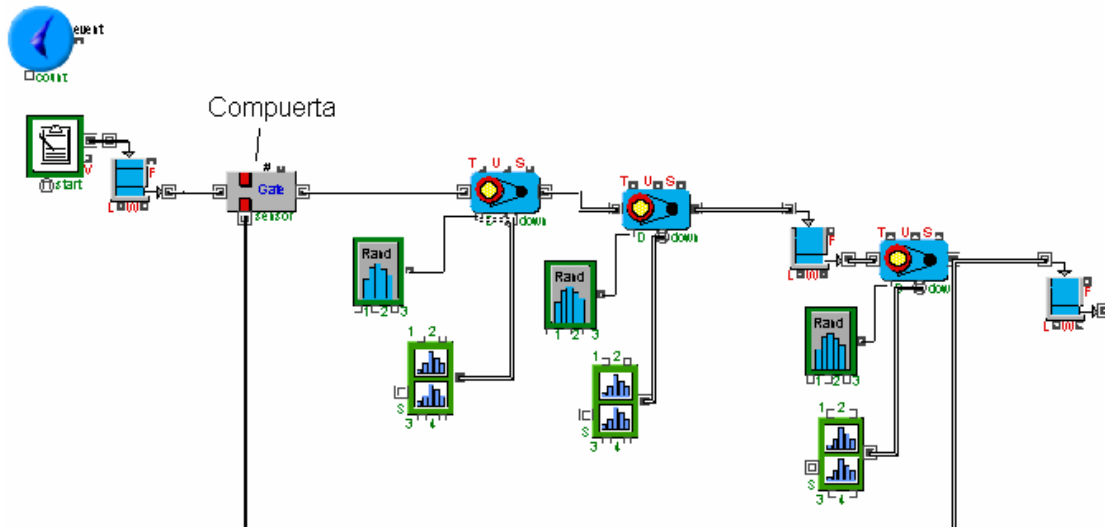
- Establecer un buffer inmediatamente antes del cuello de botella
- Mantener el flujo de ingreso de material igual al flujo de salida del sistema

Para ello se debe modificar el sistema de producción agregando una compuerta cuya función es permitir el ingreso de un flujo de materia prima igual al throughput del cuello de botella manteniendo del WIP constante en la línea de producción (Figura 9).

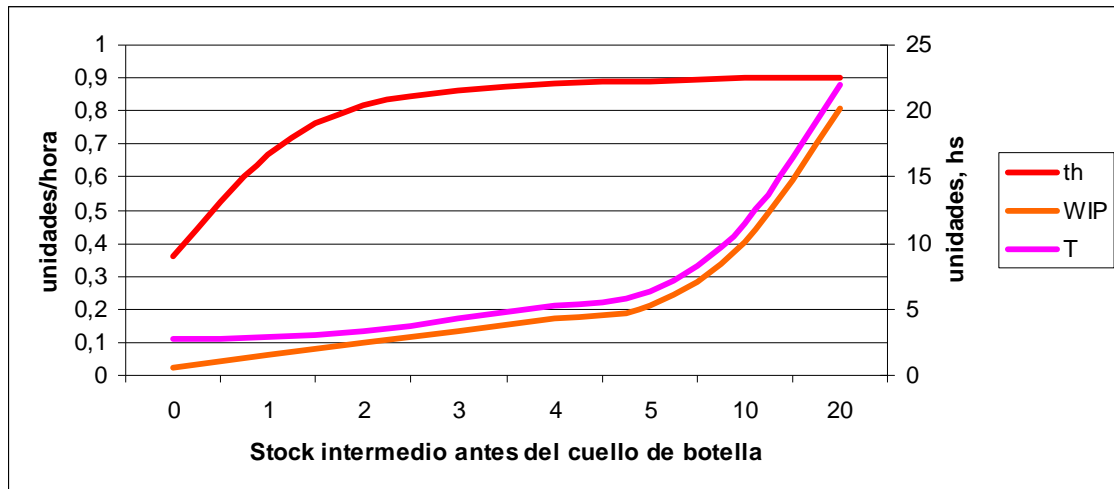


**Figura 9 Implementación de DBR**

El programa EXTEND® tiene incorporado un bloque apropiado para efectuar esta función. En la Figura 10 se observa la modificación del modelo de simulación para implementar el DBR. Se mantienen los parámetros de proceso del punto anterior para poder hacer una comparación.



**Figura 10 Implementación del DBR en EXTEND®**



**Figura 11** Performance de la línea bajo la estrategia DBR con distintos valores de stock antes del cuello de botella

En la Figura 11 se muestran los resultados de varias simulaciones con distinto volumen de WIP en la línea de producción. Se observa que con tan solo un buffer de 5 unidades antes del cuello de botella logramos establecer el máximo throughput de la línea, igual al máximo throughput teórico estimado en el punto anterior.

El WIP en este modelo tiene 2 componentes:

- Material en procesamiento en cada una de las máquinas
- Material almacenado antes del cuello de botella

La segunda componente es la que se gobierna para establecer el control de flujo. Permitiendo almacenar volúmenes mayores inmediatamente antes del cuello de botella, se protege en mayor medida el flujo del sistema. El volumen óptimo de stock intermedio antes del cuello de botella es función de las características aleatorias del sistema. En general sistemas con mayores fluctuaciones requerirán mayores volúmenes de inventario previos al cuello de botella para proteger el flujo. Por otro lado, las fluctuaciones propias del cuello de botella no pueden ser compensadas aumentando el stock previo al mismo, y se trasladan inevitablemente al throughput del sistema.



## 2.4 La Naturaleza de la Restricción

A lo largo del capítulo se ha supuesto que el cuello de botella, es decir la restricción del sistema, se trataba de una restricción física. A lo largo de su obra, E. M. Goldratt y J. Cox (1986), describen cómo la restricción puede tener distintas naturalezas:

- Físicas: cuando se trata de limitaciones en capacidades de máquina, insumos, mano de obra, etc.
- Políticas: cuando como consecuencia de una política se restringe el sistema, por ejemplo, la utilización de lotes de producción económicamente óptimos en procesos que no son cuello de botella, la optimización de la eficiencia local en cada sub sistema, etc.
- De mercado: cuando la capacidad del sistema es mayor a la demanda del mercado.

A partir de la optimización de las operaciones se busca superar todas las restricciones físicas y políticas de nuestro sistema, hasta que logremos que la restricción del sistema se encuentre en el mercado. Llegado a este punto se puede proteger el flujo, dado por la demanda, mediante inventarios de producto terminado de seguridad para explotar la restricción de mercado al máximo posible. En definitiva, siempre existe una restricción y siempre es posible aplicar la política DBR.

## 2.5 Puntos desatacados

- Se presentó la Teoría de las Restricciones como estrategia de operación
- Se compararon distintos sistemas de producción, y mediante la presentación de distinta bibliografía se concluyó que el DBR resulta ser el sistema que más ventajas presenta para una línea con fluctuaciones estadísticas importantes.
- Se comprobó mediante simulaciones que en una línea de producción las fluctuaciones positivas y negativas no se promedian, sino que en general las negativas afectan a todo el sistema mientras que las positivas rara vez lo hacen.

- Se comprobó mediante simulaciones que el DBR permite maximizar el throughput de una línea con bajos niveles de WIP y Tiempo de ciclo, protegiendo el flujo acumulando inventario inmediatamente antes del cuello de botella.

## CAPITULO III: DESCRIPCION DEL PRODUCTO Y EL MERCADO

El objetivo de este capítulo es describir las características del producto, el mercado, y sus implicancias para la operación de la planta.

### 3.1 Descripción del producto

El Cordón Pretensado consiste en un conjunto de alambres de acero acordonados para producir un cordón de acero flexible de alta resistencia. El Cordón Pretensado es fabricado en distintos grados de resistencia, distintos diámetros y con la posibilidad de venir recubierto o no de una capa de epoxy o plástico. La configuración más común del cordón es de 6 alambres torzales acordonados alrededor de un séptimo alambre que hace de alma del cordón, como se muestra en la Figura 12. Los calibres varían dependiendo del mercado, y van en general de un rango de 1/4 " a 0,7". El producto es un estándar que responde a especificaciones y parámetros de calidad determinados por normas internacionales, ingresando en la categoría de commodity.



**Figura 12 Cordón Pretensado compuesto por 6 alambres torzales y un alma**

El cordón pretensado se utiliza en la construcción de estructuras de hormigón para introducir fuerzas de compresión en las mismas, aplicando un "offset" que luego permite al hormigón soportar los esfuerzos de tracción, dado que por su propia naturaleza el hormigón no puede soportar este tipo de esfuerzos. El esfuerzo de pretensado mantiene comprimida a la estructura, de manera que al someterse a un esfuerzo de tracción el hormigón realmente se descomprime.

Algunas aplicaciones de las estructuras de hormigón pretensado incluyen puentes, vigas, losas, pisos de garajes, fundaciones, etc.

En el hormigón pretensado, el acero puede ser pretesado o postesado. En el primer caso, se trata de estructuras de hormigón pretensado fabricadas previamente y luego montadas en la obra, como se observa en la Figura 13. En el segundo caso, el tensado del acero se hace in-situ, como se observa en la Figura 14. En las estructuras de hormigón pretensado-pretensado, el hormigón fragua mientras el cordón está tensado, luego de que termina el proceso de fragua del hormigón, se liberan los cordones de acero, lo cual tiene un efecto de compresión sobre el hormigón. Por el contrario, en el hormigón postesado el tensado del cordón se realiza luego de que el hormigón ha sido curado, el cordón se ancla mecánicamente de forma permanentemente a la estructura, aplicando un esfuerzo de compresión luego de que se liberan los tensores. Esta segunda manera de construir estructuras de hormigón en general es más eficiente en cuanto a la utilización de hormigón. En general en las estructuras de hormigón pretensado el cordón de acero se utiliza sin ningún tipo de recubrimiento, dado que la fuerza es transmitida del cordón al hormigón por medio de su superficie. En las estructuras post-tensadas se puede o bien utilizar cordón recubierto con grasa y plástico o epoxy, o se puede utilizar cordón sin recubrir, pero instalando previamente conductos plásticos que tienen el mismo fin que el recubrimiento del cordón, y evita que el cordón se adhiera al hormigón para que pueda luego del fraguado ser tensado y anclado a la estructura de hormigón. En la Figura 15 se observa el cordón recubierto por una capa plástica.



**Figura 13 Estructuras de hormigón pretensado**



**Figura 14 Estructura de hormigón post-tensado in situ**



**Figura 15 Cordón recubierto en grasa y plástico para hormigón post-tensado**

La fabricación del cordón pretensado en general consta de 5 pasos:

- Limpieza: el alambre del que se parte se limpia química y/o mecánicamente para desprender restos de óxido y laminilla que pueden estar adheridas a la superficie de la materia prima luego de un tiempo largo de almacenamiento
- Trefilado: mediante esfuerzos mecánicos se logra reducir el diámetro del alambre hasta el valor deseado, sin desprendimiento de material. Este proceso se realiza en varios pasos, en una o más máquinas Trefiladoras.
- Cableado: el acordonado de los alambres de acero se realiza en una máquina cableadora o toronadora
- Eliminación de tensiones: dependiendo del grado de cordón que se quiera lograr, el cordón se somete a un tratamiento térmico o termomecánico de diferentes características
- Fraccionado y empaquetado: en general el cordón pretensado se presenta en bobinas zunchadas y envueltas en una cobertura plástica, listas para ser utilizadas en los procesos de fabricación

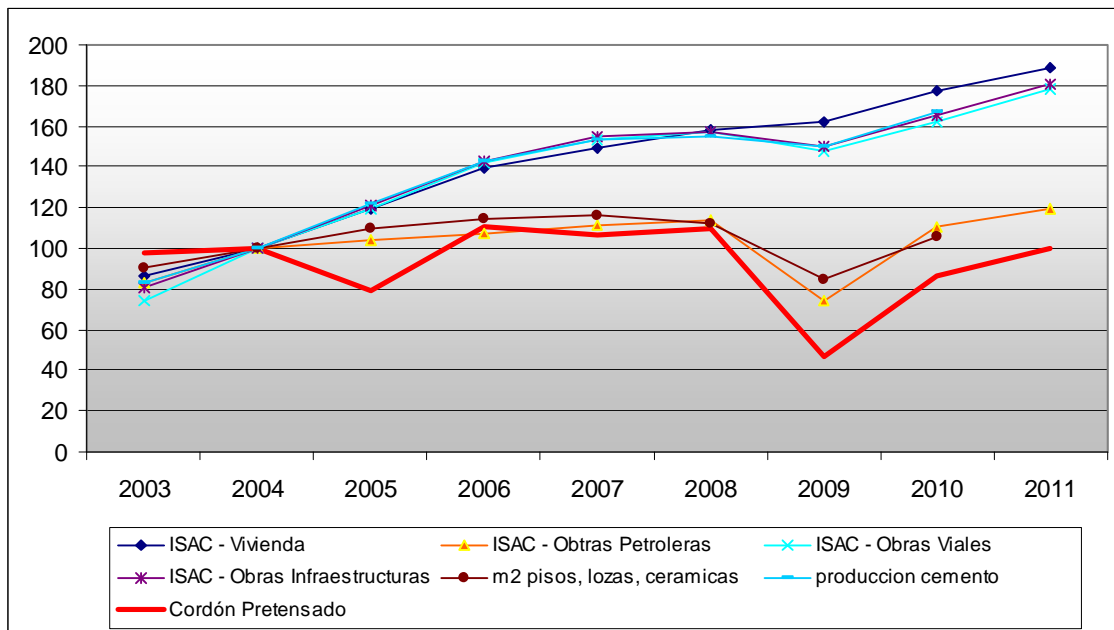
de las estructuras de hormigón, en la Figura 16 se observan distintas presentaciones del producto final.



**Figura 16 Producto Terminado en diferentes presentaciones**

### **3.2 El mercado local y las variables macroeconómicas que lo afectan**

La demanda del Cordón Pretensado acompaña al nivel de actividad de la construcción, dado que su aplicación incluye puentes, edificios, garajes, balcones, autopistas, etc. En la Figura 17 se observa la evolución de los últimos años de la demanda del mercado, y varios índices computados por el Indec, tomando como base 100% el año 2004. Se observa una fuerte correlación, especialmente con la Construcción de Obras Petroleras y con la fabricación de Lozas, Pisos y Cerámicas, sin embargo las variaciones en la demanda de cordón pretensado son aún más abruptas ante contextos de recesión. Durante la crisis del 2009, la demanda de cordón pretensado cayó prácticamente a la mitad, efectos similares fueron reportados en otros países (Prestressed Concrete Steel Wire Strand from China, U.S. International Trade Commission 2010).



**Figura 17 Comparación de la Demanda del Cordón Pretensado Local con otros indicadores del mercado, base 2004**

Como se observa en la Figura 17 en el año 2009 se produjo una caída del 50 % en la demanda, la misma se ha recuperado parcialmente durante el 2010 y 2011, pero aún se encuentra un 10 % por debajo de los valores previos a la crisis del 2008.

El sector de la construcción está fuertemente influenciado por las condiciones macroeconómicas. En la Figura 18 se puede observar la evolución del PBI y del índice ISAC que elabora el INDEC, se observa una fuerte correlación, pero con oscilaciones mayores en el ISAC, mostrando el carácter pro-cíclico del sector de la construcción.

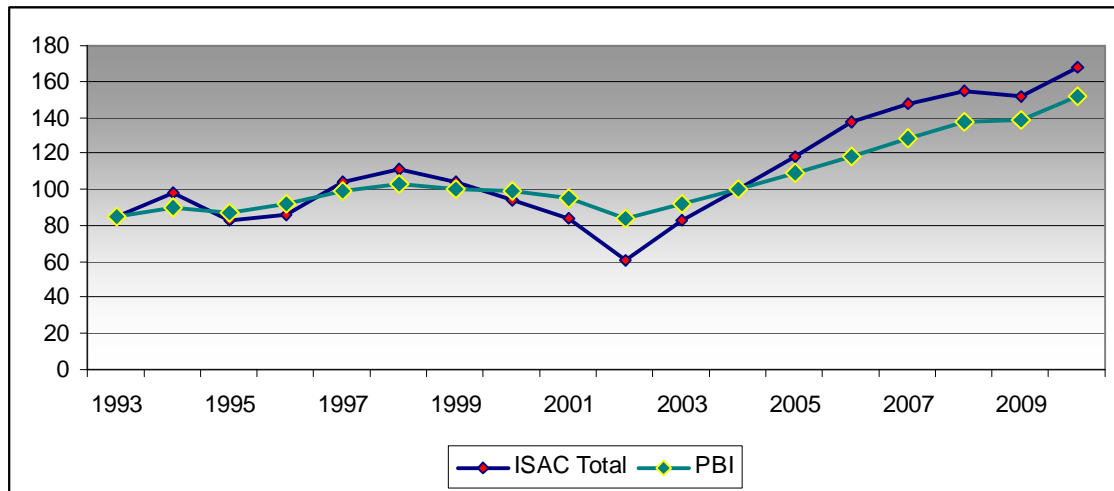


Figura 18 Evolución del PBI y del ISAC según el INDEC, base 2004

### 3.3 Oportunidades en el exterior

La producción de cordón de acero en el Mercosur está liderada por Brasil, con una capacidad instalada de producción de cables de acero, entre ellos de cordón para hormigón pretensado, cercana a 700,000 Tn/Año, concentrada totalmente en la empresa Belgo-Bekaert (U.S. International Trade Commission “ Prestressed Concrete Steel Wire Strand from Brazil, India, Japan, Korea, Mexico, and Thailand Investigation”, 2010). Brasil es productor y exportador de cordón pretensado, la utilización de su capacidad instalada sufrió una fuerte caída a fines del 2008, y aún no ha recuperado sus valores previos.

En la región de América del Norte, EEUU y Méjico son importantes productores de cordón para hormigón pretensado, con capacidades instaladas de 400,000 Tn y 200,000 Tn respectivamente. La utilización de la capacidad instalada en ambos países sufrió una fuerte caída, de un valor cercano al 70 % en 2008 a un 40 % en 2009 (Prestressed Concrete Steel Wire Strand from Brazil, India, Japan, Korea, Mexico, and Thailand Investigation).

El resto de los países de la región, exceptuando la Argentina, son importadores de Cordón Pretensado, y la demanda del mismo está íntimamente relacionada con las variables macroeconómicas que influyen sobre el sector de la construcción. Dado que los principales fabricantes de la región se encuentran



con niveles medios o bajos de utilización de la capacidad, la captación de estos mercados resulta atractiva para ellos. Según un estudio de la U.S. Internacional Trade Comisión, la selección del proveedor de Cordón Pretensado en la región está determinada en primer lugar por el precio, en segundo lugar por la calidad y en tercer lugar por la disponibilidad (Prestressed Concrete Steel Wire Strand from China, U.S. International Trade Commission 2010). Se puede concluir que las oportunidades de captar estos mercados dependen del precio al que se ofrezca el producto, siendo fundamental para ello la minimización de costos de producción.

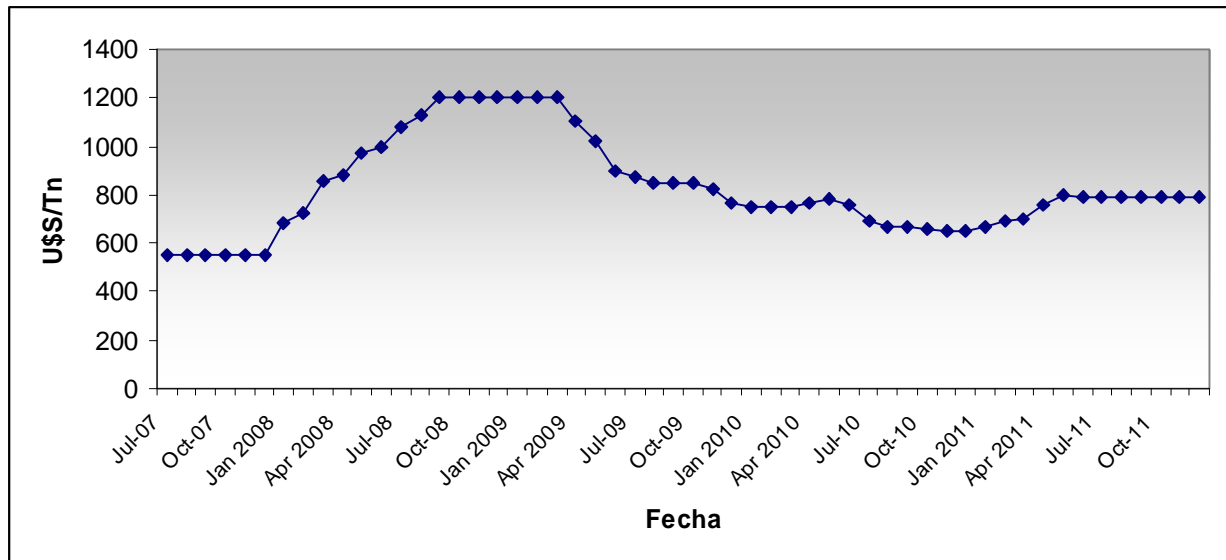
En el año 2008 se fabricaron cerca de 2,3 Millones de Tn de cordón pretensado solamente en China, de las cuales 650.000 Tn fueron exportadas ( Prestressed Concrete Steel Wire Strand from Brazil, India, Japan, Korea, Mexico, and Thailand, U.S. International Trade Commission, 2009). China se convirtió en la última década en el mayor exportador de Cordón Pretensado del mundo, el incremento de su producción fue de un 600 % en ese período. La Unión Europea en su conjunto logró en el mismo año una producción de 900.000 Tn, e importó 250.000 Tn.

En comparación, la Argentina logró en 2008 una producción total de 14.000 Tn, el 85 % destinado a consumo local, por lo cual queda evidenciado que la Argentina como productor de Cordón Pretensado es un jugador pequeño, aunque si bien la mayor parte de su producción es destinada a satisfacer la demanda local ha podido realizar exportaciones a EEUU, Brasil y Chile, entre otros, aprovechando las oportunidades que se presentaron. En el 2011 se obtuvo un volumen total cercano a 12.700 Tn, de las cuales aproximadamente un 80 % fueron destinadas para consumo interno y el resto para exportación.

### **3.4 Precio**

El precio del cordón pretensado está en gran parte determinado por el precio de la materia prima, el alambrión de acero, que representa aproximadamente el 70 % del costo de producción. El precio del alambrión ha sufrido fuertes fluctuaciones los últimos años, como se observa en la Figura 19, trasladándose

a los márgenes de producción del cordón y de otros productos derivados del alambrón, del 2007 a fines del 2011 se observa un incremento del 43 % en el precio, con variaciones de hasta el 100 % previo a la crisis del 2008.



**Figura 19 Evolución de precios FOB del Alambrón según Indexmundi.com, de Julio 2007 a Diciembre 2011**

Los costos de transformación, representan el 30 % del costo de producción, siendo el costo más importante de este grupo la mano de obra que representa un 15 % del costo total. El resto de los costos, representan fracciones mucho menores, e incluyen energía, mantenimiento, costos de staff distribuidos, etc, cada una del orden del 1 % al 3 % del costo total (Tabla 2). El Margen antes de impuestos, calculado como la diferencia entre el Precio de Venta y los Costos es de aproximadamente el 10 %.

	<b>Materia Prima</b>	<b>70%</b>
<b>Costo Transformación</b>	<b>Costo Mano de Obra</b>	<b>15%</b>
	<b>Costo Energía</b>	<b>3%</b>
	<b>Costo Mantenimiento</b>	<b>2%</b>
	<b>Costo Staff</b>	<b>1%</b>
	<b>Otros</b>	<b>9%</b>

**Tabla 2 Composición de los costos**

Según la U.S. Internacional Trade Comisión, la demanda de cordón es prácticamente inelástica con el precio del mismo, dado a que no existen

productos sustitutos. Sin embargo, dado a lo expuesto en el apartado anterior, cualquier intento de subir el precio del producto podría incentivar el ingreso de fabricantes extranjeros.

### 3.5 Perspectivas futuras

Las expectativas para el mercado de cordón pretensado para el próximo año están marcadas por los siguientes factores:

- Profundización del modelo económico K:
  - Mayor intervención en el comercio exterior, bloqueo de importaciones dificultan la entrada de competidores, creación de la Secretaría de Comercio Exterior para instrumentar los controles.
  - Disminución del gasto público en planes de viviendas y obras de infraestructura por desequilibrio fiscal
  - Regulación de precios
- Inflación: las expectativas de inflación se mantienen en valores cercanos al 25 %, como lo indica el informe de Diciembre de la UTDT (Encuestas de Expectativas de Inflación, Diciembre 2011, Centro de Investigación en Finanzas, UTDT). Con este escenario, es de prever que los márgenes sigan estrechándose.
- Desaceleración del crecimiento de Brasil que conducirá a la desaceleración del crecimiento de Argentina, y por ello a un menor nivel de actividad y demanda de acero
- Depreciación del real brasilero que gana competitividad en relación al peso argentino, perjudicando las exportaciones argentinas
- La capacidad ociosa de producción de cordón pretensado en el resto del mundo redirecciona las exportaciones desde China a nuestra región
- Economía Global: si bien a fines de 2011 la situación de EEUU parece estar mejorando y para el año 2012 se espera tener un crecimiento no negativo, la situación europea aún es complicada y hay mucha incertidumbre en cuanto a cuándo y cómo se va a solucionar. En caso de profundizarse la crisis es de esperar una disminución en el precio de los commodities, fenómeno que se ha comenzado a observar durante

los últimos meses del 2011. Dada la fuerte dependencia de nuestra economía frente al precio de los commodities, es de esperar que el impacto sea importante.

- Economía Local: se percibió una desaceleración de la economía local durante el último trimestre del 2011, y las perspectivas son de que continúe desacelerando el crecimiento. Si por ejemplo se analiza el Índice de Confianza del Consumidor elaborado por la Universidad Torcuato Di Tella, el mes de Diciembre-11 disminuyó un 7,3 % siendo la caída mensual más elevada desde octubre del 2008 (Índice de Confianza del Consumidor, Centro de Investigación en Finanzas UTDT). El reporte del CIF muestra un deterioro en las perspectivas futuras de consumo en todas sus componentes.

### 3.6 Puntos destacados

- El Cordón pretensado es un insumo del sector construcción, y como tal está sujeto a las fluctuaciones del sector, gobernado por el crecimiento económico del país con un carácter pro-cíclico. La caída de la demanda en el año 2009 fue de un 50 %. Durante el 2010 y 2011 se ha recuperado, sin embargo dado que el crecimiento del país se desacelerará durante el 2012 no se prevé un aumento de la demanda, se espera que los niveles permanezcan similares a los del 2011.
- La Argentina es un productor pequeño de Cordón Pretensado, su producción es destinada mayormente al mercado local y por ahora está protegido contra la competencia externa, se prevé que durante los próximos años se mantenga esta situación dada la continuidad del gobierno.
- Las oportunidades en el exterior serán escasas, debido a la gran capacidad ociosa de los grandes productores que dirigen sus productos hacia mercados emergentes, y se mantendrán cercana al 20 % de la producción total
- El aumento de precio no es una opción debido al riesgo de ingreso de ingreso de productos del exterior

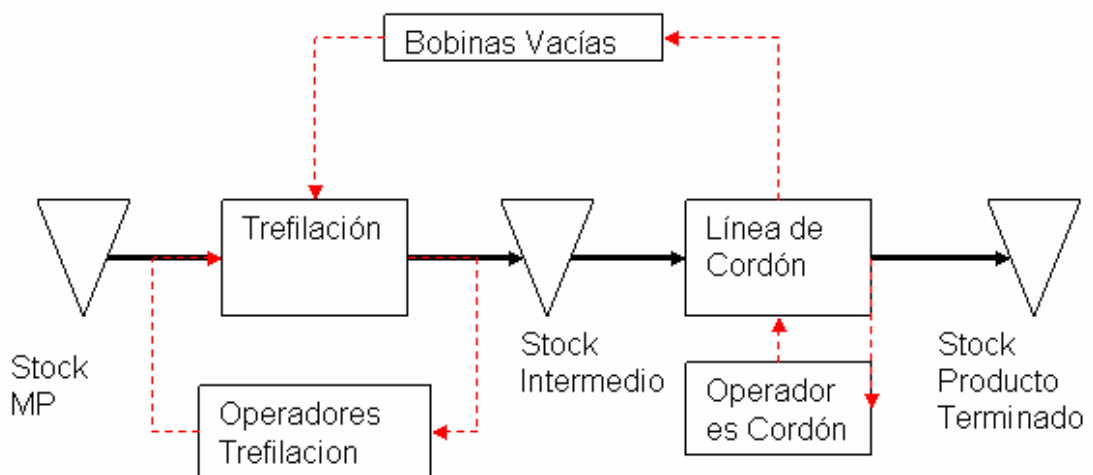
## CAPÍTULO IV: MODELADO Y SIMULACION DE LA PLANTA DE CORDON PRETENSADO

En este capítulo se describirá y modelará la planta de cordón pretensado con el objetivo de:

- Obtener un modelo de la planta
- Determinar los cuellos de botella para cada producto
- Caracterizar la planta para cada producto: Capacidad, Tiempo de Ciclo, WIP
- Evaluar los incrementos de capacidad frente a
  - Incrementos de velocidad de las máquinas
  - Disminución de tiempos de set-up de las máquinas
  - Agregado de una segunda trefiladora
  - Modificación del tamaño de batch de la trefiladora

### 4.1 Descripción de la planta

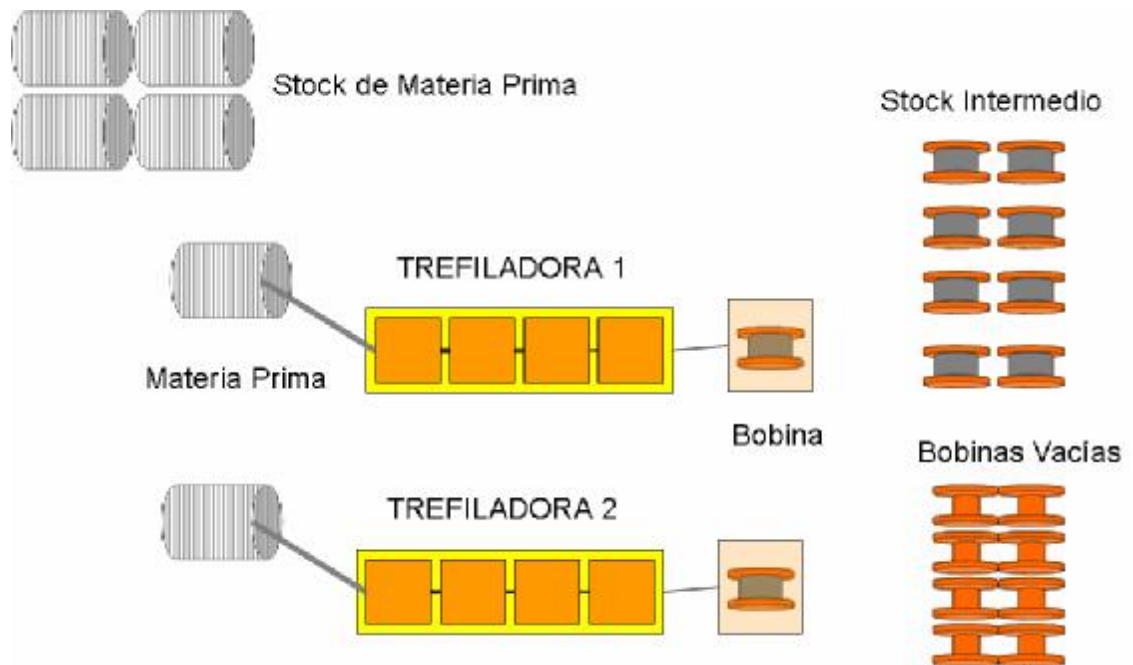
En la Figura 20 pueden verse ilustradas la disposición de los sectores a considerar en el modelo.



**Figura 20 Esquema de la planta de cordón pretensado**

- Trefilación: compuesta por varias máquinas trefiladoras, que abastecen a varias líneas además de la línea de cordón. En la Figura 21 puede verse un esquema del sector trefilación. Del sector de trefilación se dedica una trefiladora exclusivamente para fabricar el

alambre para cordón, y eventualmente se puede disponer de una segunda trefiladora de menor capacidad de ser necesario, pero sacrificando la producción de otros productos. Entre ambos sectores existe la posibilidad de almacenar stock intermedio en forma de bobinas con alambre.



**Figura 21 Esquema del sector Trefilación**

- Línea de Cordón: está compuesta a su vez por 3 líneas, las cuales están separadas por acumuladores que permiten desacoplar parcialmente su funcionamiento, como se observa en la Figura 22.

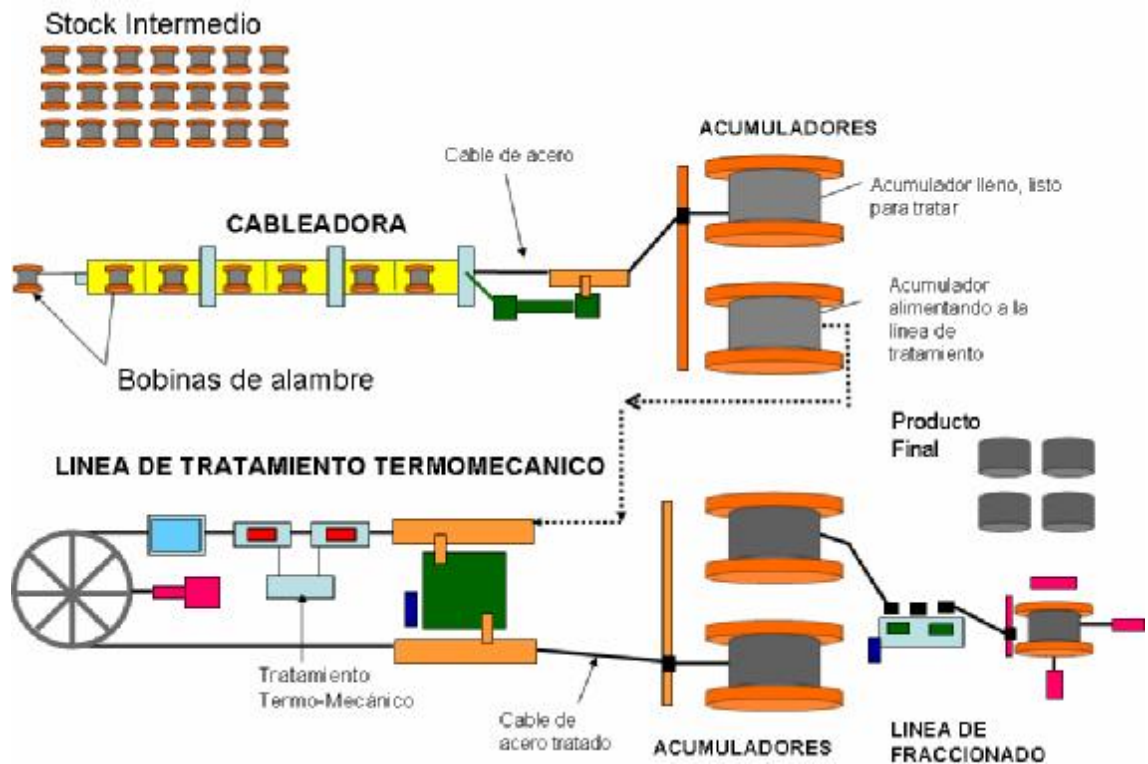


Figura 22 Detalle de la línea de Cordón

- Cableadora
- Línea de Tratamiento Termomecánico
- Línea de Fraccionado

El cordón se compone de distintos tipos de alambre en función de la medida a fabricar. El cable fabricado se compone de 6 alambres perimetrales o torzales, y un alambre central o alma. El alma es de un diámetro mayor a los torzales, por lo tanto a la hora de producir el sector de trefilación debe asegurar que se provea la proporción adecuada de cada uno de las medidas. En la Figura 23 se puede observar un diagrama en bloques de la planta donde se observan los siguientes componentes:

- MP: stock de materia prima
- Trefilación
- BV: stock de bobinas vacías para ser usadas en la trefilación, durante el proceso de cableado las bobinas se vacían y vuelven al stock de bobinas vacías
- SI: stock intermedio de bobinas con alambre trefilado apto para cablear

- Cableadora 6-1800
- B1: acumulador de cordón sin tratamiento térmico, que equivale a un buffer de tamaño 1 entre la cableadora y la línea de tratamiento
- Tratamiento termo-mecánico
- B2: acumulador de cordón tratado previo al fraccionado, que equivale buffer de tamaño 1 entre la línea de tratamiento y la línea de fraccionado
- Fraccionado
- PT: stock de producto terminado

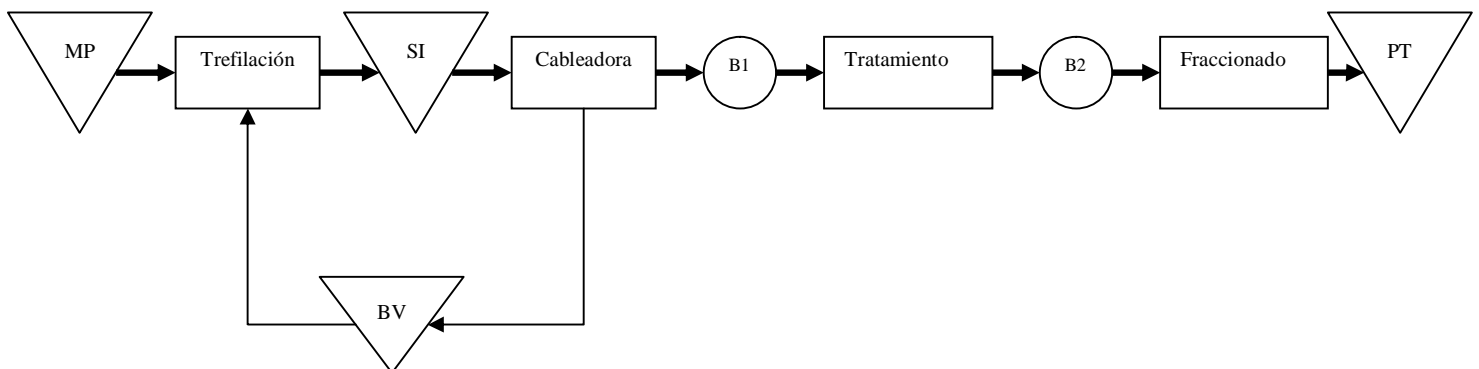


Figura 23 Diagrama en bloques de la planta

## 4.2 Diagrama de Flujos de la planta

El primer paso para poder representar de manera fidedigna un sistema de producción es conocer las operaciones que forman parte del proceso, las operaciones y tareas se representan en un diagrama de flujos en la Figura 24.



OPERACIÓN	Paso	Tareas	Operación	Traslado	Inspección	Stock	Demora	Recursos	Cantidad de Operarios
Setup Trefiladora	1	Cargar alambres a trefiladora	●	→				Autoelevador	1
	2	Soldar y cargar bobina vacía	●					Soldadora	1
Trefilación	3	Trefilar	●						0
Stock	4	Trasladar bobina a playa de stock intermedio	●	→				Autoelevador	1
	5	Stockear	●						0
	6	Trasladar bobinas a cableadora	●	→				Autoelevador	1
	7	Aguardar que la cableadora termine la carga	●						
Set up Cableadora	8	cutar alambres y sacar bobinas vacías	●						2
	9	cargar bobinas llenas	●					Grúa	2
	10	soldar los 7 alambres	●					Soldadora	2
	11	pasar las 7 soldaduras con el acumulador que estaba trabajando (lleno, aprox 25mts de cordón)	●						1
	12	descartar los 25 mts de cordón	●						2
	13	cutar el cordón	●						2
	14	ligar el cordón al acumulador que está vacío	●						1
Cableado	15	toronar la carga completa	●						0
Set up Línea Tratamiento	16	soldar el cordón del acumulador lleno al que quedó pasado por debajo del piso	●					Soldadora	2
	17	pasar la soldadura de cordón (a baja velocidad y sin tensión se pasa desde A hasta el pto B)	●						2
	18	sacar la muestra para C.Calidad (cuando B llega al acumulador lleno)	●						1
	19	cutar y enganchar al acumulador vacío	●						1
	20	dar marcha atrás y tratar los 200 mts aprox que quedaron crudos	●						1
Tratamiento	21	procesar la carga	●						0
Set up Fraccionador	22	enhebrar fraccionador	●						2
Fraccionado	23	fraccionar	●					Puente grúa	1
Stock	24	descartar el cordón no tratado	●						1
	25	trasladar a playa de producto terminado	●	→				Autoelevador	1
	26	Stockear	●						

Figura 24 Diagrama de Flujos de las operaciones de la línea de cordón pretensado

### 4.3 Modelo por computadora

#### 4.3.1 Datos de procesos y operaciones

Los efectos que se quiere incluir en el modelo son:

- Disponibilidad de recursos para cada operación: los recursos son compartidos por varias operaciones que se dan en simultáneo, por lo cual el flujo de los productos está en parte restringido por la disponibilidad de los mismos. Se considerarán:
  - Cantidad de Bobinas: se parte inicialmente de un total de 100 bobinas para ser utilizadas
  - Operadores en línea de cordón: se parte de 3 operadores por turno, en un régimen de 3 turnos (Lunes 06:00 AM a Sábado 22:00 PM)
  - Operadores de trefilación: se parte de 1 operador por trefiladora por turno en un régimen de 4 turnos (Lunes a Lunes), este proceso es el único que funciona a marcha continua.

- Descansos: los turnos de trabajo tienen descansos de 45 minutos. También se descuentan 15 minutos de tiempo muerto durante los cambios de turno.
- Capacidad por máquina: cada máquina tiene asociada una velocidad de funcionamiento determinado, que es función del material que esté procesando, estos valores se indican en la Tabla 3.

MAQUINA	9,53 mm		12,70 mm		15,24 mm	
	[m/min]	[Tn/h]	[m/min]	[Tn/h]	[m/min]	[Tn/h]
CABLEADORA	49,95	1,3	72,15	3,4	88,8	6,1
LINEA DE TRATAMIENTO	120	3,1	100	4,7	70	4,8
LINEA DE FRACCIONADO	120	3,1	120	5,6	120	8,2
TREFILADORA	ALE P/9,53 mm		ALE P/12,70 mm		ALE P/15,24 mm	
	[m/s]	[Tn/h]	[m/s]	[Tn/h]	[m/s]	[Tn/h]
	9,7	2,2	8,5	3,5	8,3	5,0

**Tabla 3 Velocidades y Capacidades por máquina**

- Disponibilidad de máquina: en función de los históricos de rotura de máquina se asoció una distribución de probabilidades para el Tiempo Medio entre Fallas (TMEF) y el Tiempo Medio de Para Reparar (TMPR). Las distribuciones asociadas son Exponencial y LogNormal respectivamente, y los parámetros son obtenidos a partir de históricos de mantenimiento. Las distribuciones asociadas pueden observarse en la Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28.

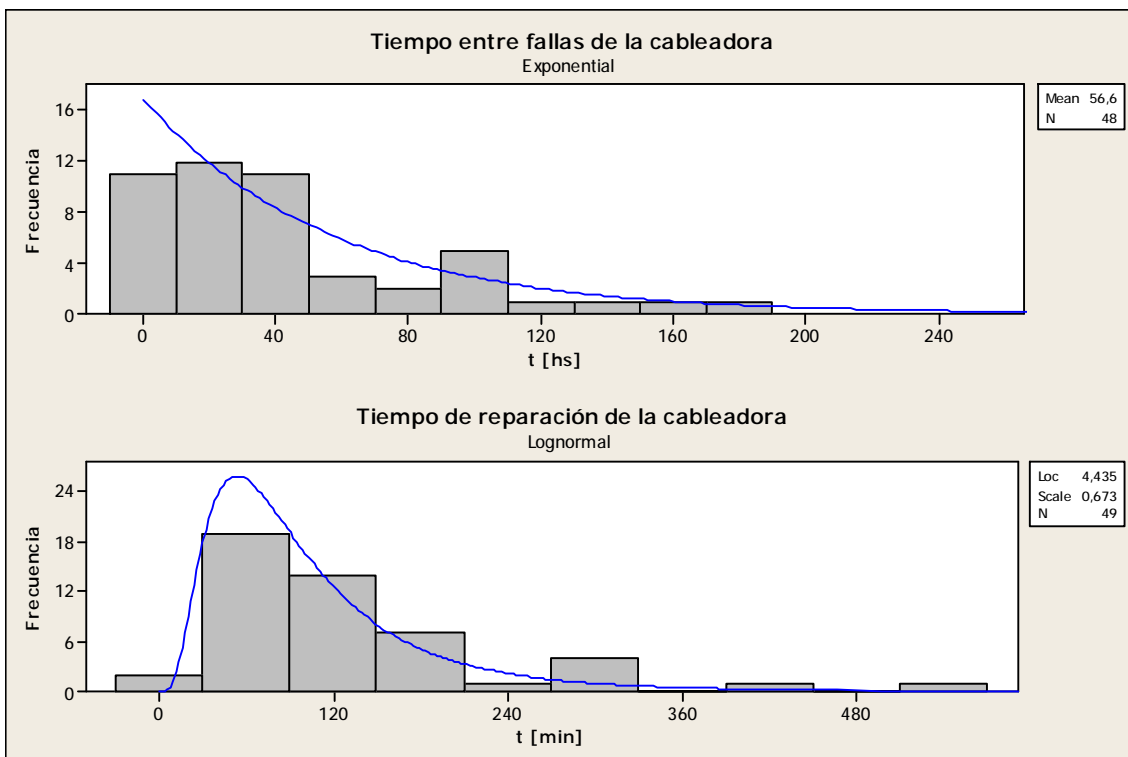


Figura 25 Tiempos entre falla y Tiempos para reparar de la Cableadora

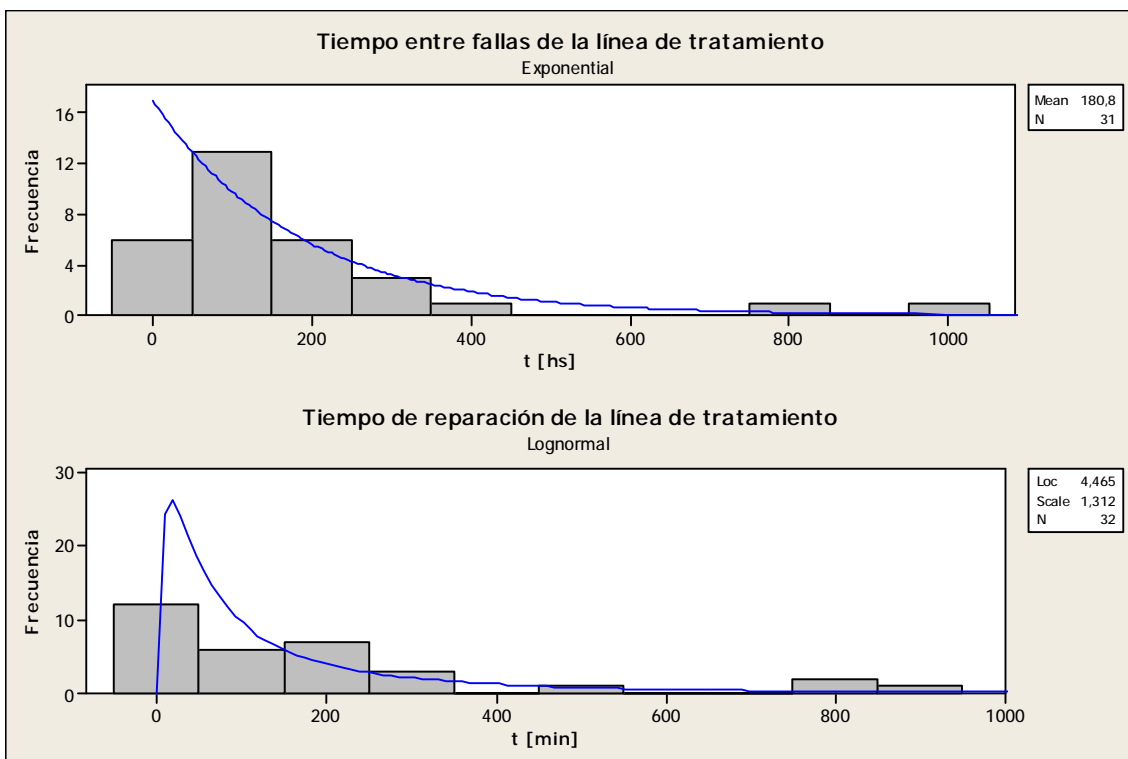


Figura 26 Tiempos entre falla y Tiempos para reparar de la línea de tratamiento

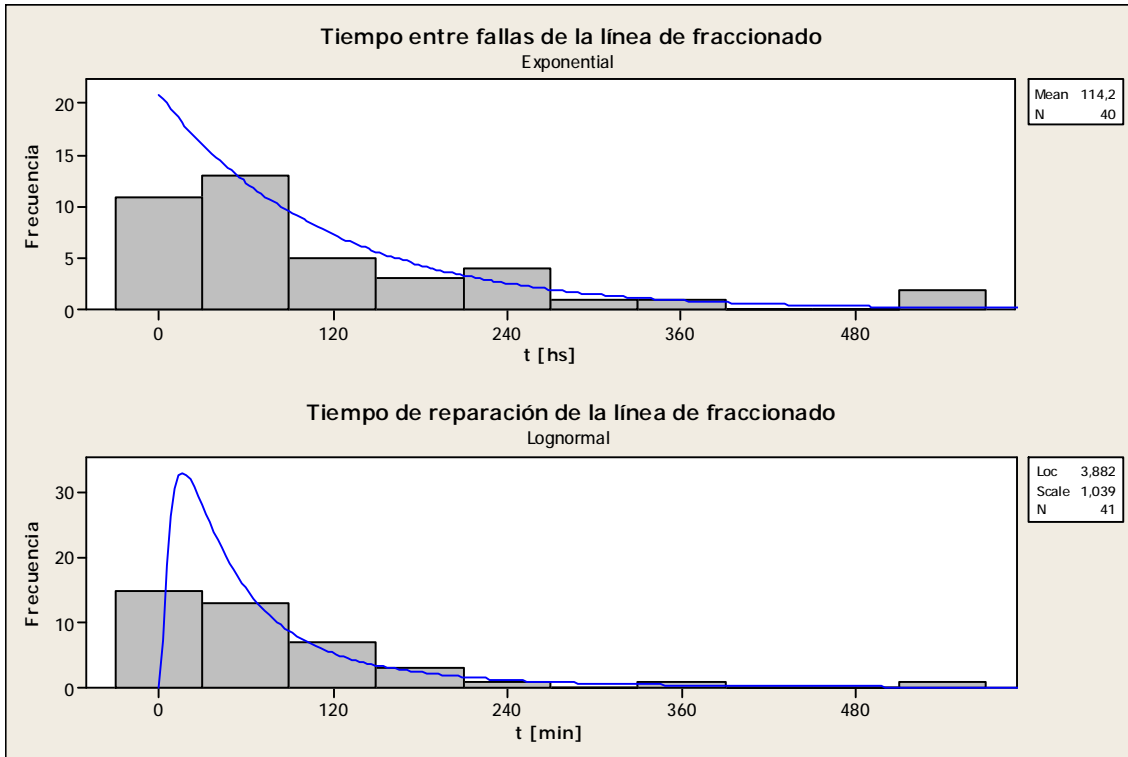


Figura 27 Tiempos entre falla y Tiempos para reparar de la línea de fraccionado

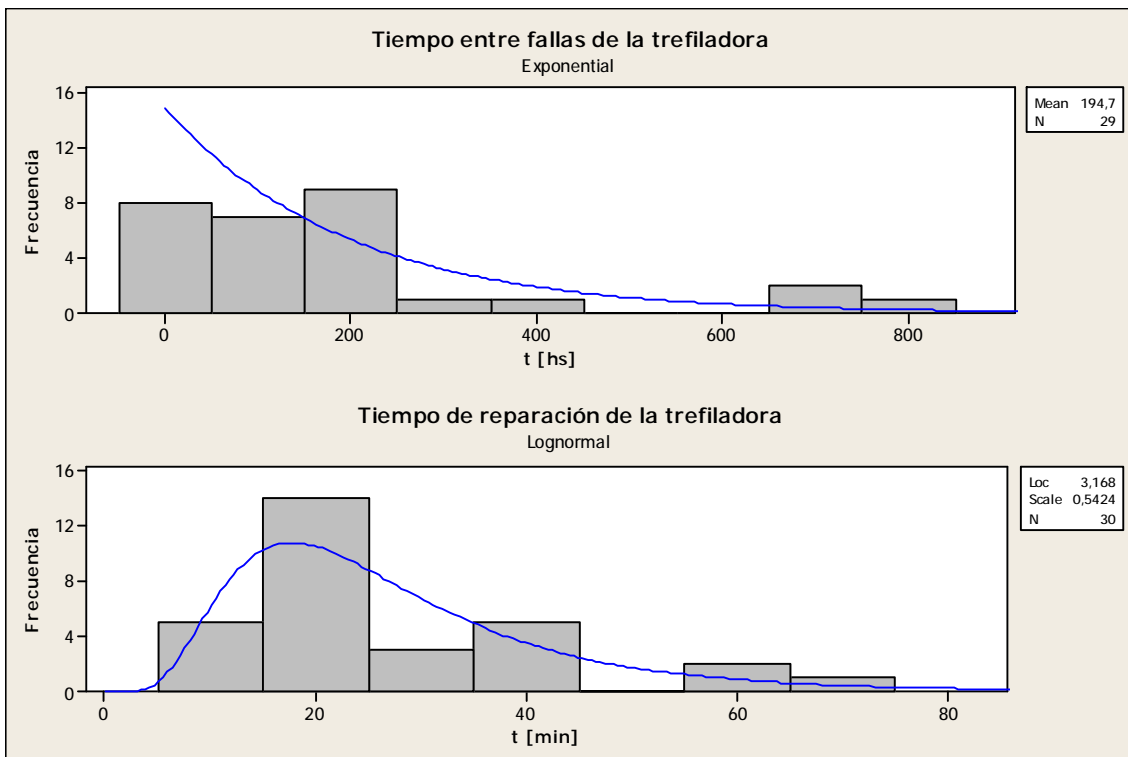
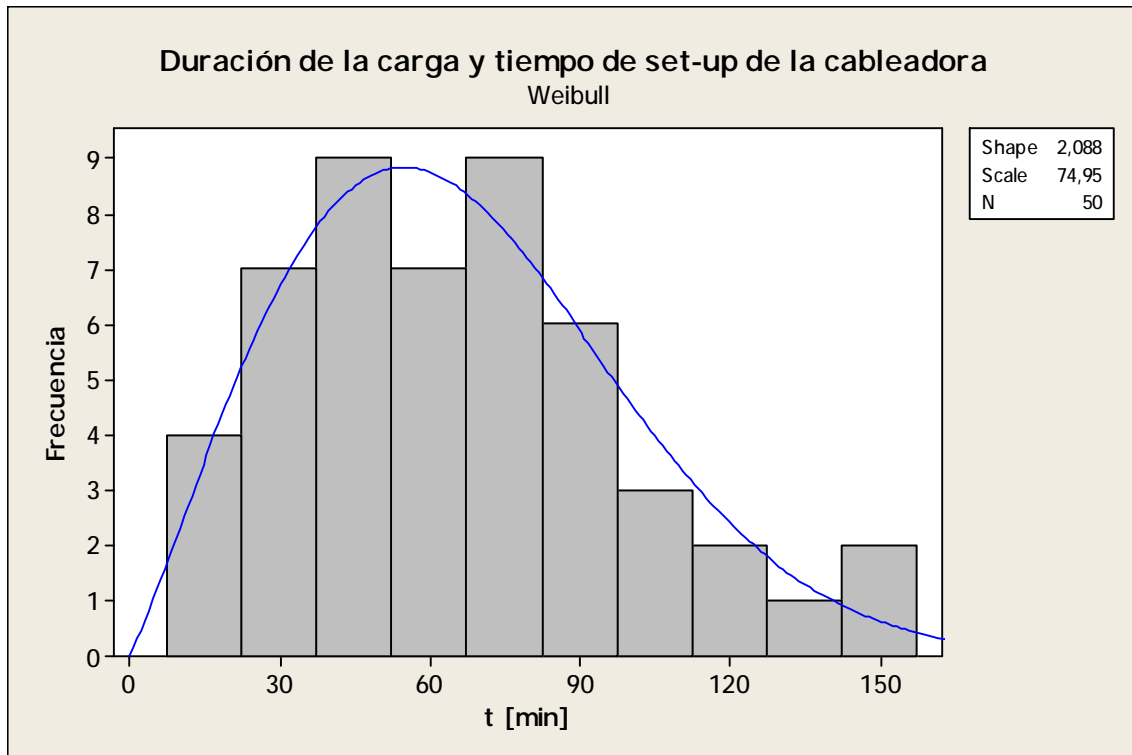
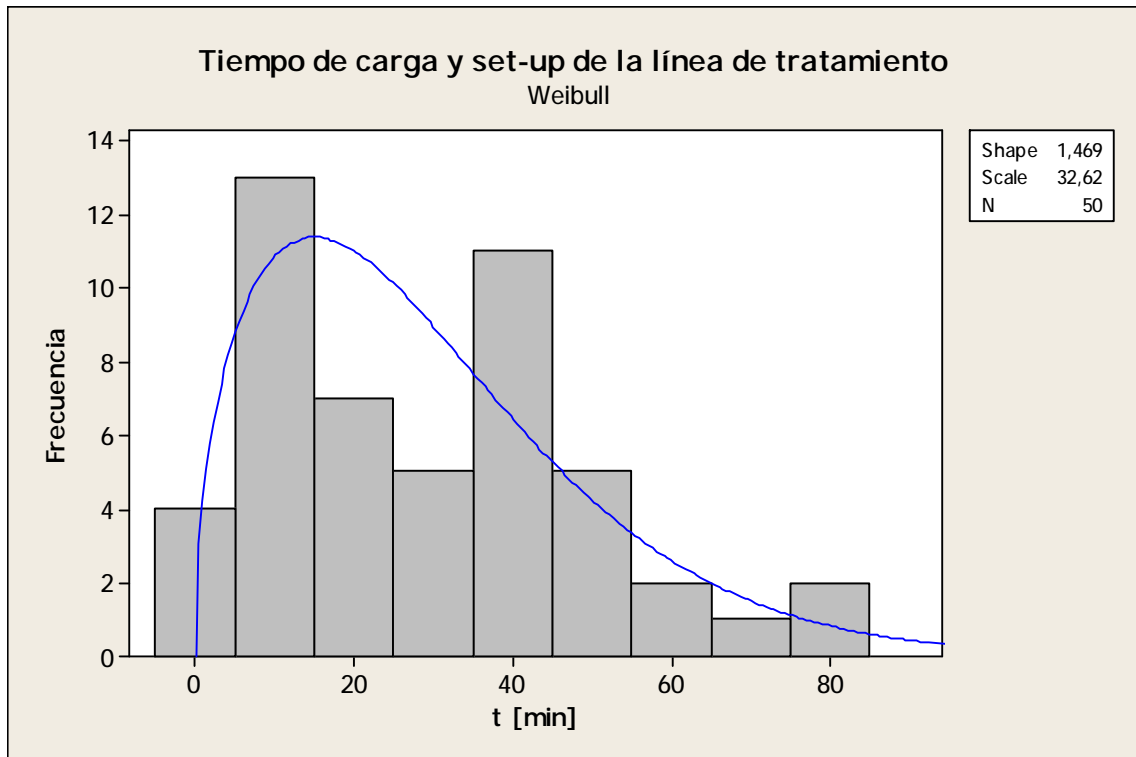


Figura 28 Tiempos entre falla y Tiempos para reparar de la trefiladora

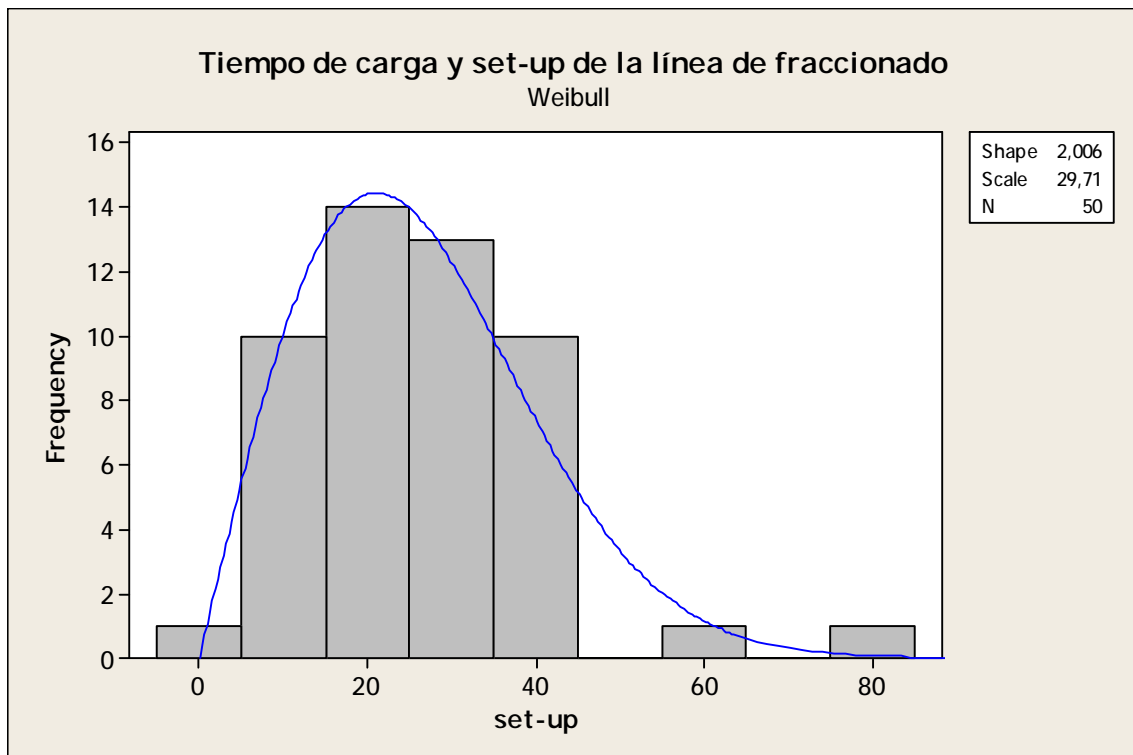
- Duración de los tiempos de carga y set-up de cada máquina: en función del sistema de Control de Tiempos de Máquina (CTM) se obtienen las distribuciones de tiempos a utilizar en la simulación, como se observa en la Figura 29, Figura 30, Figura 31 y Figura 32.



**Figura 29 Duración del tiempo de carga y set-up de la cableadora**



**Figura 30** Distribución de frecuencias del tiempo de carga y set-up de la línea de tratamiento



**Figura 31** Distribución de frecuencias del tiempo de carga y set-up de la línea de fraccionado

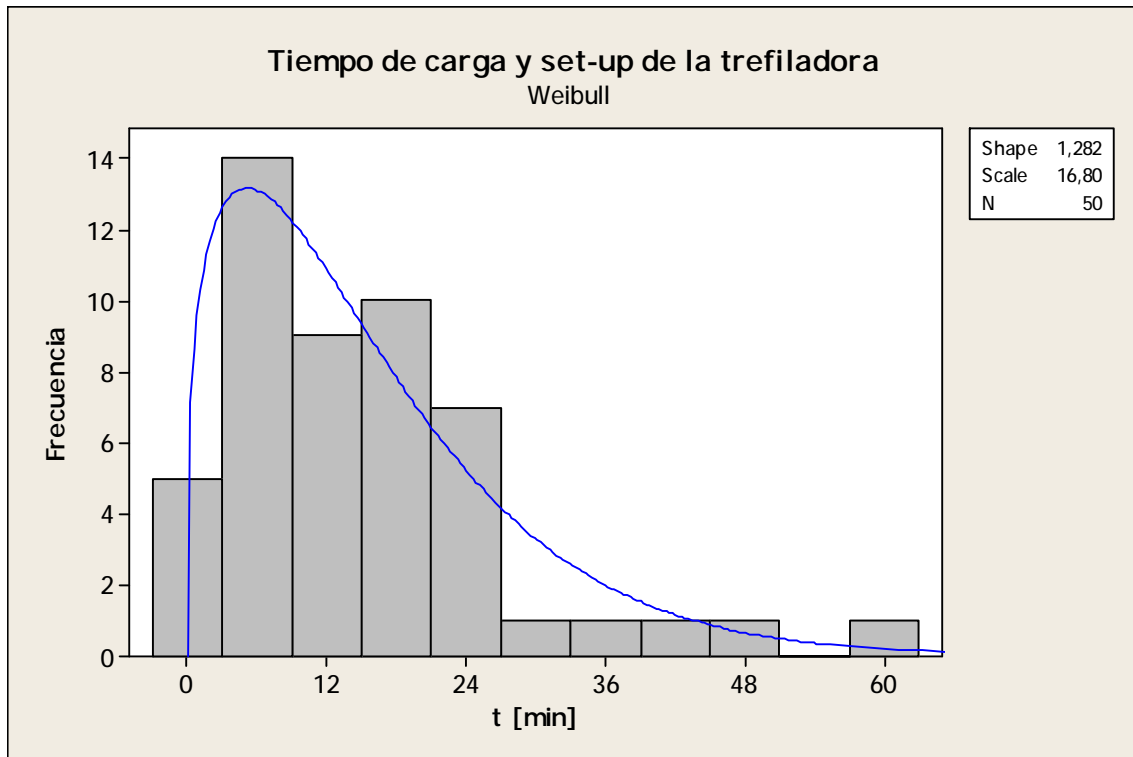


Figura 32 Distribución de frecuencias del tiempo de carga y set-up de la trefiladora

#### 4.3.2 Construcción del modelo en EXTEND®

En base a los diagramas en bloque, de flujo y los datos recolectados se puede armar un modelo de simulación en una gran variedad de programas, desde una planilla en Excel hasta un programa escrito en algún lenguaje de programación como por ejemplo C++. Se utilizará nuevamente la aplicación EXTEND® dado a que tiene integradas numerosas herramientas orientadas a la simulación de procesos productivos. Desde la Figura 33 a la Figura 40 se observa la construcción del modelo de simulación en EXTEND®.

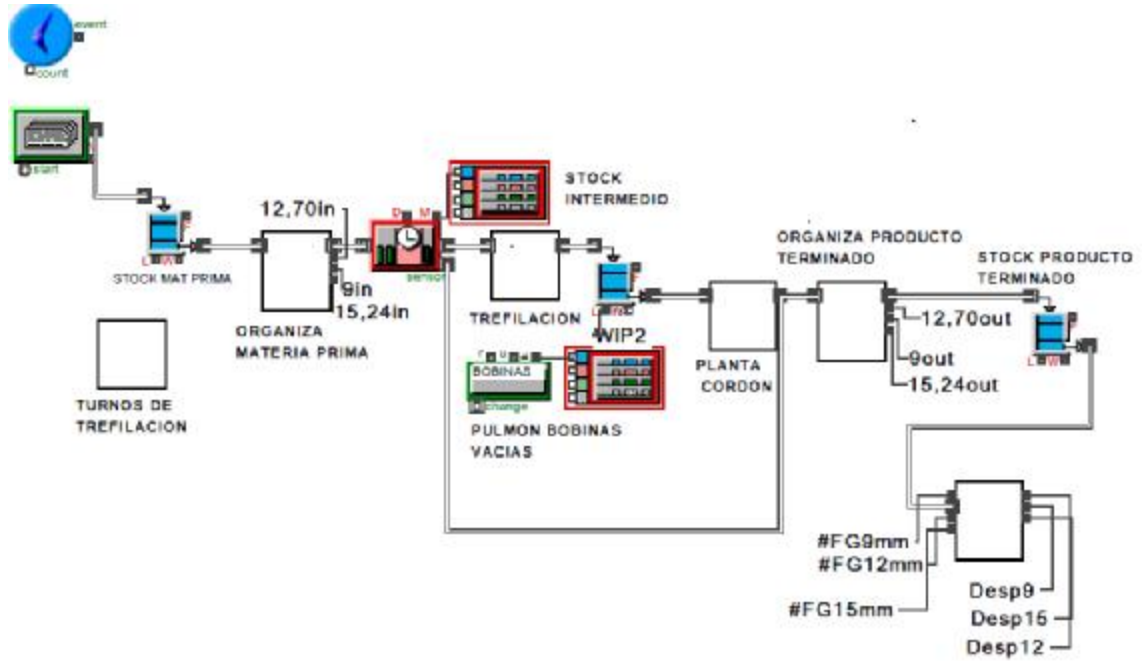


Figura 33 Nivel Superior del Simulador, interconexión de bloques principales

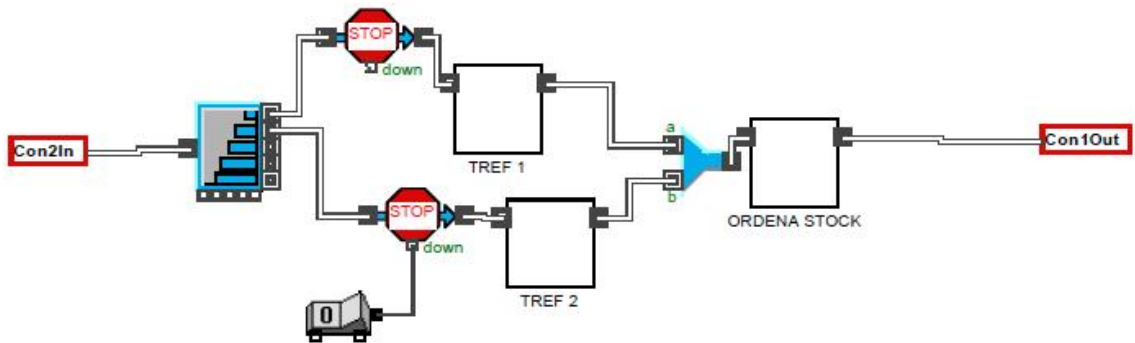


Figura 34 Bloque Trefilación

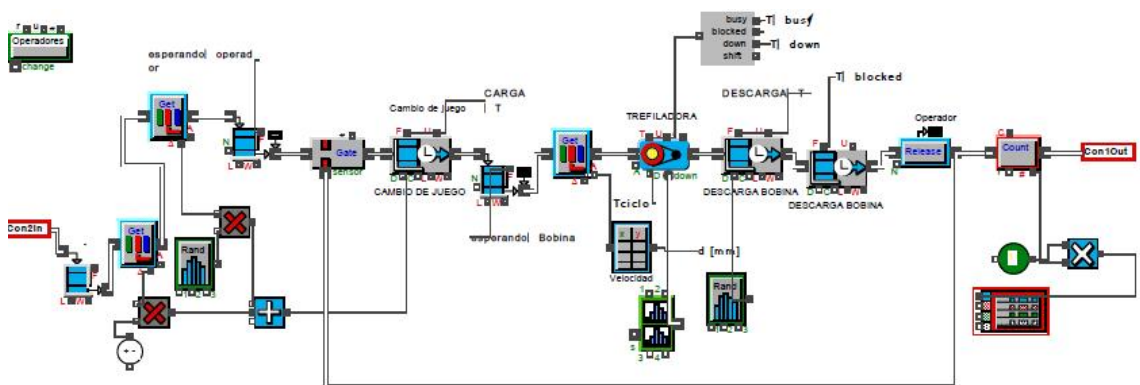


Figura 35 Bloque de Trefiladora



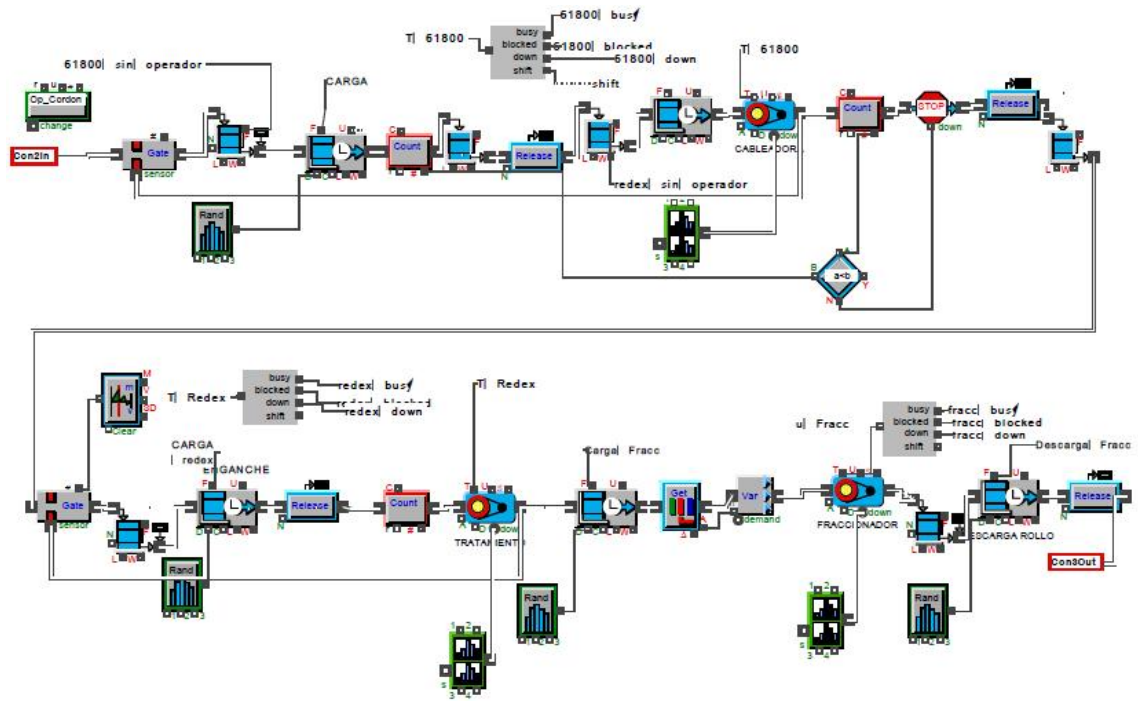


Figura 36 Bloque de Planta de Cordón

Notebook - Cordon Bloques.mox

Programa de Producción

Output Time	Value	Medida	Material
0	0	5	1
1	0	30	1
2			
3			

Repeat the program every  days

**MATERIAL**

- 0 Torsales del 9mm
- 1 Alma del 9mm
- 2 Torsales del 12,7mm
- 3 Alma del 12,7mm
- 4 Torsales del 15mm
- 5 Alma del 15mm

**MEDIDA**

- 0 9mm
- 1 12mm
- 2 15mm

**PARAMETROS DE PROCESO**

Cantidad de bobinas disponibles <input type="text" value="100"/>	Duración operación carga bobinas y preparación de cableadora	<input type="text" value="27,05"/>	<input type="text" value="minutes"/>
	Duración operación carga y preparación de línea tratamiento	<input type="text" value="35,17"/>	<input type="text" value="minutes"/>
	CABLEADORA	TRATAMIENTO	FRACCIONADOR
Ciclo para 9mm [hs]	<input type="text" value="9,15"/>	<input type="text" value="4,4"/>	<input type="text" value="0,403"/>
Ciclo para 12 mm [hs]	<input type="text" value="2,55"/>	<input type="text" value="2,7"/>	<input type="text" value="0,225"/>
Ciclo para 15 mm [hs]	<input type="text" value="2,08"/>	<input type="text" value="2,64"/>	<input type="text" value="0,154"/>

**VELOCIDADES TREFILACION FRIGERIO [m/s]**

	x in	y out
0 Torsales del 9mm	3,15	9,7
1 Alma del 9mm	3,26	9,7
2 Torsales del 12,7mm	4,23	12,7
3 Alma del 12,7mm	4,35	12,7
4 Torsales del 15mm	5,1	8,3
5 Alma del 15mm	5,35	8,3

Cambio de Juego [hs]

Carga / Descarga de bobina [min]

**DURACION DEL CICLO TREFILADO LOGOS**

	x in	y out
0 Torsales del 9mm	3,15	7
1 Alma del 9mm	3,26	7
2 Torsales del 12,7mm	4,23	7
3 Alma del 12,7mm	4,35	7
4 Torsales del 15mm	5,1	7
5 Alma del 15mm	5,35	7

Cambio de Juego [hs]

Carga / Descarga de bobina [min]

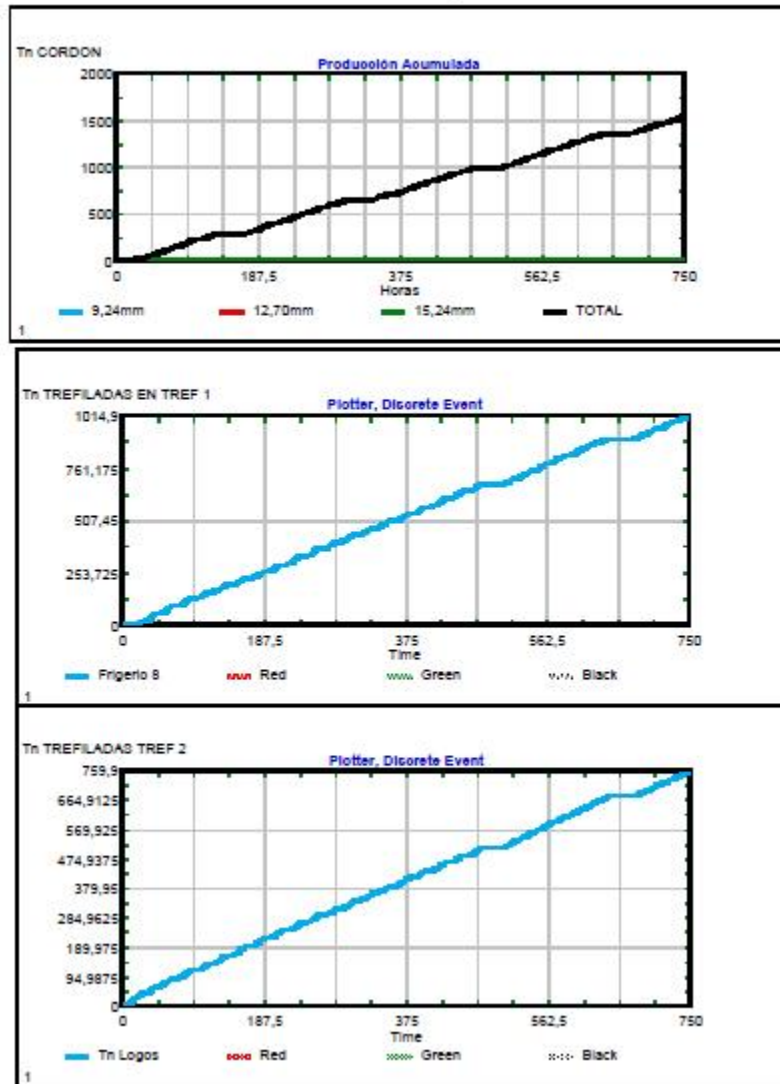
**ROTURA DE MÁQUINAS**

	Cableadora	Tratamiento	Fraccionado	Frigerío	Logos
MTBF $\mu$	<input type="text" value="61,8"/>	<input type="text" value="157"/>	<input type="text" value="67,7"/>	<input type="text" value="172"/>	<input type="text" value="94,1"/>
MTRR $\mu$	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2,4"/>	<input type="text" value="0,9"/>	<input type="text" value="0,4"/>	<input type="text" value="0,4"/>
$\sigma$	<input type="text" value="1,4"/>	<input type="text" value="3,6"/>	<input type="text" value="0,8"/>	<input type="text" value="0,3"/>	<input type="text" value="0,3"/>

Cordon Bloques.mox - 1

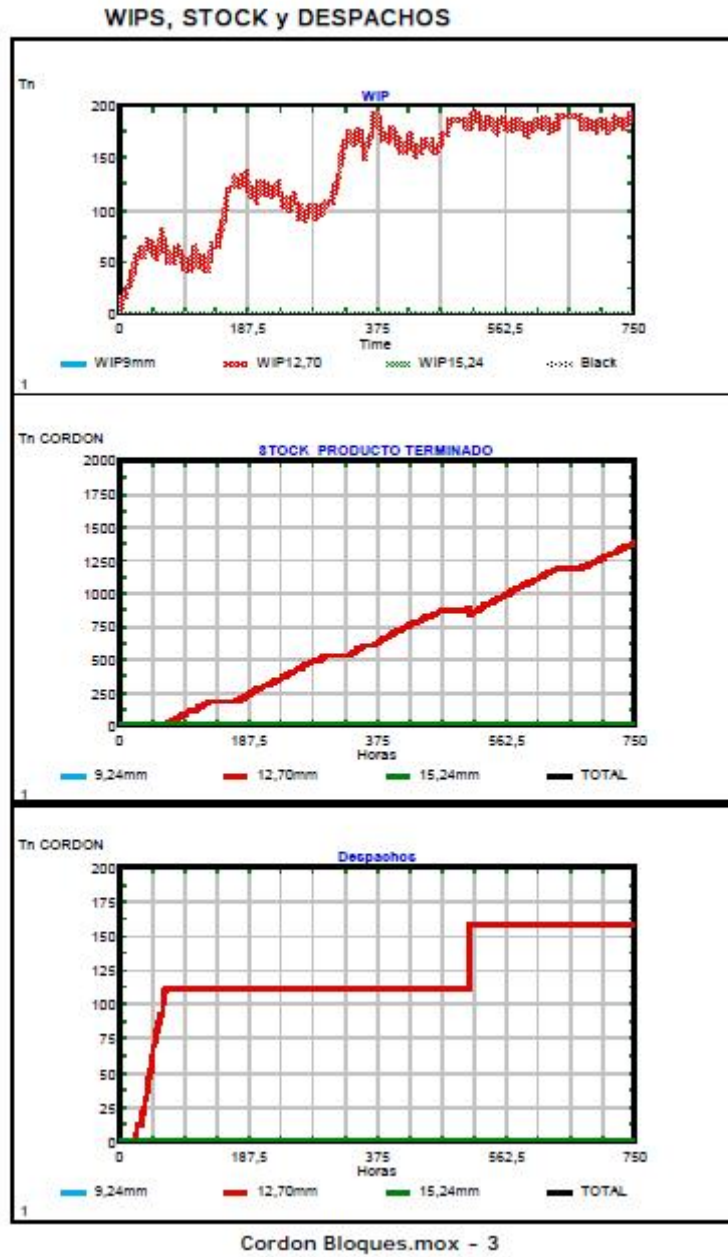
Figura 37 Pantalla de Configuración de la Simulación

Notebook - Cordon Bloques.max



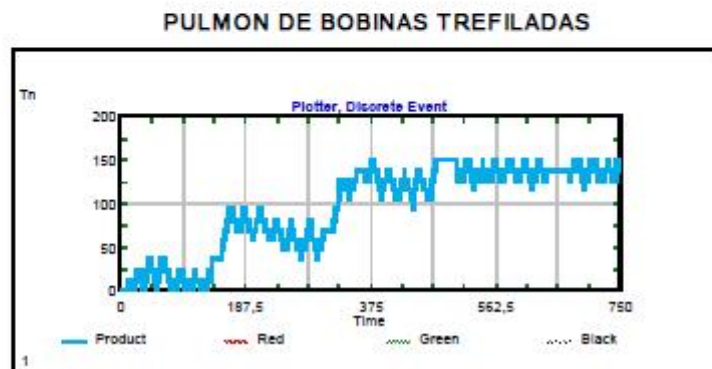
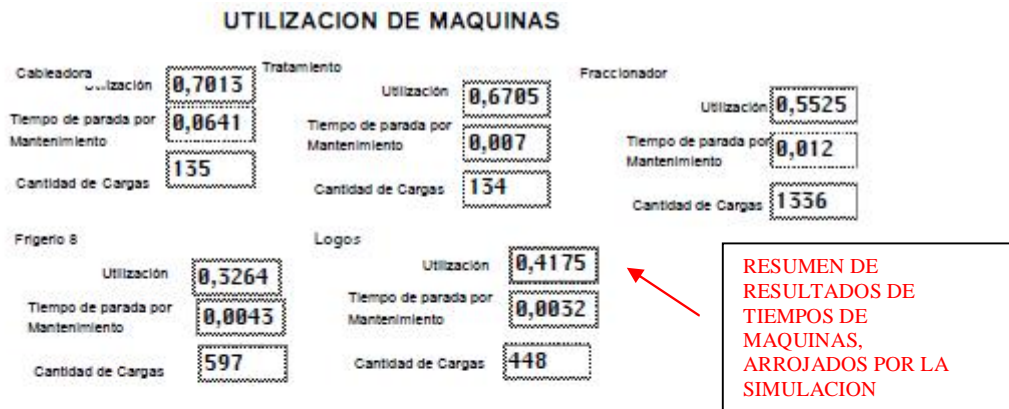
EVOLUCION DE LA PRODUCCION EN CADA SECTOR DE LA SIMULA

Figura 38 Pantalla de visualización de resultados N° 1



EVOLUCION DEL WIP, PRODUCCION Y DESPACHOS A LO LARGO DE LA SIMULACION

Figura 39 Pantalla de visualización de resultados N° 2



**Figura 40 Pantalla de visualización de resultados N° 3**

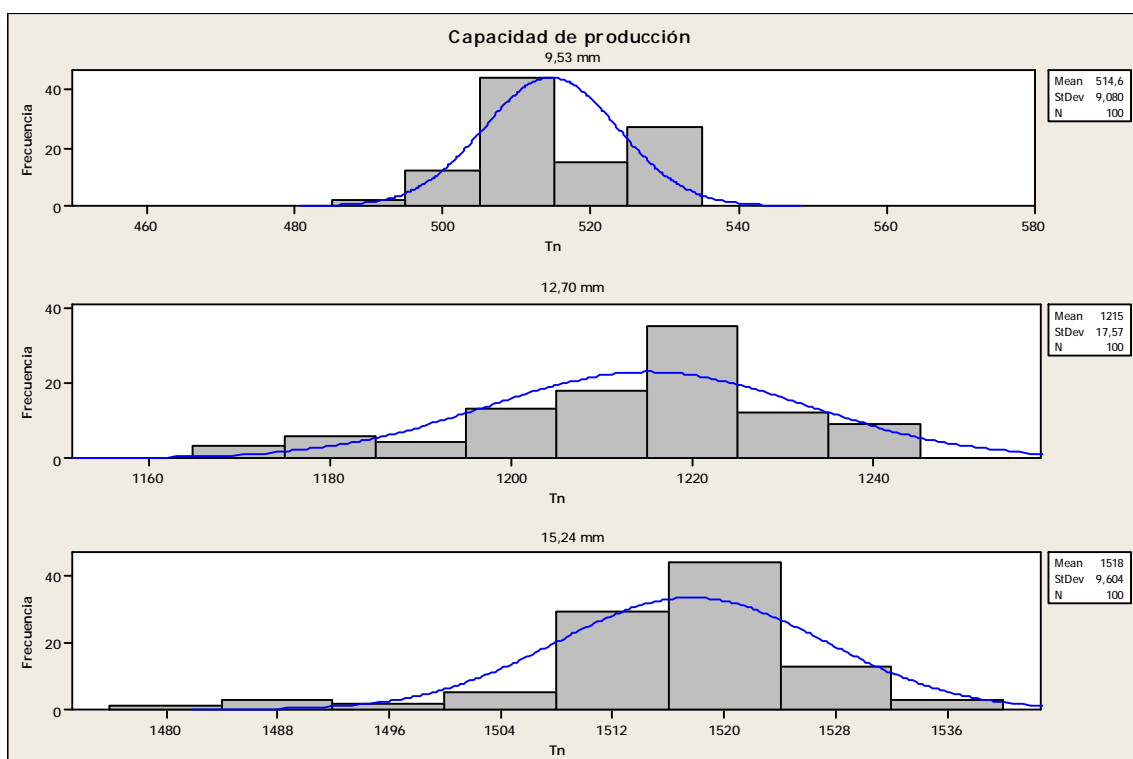
Con la aplicación EXTEND® el nivel de detalle puede aumentarse según la necesidad. El control y visualización de las simulaciones también puede construirse, de manera de crear herramientas de gestión a medida, que podrían ser utilizadas sin conocer los detalles de la implementación de los bloques.

#### 4.4 Caracterización de la planta a partir de la simulación por computadora

##### 4.4.1 Capacidad

Dado el carácter aleatorio que introducen las distribuciones de probabilidad de TMEF y TMPR la capacidad de la planta también tendrá asociada una distribución de probabilidades. Para obtener una caracterización de la planta que muestre las fluctuaciones se puede proceder a realizar una simulación de Montecarlo. Para ello, se realizaran sucesivas simulaciones de 720 hs de producción, equivalente a un mes de 30 días, en cada una de las medidas a producir. La producción total lograda en esas horas es una muestra de la

Capacidad de la planta, por lo que cada una de las corridas es distinta e independiente de las anteriores. Haciendo un histograma para cada medida, se obtiene una aproximación de la distribución de probabilidades teórica de la capacidad de la planta en cada medida, lo cual a su vez permite obtener intervalos de confianza de la capacidad de la planta y permitiría eventualmente conocer con que probabilidad se podría cumplir un plan de producción determinado. Los resultados obtenidos mediante la simulación de Montecarlo pueden observarse en la Figura 41.



**Figura 41 Resultado de la simulación de Montecarlo**

Una vez obtenidas las distribuciones de probabilidad para la capacidad mensual de la planta en cada producto, podemos obtener el valor de capacidad que nos da un intervalo de confianza del 95 % para caracterizar a la planta:

- Capacidad para 9,53 mm
  - o Mes de 30 días y 4 fines de semana: 515 Tn +/- 18 Tn
  - o Por día: 20,4 Tn +/- 3,4 Tn
  - o Por turno: 6,8 Tn +/- 2 Tn
- Capacidad para 12,70 mm

- Mes de 30 días y 4 fines de semana: 1215 Tn +/- 35 Tn
- Por día: 48,6 Tn +/- 7 Tn
- Por turno: 16,2 Tn +/- 4 Tn
- Capacidad para 15,24 mm
  - Mes de 30 días y 4 fines de semana: 1518 Tn +/- 19 Tn
  - Por día: 60,6 Tn +/- 4 Tn
  - Por turno: 20,2 Tn +/- 2,2 Tn

#### 4.4.2 Cuellos de botella

Un cuello de botella es aquel proceso cuya capacidad restringe el throughput total de la planta (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986). En una planta donde intervienen varias máquinas, puede que todas ellas restrinjan o influyan en la capacidad total de la planta, pero lo hagan en distintos momentos debido a la variabilidad de los procesos, en este caso los autores sugieren llamarlos Centros con Restricción de Capacidad (CCR). Existen varios métodos distintos de determinar los cuellos de botella y CCRs del sistema, y en general estos arrojan resultados que no siempre coinciden. En este trabajo se seguirán los lineamientos descritos por C. Roser (2001), debido a las siguientes ventajas que representa el método propuesto por él:

- Es más preciso en la identificación del cuello de botella cuando varias máquinas tienen niveles de utilización similares
- Considera que el tiempo de preparación, o set-up, y el tiempo de mantenimiento son tiempos en los que la instalación está activa, y por ende instalaciones con capacidades mayores pero bajas disponibilidades o altos tiempos de set-up pueden llegar a ser igualmente cuellos de botella
- Es simple de implementar en las simulaciones

Según C. Roser (2001), se define al cuello de botella como aquella máquina que en promedio esté el mayor porcentaje del tiempo en actividad. Según Roser, una máquina está en actividad cuando está procesando material, siendo preparada/cargada/configurada (set-up) o siendo reparada, es decir, siempre que la máquina esté colaborando para aumentar el throughput de la planta se

considera activa. Por otro lado, una máquina está inactiva cuando o bien está esperando algún recurso o está bloqueada porque no tiene cómo desalojar el material ya procesado. De esta manera, máquinas con alta frecuencia de rotura, o largos tiempos de set-up pueden ser cuellos de botella aún cuando su capacidad teórica sea mayor a la del resto de las máquinas. De la misma manera se debe proceder con los recursos asignados. En nuestro caso vamos a considerar además el nivel de actividad, o en este caso mejor dicho la utilización, de las bobinas y de los operadores.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.

MAQUINA/RECURSO	Nivel de Actividad/Utilización		
	9,53 mm	12,70 mm	15,24 mm
CABLEADORA	100%	99%	77%
LINEA DE TRATAMIENTO	44%	74%	78%
FRACCIONADOR	38%	54%	51%
OPERADORES CORDON	26%	49%	50%
BOBINAS	96%	62%	51%
TREFILADORA	58%	99%	100%
OPERADORES TREFILACION	42%	88%	89%

**Tabla 4 Valores medios del Nivel de actividad de las máquinas y la Utilización de recursos en 720 hs de simulación**

Por otra parte, resulta de interés conocer el porcentaje de tiempo que realmente la máquina estuvo en funcionamiento normal, llamado “hilo continuo”. En la Tabla 5 se observa que no siempre los cuellos de botella coinciden con aquellas máquinas con mayor tiempo de funcionamiento.

MAQUINA	Hilo Continuo		
	9,53 mm	12,70 mm	15,24 mm
CABLEADORA	90%	75%	60%
LINEA DE TRATAMIENTO	40%	60%	70%
FRACCIONADOR	35%	50%	40%
TREFILADORA	42%	62%	53%

**Tabla 5 Porcentaje de tiempo de máquina en funcionamiento para cada producto**

De esta manera se observa que los posibles cuellos de botella en cada medida son:

- 9,53 mm: la cableadora es el cuello de botella. Se debe tener cuidado con el significado de la alta utilización de bobinas en este



caso. Debido a que no se implementó ningún tipo de control de flujo de la producción, la utilización de las bobinas tenderá a crecer siempre que la trefilación tenga mayor capacidad que el sector de cordón, sin significar de ninguna manera que la cantidad de bobinas sean un cuello de botella.

- 12,70 mm: la trefiladora y la cableadora son posibles cuellos de botella, ambas prácticamente restringen la capacidad de la planta.
- 15,24 mm: la trefiladora es el cuello de botella.

#### 4.4.3 WIP

El WIP es todo el producto en proceso, que incluye material que está siendo procesado en alguna máquina, y material que está esperando para ser procesado. Los resultados para cada producto se observan en la Figura 42. Si no se ejerce ningún tipo de control sobre el stock intermedio entre trefilación y cordón, entonces el volumen de stock intermedio está limitado únicamente por la cantidad de bobinas con que se cuenta y por la diferencia de capacidad entre trefilación y la línea de cordón. Es de esperar que en aquellas medidas donde sobra capacidad de trefilación, el stock de bobinas suba gradualmente hasta llenar todas las bobinas con las que se cuenta.

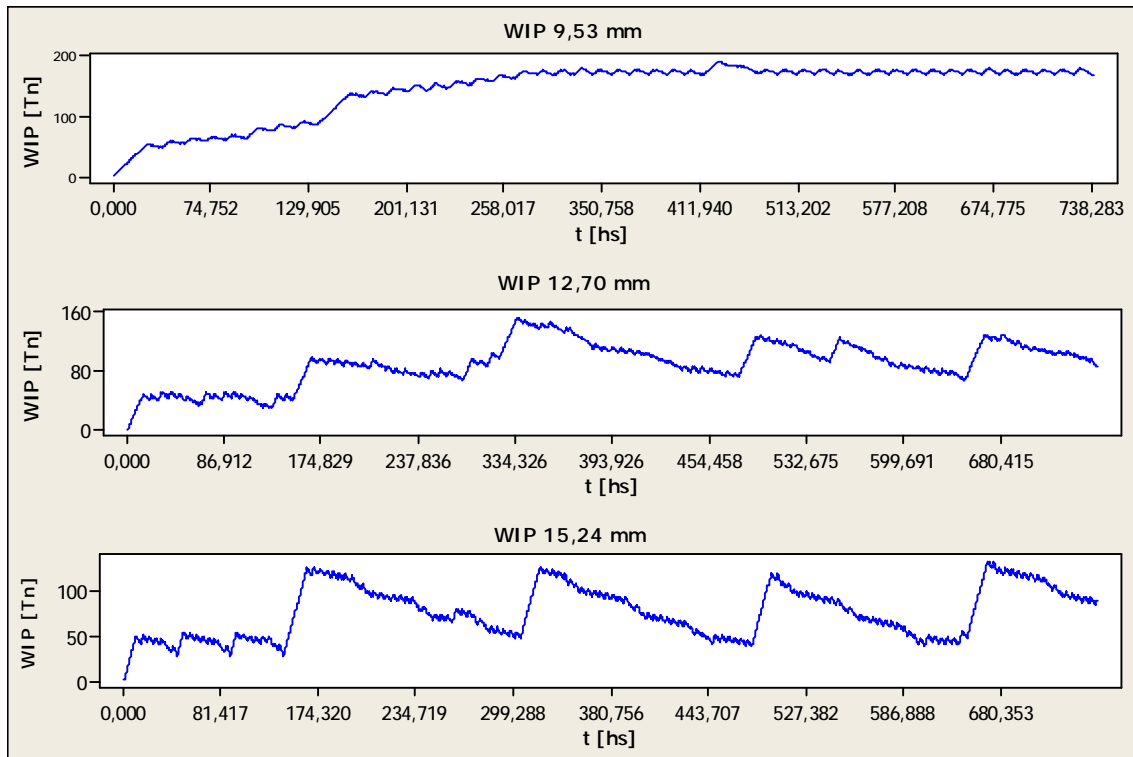


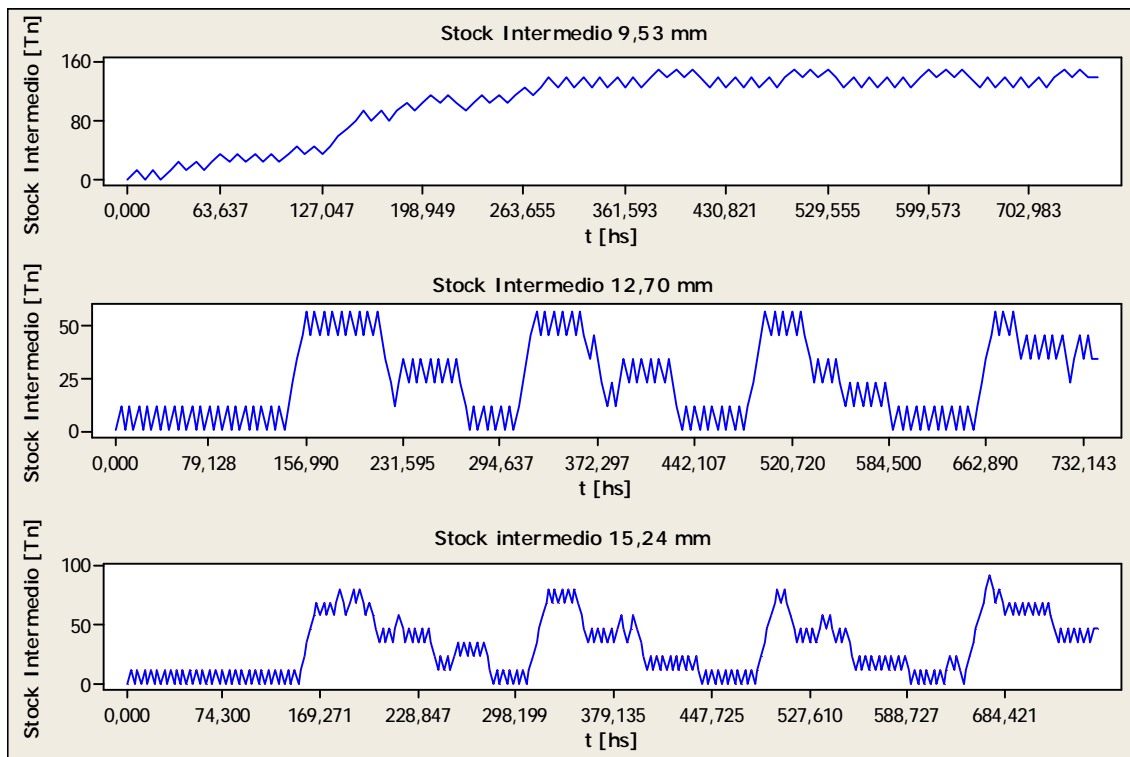
Figura 42 Evolución del WIP

En la Figura 42 vemos que solamente en la medida 9,53 mm se logra conformar un WIP estable, ello se debe a que la capacidad de la trefiladora es bastante mayor a la capacidad de la línea de cordón, por lo cual el WIP crece hasta que se llenan todas las bobinas disponibles. En la siguiente sección se analizará el stock intermedio de material entre la trefilación y la línea de cordón, la componente más importante del WIP.

#### 4.4.4 Stock Intermedio

El volumen de stock intermedio es la porción del WIP en forma de bobinas cargadas que están aguardando a ser utilizadas en la línea de cordón, el stock intermedio equivale a un buffer entre la trefilación y la línea de cordón. Un buffer es eficaz cuando nunca llega a descargarse completamente, lo cual permite que el proceso anterior y posterior al buffer estén desacoplados. La evolución del volumen de stock intermedio que se logra en cada medida se

muestra en la Figura 43.



**Figura 43 Evolución del Stock intermedio entre Trefilación y la línea de Cordón**

En la medida 9,53 mm se observa que gracias al excedente de capacidad de trefilación, el stock intermedio alcanza rápidamente un valor de equilibrio, y nunca vuelve a anularse. Por el contrario, en las medidas 12,70 mm y 15,24 mm se observa que el buffer no se estabiliza en el período de simulación, el mismo es cargado durante los fines de semana, debido a que la línea de cordón trabaja en 3 turnos y trefilación en 4 turnos. Esto permite que el buffer luego sea descargado durante la semana. Sin embargo, en ambas medidas el volumen que se logra acumular durante el fin de semana es insuficiente para abastecer a la línea de cordón, el buffer no es eficaz para estas dos medidas, por lo cual la trefilación y la línea de cordón no están totalmente desacopladas. Por otro lado, ante la falta de control de flujo de producción y exceso de capacidad de trefilación, los niveles de WIP crecen hasta agotar las bobinas vacías. Esta manera de trabajar puede traer algunas desventajas como ser un exceso de WIP innecesario y mayor tiempo de ciclo, se deberá estudiar cuál es el tamaño del stock intermedio mínimo que permita desacoplar los procesos.

#### 4.4.5 Tiempo de ciclo

La primera estimación del tiempo de ciclo se puede hacer a partir de la Ley de Little, que relaciona el WIP, la capacidad y el tiempo de ciclo.

$$WIP = \lambda T$$

De esta manera, se estimarán los valores promedio en régimen del tiempo de ciclo total de la planta, bajo la suposición de que se ha alcanzado un régimen estacionario y el WIP ha crecido hasta agotar la cantidad de bobinas vacías:

Medida	I [Tn/mes]	WIP [Tn]	T [mes]	T [hs]
9,53 mm	515	170	0,33	237,7
12,70 mm	1215	170	0,14	100,7
15,24 mm	1518	170	0,11	80,6

**Tabla 6 Tiempos de Ciclo promedio en régimen estacionario**

Estos valores, representan valores medios en condiciones estacionarias, siempre que se alcance a establecer el WIP. Sin embargo, dada la Ley de Little, el tiempo de ciclo es función del nivel de WIP instantáneamente. Debido a que no siempre se logra mantener un nivel de WIP estable, los tiempos de ciclo varían considerablemente, como se observa en la Figura 44.

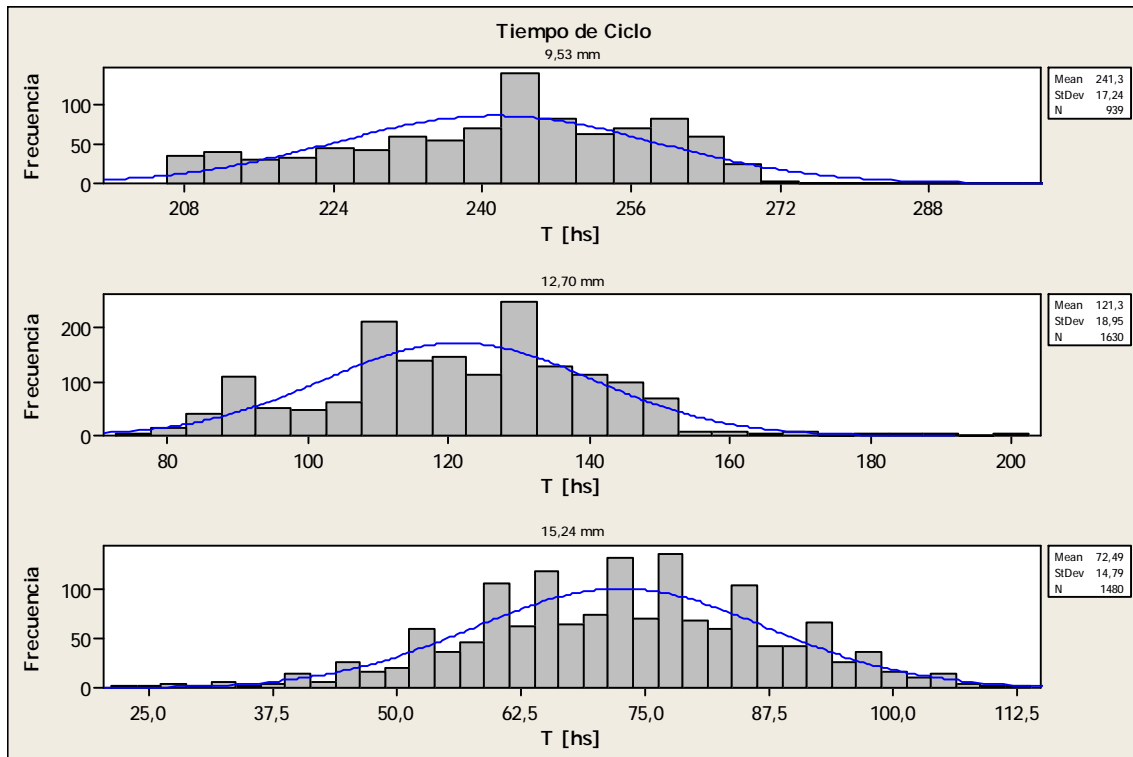


Figura 44 Tiempos de ciclo para cada producto

#### 4.5 Análisis de Sensibilidad de la capacidad de producción

La capacidad de producción es función de todos los parámetros que han sido presentados en el apartado 1.4. Para hallar la influencia de cada parámetro en la capacidad se hará un análisis de sensibilidad

##### 4.5.1 Análisis de Sensibilidad de la capacidad de producción frente a las velocidades de cada máquina

Se hará el estudio de sensibilidad solamente para las máquinas que resultaron con utilizaciones cercanas a 1 en alguno de los 3 productos:

- Trefiladora: cuello de botella en las medidas 12,70 mm y 15,24 mm
- Cableadora: cuello de botella en las medidas 9,53 mm y 12,70 mm

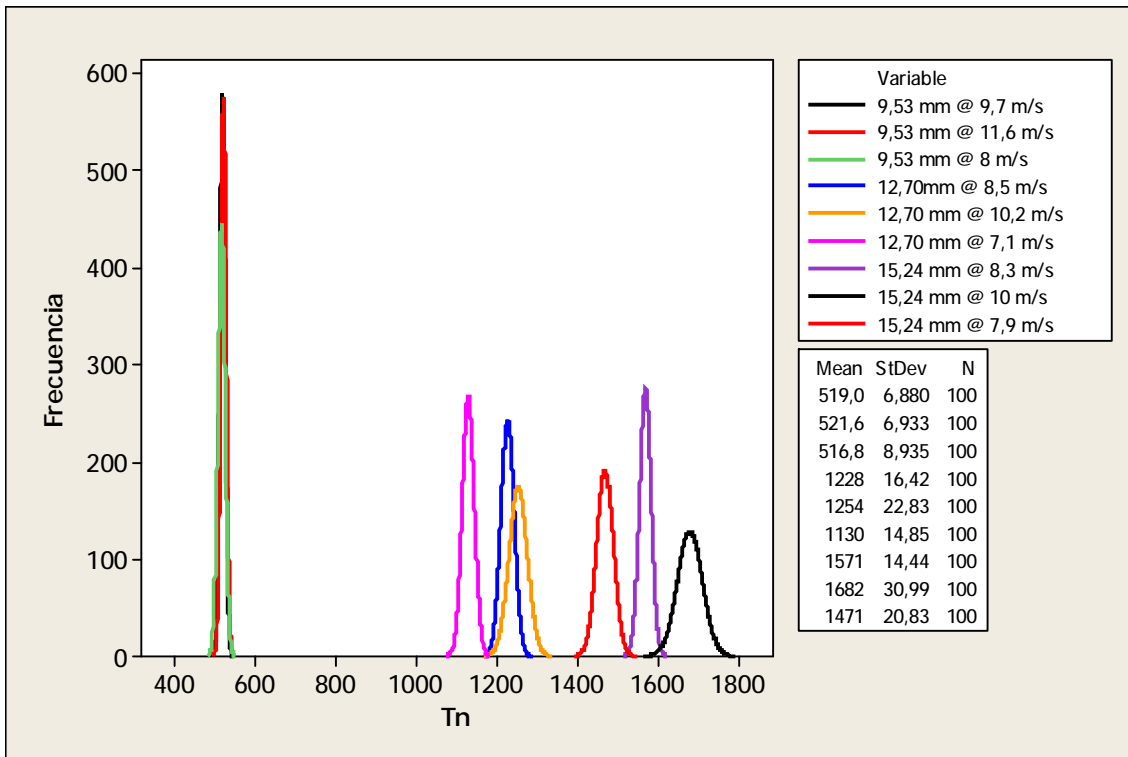


Figura 45 Sensibilidad de la capacidad de producción frente a una variación de +/- 20% en la velocidad de trefilado

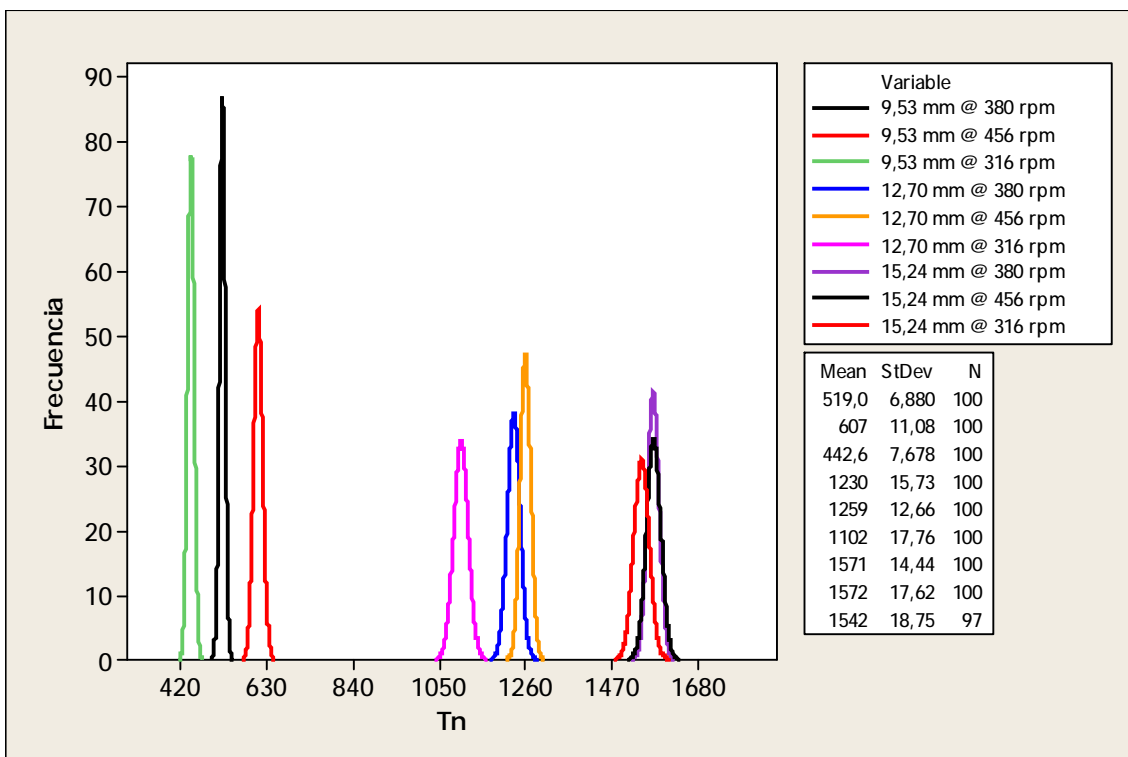


Figura 46 Sensibilidad de la capacidad de producción frente a una variación de +/- 20% en la velocidad de la cableadora

#### 4.5.2 Análisis de sensibilidad de la capacidad de producción frente a los tiempos de set-up de cada máquina

Nuevamente, el análisis será realizado para las máquinas del apartado anterior.

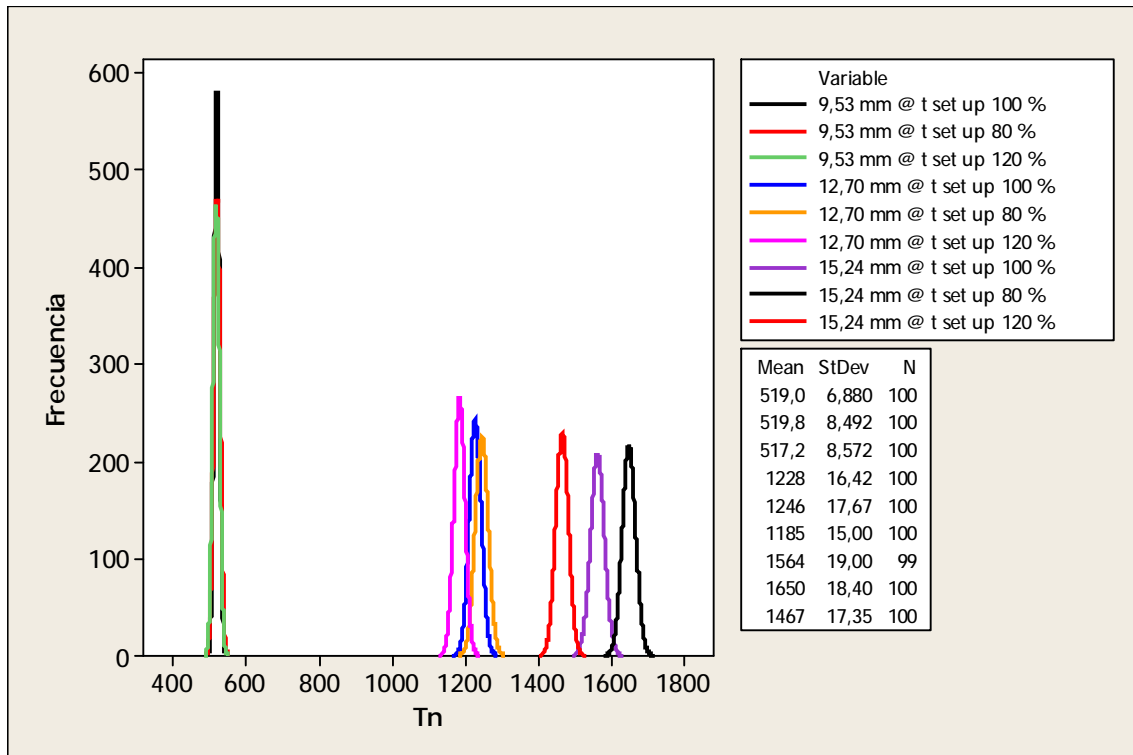
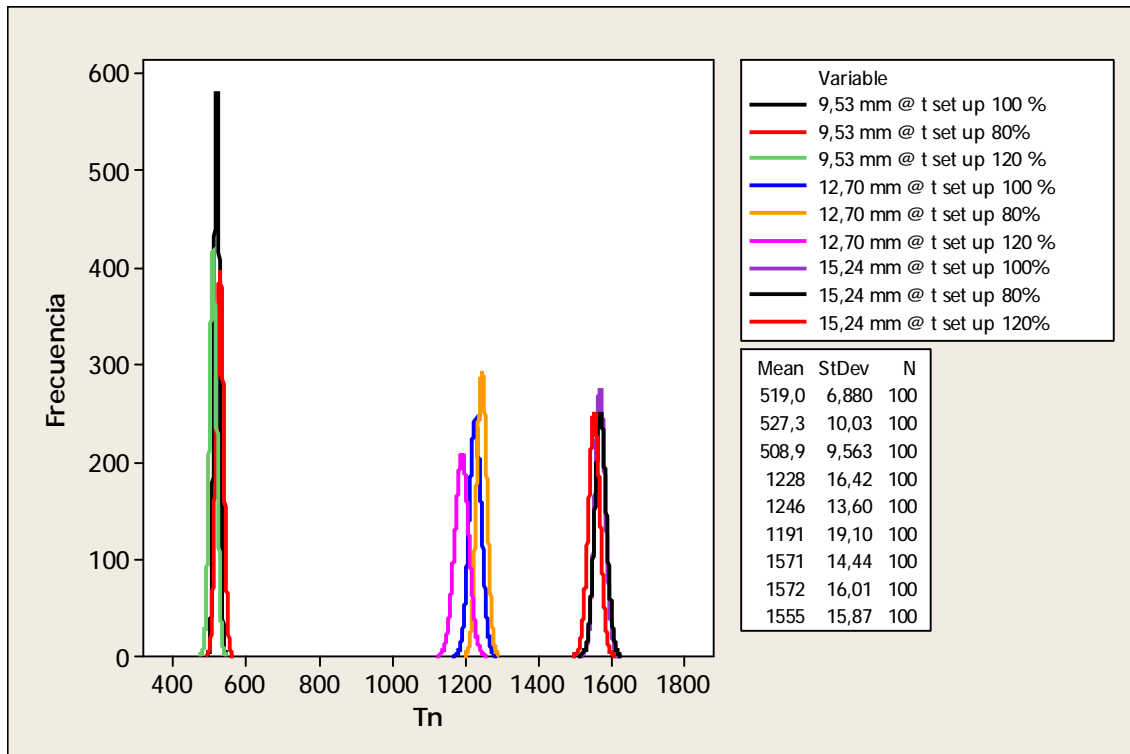


Figura 47 Sensibilidad de la capacidad de producción frente a una variación de +/- 20 % en el tiempo de set-up de la trefiladora



**Figura 48 Sensibilidad de la capacidad de producción frente a una variación de +/- 20% en el tiempo de set-up de la cableadora**

Los gráficos de la Figura 45 a la Figura 48 deben interpretarse según el desplazamiento de las distribuciones obtenidas. Un desplazamiento a la derecha implica un aumento del throughput, la magnitud de este desplazamiento nos dice la sensibilidad del throughput con respecto a dicha variable. Es necesario manipular las variables en ambos sentidos, dado que por lo general, como ya se ha visto en el Capítulo III, las variaciones negativas se transmiten de manera más directa al throughput total. En la sección siguiente se obtendrán los coeficientes de sensibilidad que se obtienen de medir la magnitud en la cual las distribuciones se desplazan frente a una modificación en cada una de las variables.

#### 4.5.3 Resumen de sensibilidades

En base a las simulaciones anteriores establecemos los coeficientes de sensibilidad de la Tabla 7.



+	Velocidad de trefiladora	Velocidad de cableadora	Tiempo de set-up de trefiladora	Tiempo de set-up de cableadora
9,53 mm	0*	0,84	0*	0*
12,70 mm	0,10	0,14	0,09	0,07
15,24 mm	0,35	0*	0,25	0*
-	Velocidad de trefiladora	Velocidad de cableadora	Tiempo de set-up de trefiladora	Tiempo de set-up de cableadora
9,53 mm	0*	-0,78	0*	-0,1
12,70 mm	-0,41	-0,54	-0,18	-0,16
15,24 mm	-0,43	-0,09	-0,29	-0,1

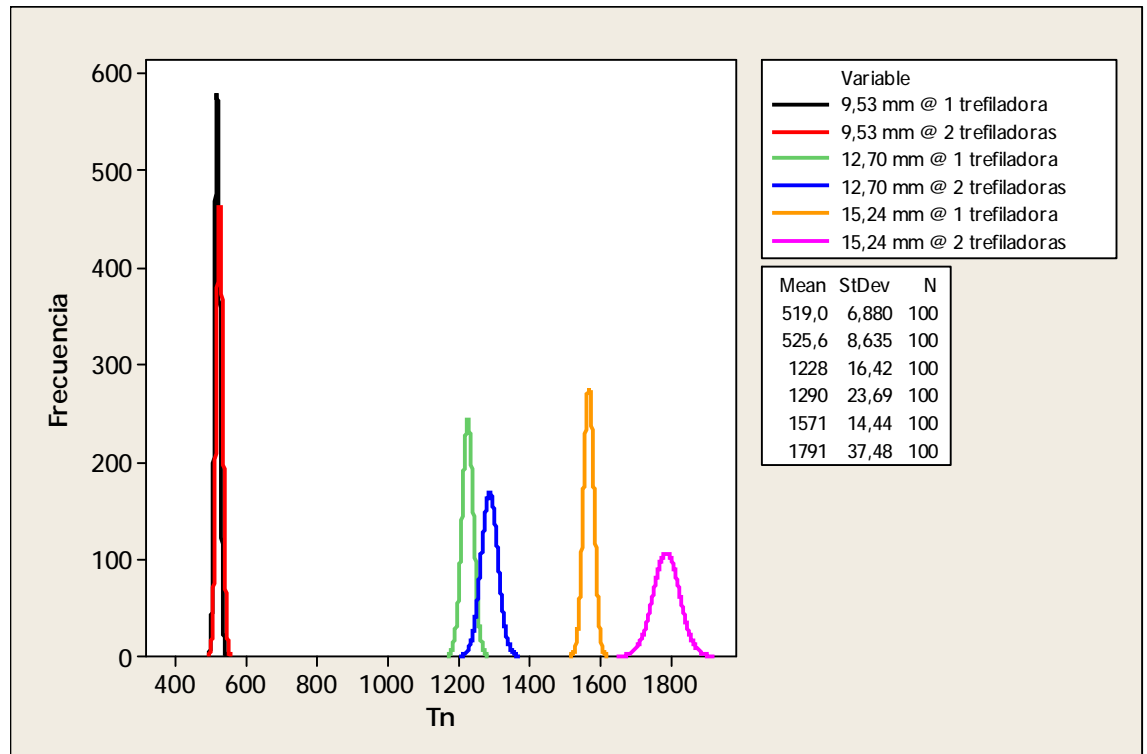
0\*: estadísticamente no se puede aceptar que las distribuciones asociadas sean distintas, con un 95 % de nivel de confianza

**Tabla 7 Sensibilidad de la capacidad de producción frente a modificaciones en las velocidades y tiempos de set up de las máquinas con mayor utilización**

Los resultados de la Tabla 7 muestran que la sensibilidad es distinta para variaciones positivas y negativas, entendiéndose por una variación positiva de algún parámetro como aquella que incrementaría el throughput, y por el contrario una variación negativa como aquella variación que tiende a disminuir el throughput. Los resultados son consistentes con el concepto de la Teoría de las Restricciones que estipula que en una línea de producción fluctuaciones positivas pocas veces se trasladan al throughput mientras que fluctuaciones negativas en general impactan considerablemente. Esto se hace evidente en los productos donde las capacidades están equilibradas, particularmente en la medida 12,70 mm.

#### 4.6 Agregado de una segunda trefiladora

Según lo visto en el apartado anterior, en la medida 15,24 mm la capacidad está restringida únicamente por la trefilación, mientras que la medida 12,70 mm la capacidad está restringida por la trefilación y la cableadora. Dado que existe la posibilidad de agregar una segunda trefiladora, sacrificando otros productos, se estudiará como cambian las capacidades y ubicación de los cuellos de botella en este nuevo escenario.



**Figura 49 Simulación de Montecarlo para la capacidad de producción mensual agregando una segunda trefiladora**

En el caso de agregar una segunda trefiladora, se observan los siguientes cambios:

- En todas las medidas se conforma un nivel de WIP estable de 170 Tn, limitado únicamente por la cantidad de bobinas
- El buffer entre trefilación y cordón es eficaz para todas las medidas, es decir, nunca llega a anularse – por otro lado, cuando se estudien los distintos mecanismos de programación y control de producción se deberá estudiar si el nivel de WIP no es excesivo.
- La cableadora resulta ser un cuello de botella para todas las medidas
- En la medida 15,24 mm existe una doble restricción en la capacidad. Tanto la utilización de la cableadora como la de la línea de tratamiento resultan cercanas al 100%
- La utilización de cada trefiladora resulta del orden del 40% al 70 %.

#### 4.7 Modificación del tamaño del batch

La trefiladora debe producir para cada calibre de cordón 2 tipos de alambre distintos:

- 9,53 mm
  - Torsales: 6 x 3,15 mm
  - Alma: 1 x 3,26 mm
- 12,70 mm
  - Torsales: 6 x 4,23 mm
  - Alma: 1 x 4,35 mm
- 15,24 mm
  - Torsales: 6 x 5,1 mm
  - Alma: 1 x 5,35 mm

Cuando se dispone de una única trefiladora para hacer la producción, se debe elegir el tamaño del batch a producir, es decir, qué cantidad de torsales y de almas producir de manera continua. Por cada cantidad  $X$  de almas trefiladas, se debería a continuación trefilar  $6 X$  bobinas de torsales, para mantener la proporcionalidad. El tamaño del batch en este caso sería  $X$ , es decir, la cantidad de almas a trefilar de manera consecutiva. Dado que para pasar de trefilar almas a trefilar torsales se debe hacer un cambio de trefila, el tiempo muerto que ello lleva hace bajar la eficiencia de la máquina. Con tamaños de batch muy largos es de esperar que se maximice la eficiencia de la trefiladora. Según la Teoría de las Restricciones, siempre que sea posible debería llevarse el tamaño del batch al mínimo posible, de manera de minimizar WIP y Lead Time, sin embargo, en el proceso cuello de botella, el tamaño del lote tiene un impacto directo en el throughput, dado que la eficiencia del cuello de botella se traslada a todo el sistema. En la Figura 50 y la Figura 51 se observa como se modifica el throughput, WIP y Lead Time para distintos tamaños de batch considerando que el tiempo para el cambio de medida es de 2 hs. Se observan diferencias de hasta el 60 % en el throughput.

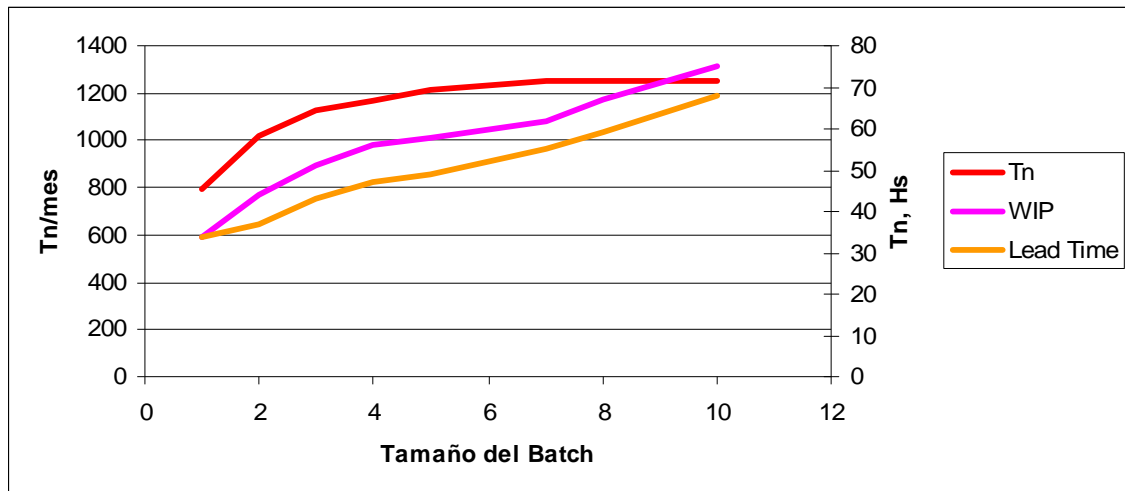


Figura 50 Throughput mensual, WIP y Lead Time en función del tamaño del batch de la trefiladora para la medida 12,70 mm

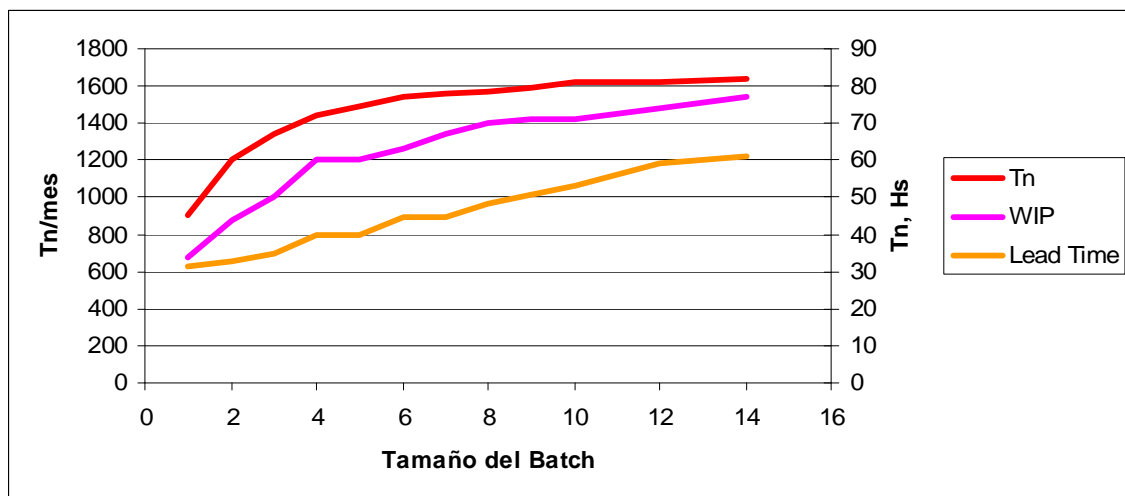


Figura 51 Throughput mensual, WIP y Lead Time en función del tamaño del batch de la trefiladora para la medida 15,24 mm

#### 4.8 Influencia del mix de producción

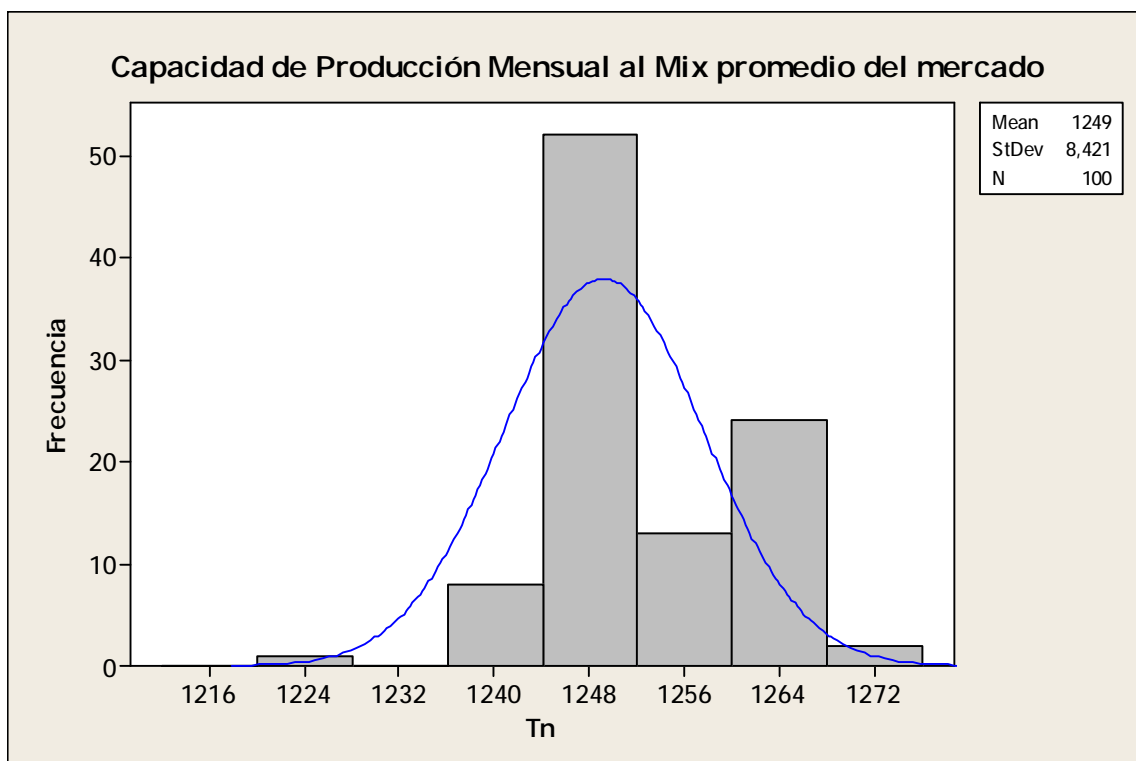
Hasta ahora se ha considerado a la planta trabajando en alguno de los 3 productos. Si se tiene en cuenta el mix de producción, podría concluirse que alguna de las restricciones sea realmente el cuello de botella.

	9,53 mm	12,70 mm	15,24 mm
Demanda	5,0%	61,7%	33,3%
% tiempo de producción	11,9%	61,4%	26,6%
Cuello de botella	Cableadora	Cableadora y Trefiladora	Trefiladora

**Tabla 8 Demanda del mercado y tiempo de producción en la planta**

En la Tabla 8 se observa el mix promedio de la demanda del mercado, y el porcentaje de tiempo que le toma a la planta satisfacer la demanda de cada producto. Además, se puede observar que la mayor parte del tiempo la restricción se encuentra en la trefiladora, aproximadamente el 88 % del tiempo, mientras que la cableadora restringe la producción el 73 % del tiempo aproximadamente. Por ello, todos los esfuerzos de aumento de productividad deberían darse en la trefiladora inicialmente.

Por otro lado, en el paso de un producto a otro se debe incurrir en un tiempo prolongado de set-up de la trefiladora, el cual varía entre 1 y 2 turnos completos. Para este mix de producción mensual, teniendo en cuenta los tiempos necesarios para cambiar de producto, se obtiene una capacidad de producción mensual según el gráfico de la Figura 52.



**Figura 52 Capacidad de producción mensual al mix promedio del mercado**

#### 4.9 Puntos destacados

En base a lo visto en los apartados de este trabajo podemos establecer algunas conclusiones:

- La capacidad de producción es función del comportamiento estadístico de variables con componentes aleatorias, y la misma es a su vez una variable con componentes aleatorias. Las variaciones positivas de estas variables se transmiten en menor medida que las variaciones negativas, como se ve en la Tabla 7. Además, según la Figura 41 parece confirmarse que en la medida que más recursos se encuentran cerca del 100% de nivel de actividad (C. Roser, 2001), mayor dispersión existe en las distribuciones de probabilidad asociadas a la capacidad de producción. Se ve que en la medida 12,70 mm donde existen 2 posibles cuellos de botella, la dispersión de la distribución es casi el doble que en el resto de las medidas, donde existe un único cuello de botella. También se puede confirmar en la Figura 49, donde luego de agregar capacidad de trefilación en la medida 15,24 mm aparecieron dos nuevos posibles cuellos de botellas, duplicándose el desvío estándar de la distribución. Estos conceptos son consistentes con los postulados de la Teoría de las Restricciones, e indican que en una línea balanceada donde todos los recursos trabajan cerca de su máximo nivel de actividad el flujo es más impredecible.
- De la determinación de los cuellos de botella se puede concluir que
  - No existe ninguna medida que aisladamente incremente considerablemente la capacidad de producción de los 3 productos simultáneamente
  - No existe ninguna medida que aisladamente incremente sensiblemente la capacidad de producción de la medida 12,70 mm – el flujo de producción está limitado por dos recursos de similar capacidad.
- Del análisis de sensibilidades se concluye que

- de poder incrementar la velocidad de la cableadora en un 20 %, las ganancias esperadas sería prácticamente un aumento de capacidad de producción en la medida 9,53 mm del 16 %. Para poder capitalizar la inversión en las otras medidas resultaría fundamental primero agregar capacidad de trefilación.
- Para incrementar la capacidad de trefilación se puede aumentar la velocidad de trefilación, disminuir el tiempo de set-up y aumentar el tamaño del batch. De la diferencia entre los coeficientes de sensibilidad se observa que el aumento de velocidad es considerablemente más efectivo que las otras medidas. Por otro lado, el tamaño del batch debería estandarizarse para las medidas 12,70 mm y 15,24 mm en por lo menos 6 y 8 respectivamente si se requiere maximizar el throughput.
- Se puede pensar en agregar una segunda trefiladora cuando se necesite, esto tendría los siguientes efectos:
  - § aumentaría un 14% la capacidad en la medida 15,24 mm, y un 5 % la capacidad de producción en la medida 12,70 mm.
  - § Removería el cuello de botella en trefilación en las medidas 12,70 mm y 15,24 mm.
  - § En este nuevo escenario la capacidad medida 12,70 mm sigue siendo restringida por la cableadora, mientras que en la medida 15,24 mm tanto la cableadora como la línea de tratamiento trabajarían cerca del 100% de utilización, restringiendo ambas la capacidad de producción y por ende teniendo mayor dispersión en el throughput.
- Del análisis del tamaño de batch se concluye que tamaños pequeños de batch pueden reducir hasta en un 60 % el throughput de la línea, siendo óptimo mantener tamaños de batch de entre 6 y 8 para las medidas 12,70 mm y 15,24 mm.
- Teniendo en cuenta el mix de producción, determinado por la demanda del mercado, la mayor parte del tiempo la limitación está

en la trefiladora y en ella debería ser donde principalmente se concentren los esfuerzos por aumentar capacidad.

- Finalmente, considerando el mix de producción medio que se necesita para abastecer la demanda, la capacidad de producción mensual actual (considerando un mes de 30 días y 4 días domingo) es de 1249 +/- 16 Tn.



## CAPÍTULO V: PERFORMANCE ACTUAL DE LA PLANTA

En este capítulo se comparará la performance actual de la planta con la performance simulada con el objetivo de

- Validar el modelo de la planta
- Medir la performance actual y evaluar el gap existente
- Estimar los posibles ahorros que se darían en caso de aumentar el throughput de la planta

### 5.1 Throughput

En la Figura 53 se observan los valores de producción diaria obtenidos para cada medida. Los datos recolectados muestran que la performance es menor a la performance que teóricamente es posible conseguir, la comparación se observa en la Tabla 9.

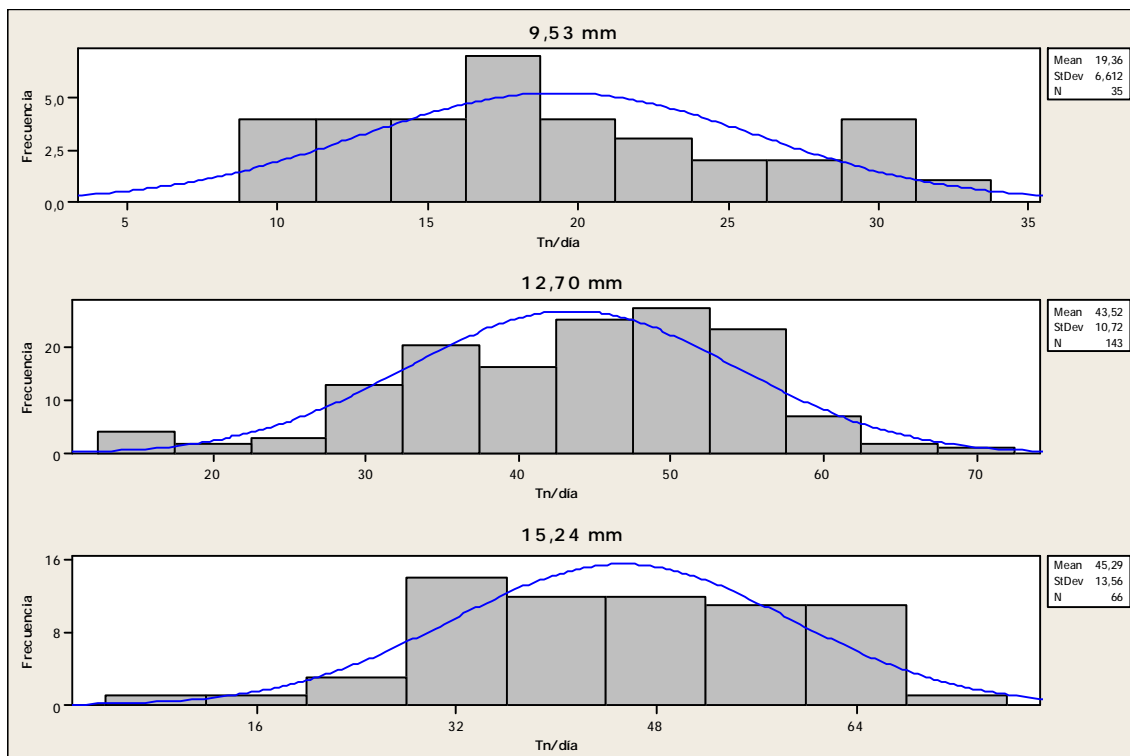


Figura 53 Producción diaria de Cordón Pretensado para las 3 medidas

	9,53 mm		12,70 mm		15,24 mm	
	Actual	Teórico	Actual	Teórico	Actual	Teórico
<b>Media [Tn]</b>	19,36	20,4	42,16	48,6	45,57	60,6
<b>Desvío [Tn]</b>	6,6	3,4	11,76	7	12,7	4

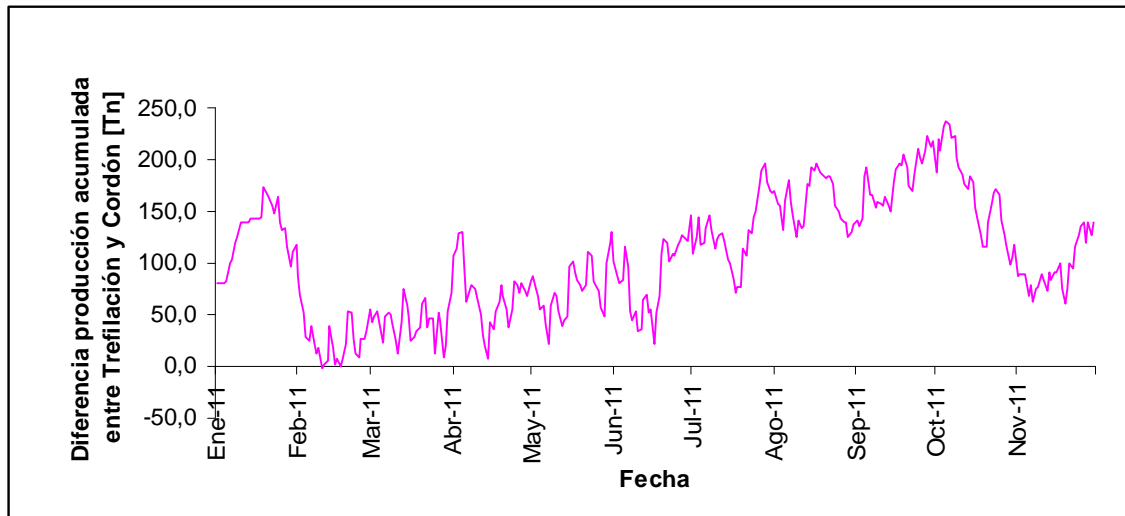
**Tabla 9 Comparación de los valores históricos y los valores estimados de throughput diario**

Los resultados sugieren que existe algún fenómeno que no ha sido incluido en el modelo, dado que los valores teóricos son un 15 % mayores en la medida 12,7 mm y 35% en la medida 15m24 mm. La identificación de las causas que producen la diferencia podría llevar a realizar una mejora en la planta que aumente el throughput un 15 % para la medida 12,70 mm y un 35 % para la medida 15,24 mm, ya que es probable que las diferencias se deban a algún problema oculto en la operación.

Los resultados coinciden bastante bien en la medida 9,53 mm aunque en la realidad se observan mayores fluctuaciones que en la simulación. Se observa que en las medidas en que la trefiladora restringe el throughput las diferencias son mayores, por lo que posiblemente existan fenómenos relacionados con la trefilación que estén disminuyendo la performance y no fueron detectados aún. Dado que la trefilación es la principal restricción del sistema se estudiará en detalle su operación.

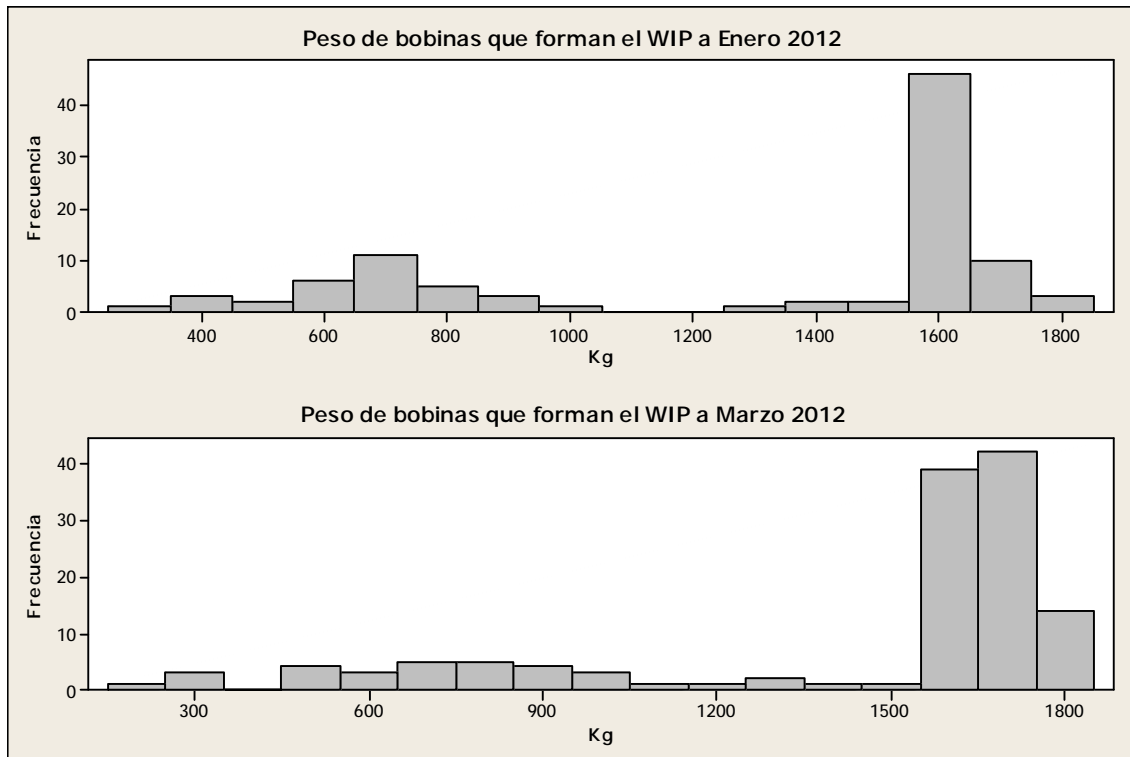
## 5.2 WIP

Se analizará el historial de producción de todo el año de trefilación y de la línea de cordón. De la diferencia de ambas producciones se puede estimar la evolución del WIP, en forma de bobinas con alambre trefiladas listas para cargar en la línea de cordón.



**Figura 54 Diferencia de producción diaria acumulada entre trefilación y línea de cordón, una vez descontada la merma de la línea de cordón Enero 2011 a Enero 2012**

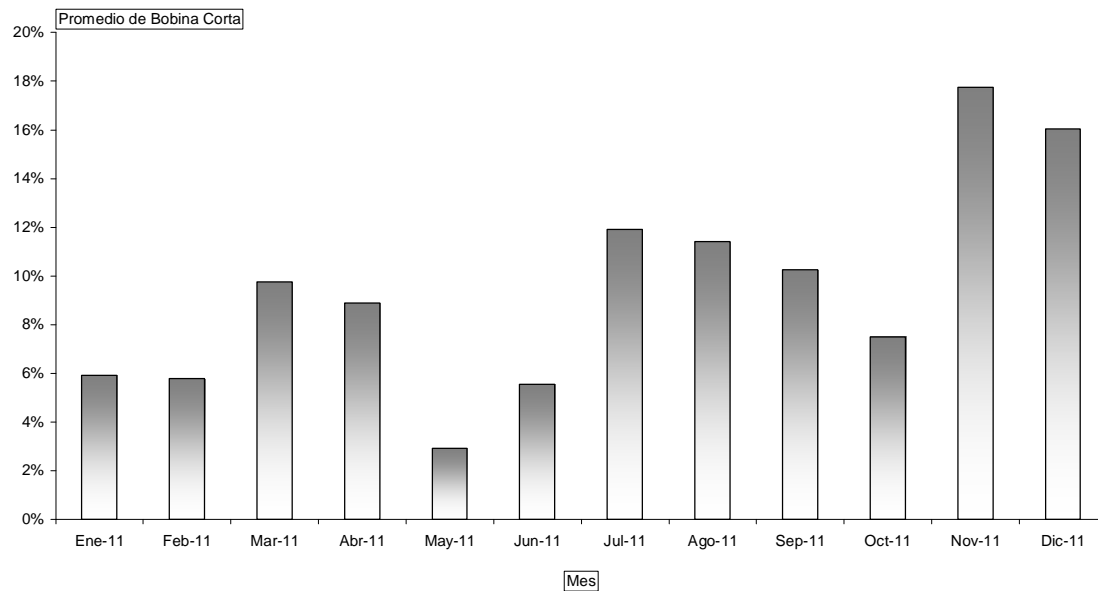
En la Figura 54 se muestra la evolución del WIP calculado. El alto WIP a comienzo del año es debido a que durante los meses de Enero se realiza un paro anual por mantenimiento, y en general los últimos días del año la trefiladora se destina a acumular WIP para el arranque posterior de la planta. Se observa que en general la trefiladora logra acumular WIP sobretodo a partir de mitad de año, lo cual es contrario a la idea de que la trefilación restringe el throughput de la planta, se estudiará en detalle la razón de tal diferencia.



**Figura 55** Peso de las bobinas en stock en los meses de Enero y Marzo de 2012

En la Figura 55, se observa el peso de cada bobina que compone el WIP en dos instantes distintos, Enero de 2012 y a Marzo del 2012. El peso estándar de cada bobina es entre 1600 kg y 1800 kg, según el material del que se trate. Las bobinas de menos de 1600 kg son debidas a cortes en el material por problemas del proceso o de calidad de la materia prima. Se ve que una proporción importante de las bobinas son más cortas que el estándar, aproximadamente un 40 % de las mismas están por debajo de lo requerido en el mes de Enero y 27 % en el mes de Marzo, siendo la cantidad de 36 y 38 bobinas cortas en cada mes. Las bobinas salen cortas cuando se producen cortes del alambre en los últimos pasos de la trefilación. La práctica común es dejar las bobinas cortas a un lado, hasta que se logre juntar una carga completa de las mismas. Sin embargo, por alguna razón se han ido acumulando en el WIP. La generación de bobinas cortas mes a mes puede observarse en la Figura 56, y fue obtenida de la declaración de producción almacenada en el sistema.

PROPORCIÓN DE BOBINAS CORTAS (&lt; 1600 kg) SOBRE EL TOTAL DE BOBINAS TREFILADAS



**Figura 56 Generación de bobinas cortas en la trefiladora Frigerio 8 medida como porcentaje de bobinas que pesan menos que 1600 kg**

Del gráfico puede observarse que se generan entre un 10 % y un 20 % de bobinas cortas, siendo mayor el porcentaje a partir del mes de noviembre, lo que evidencia que existen problemas no tratados en la trefilación, ya que valores aceptables se considerarían menores al 5 %. Los cortes de material, causantes de las bobinas cortas, generan los siguientes efectos:

- Pérdida de tiempo en la trefilación: cada corte obliga a detener el proceso y hacer una soldadura, requiriendo de aproximadamente 45 minutos de máquina detenida para tal operación.
- Merma de material en la línea de cordón: la cableadora procesa 7 bobinas a la vez, cuando las bobinas tienen el largo estándar casi no se desperdicia material. Por el contrario, cuando las bobinas tienen distinto largo, la bobina más corta es la que determina el largo total del cordón, por lo cual el alambre que queda en las bobinas restantes debe ser descartado como chatarra significando una pérdida del 80% de su valor de adquisición. Para minimizar la merma el supervisor de la línea continuamente agrupa las bobinas cortas según su peso, de manera de procesar bobinas de largo similar, reduciendo el descarte. La otra cara

de esta medida es que las bobinas que salen cortas son bloqueadas durante largos períodos, hasta que se logra obtener un lote entero de bobinas cortas de peso similar. Ello podría explicar la acumulación de bobinas cortas, los altos niveles de WIP que se dieron a lo largo del año y parte de la baja performance de la planta.

- Necesidad de un reproceso para descartar el material: las bobinas que quedan parcialmente cargadas con alambre, consecuencia de haber acompañado a una más bobina corta, requieren de un proceso posterior para retirarles la carga residual.
- Disminución del throughput de la línea de cordón: dado que las bobinas son más cortas, el tiempo de procesamiento disminuye en relación al tiempo de set-up de la máquina, por lo cual la máquina se vuelve más improductiva. Además, el throughput útil de la trefiladora, es decir la producción de bobinas de largo estándar, es menor al throughput observado mediante la declaración de producción, dado que entre el 10 % y el 20 % de la producción está compuesta por bobinas cortas, las cuales deben ser demoradas hasta que se logren acumular bobinas similares.

Con el objetivo de cuantificar el impacto de los cortes de material en la productividad de la planta, se recurrió nuevamente a la simulación mediante el programa EXTEND®. En la Figura 57 se observa un nuevo modelo de la planta donde se ha agregado la clasificación de las bobinas según su peso. Se han establecido 5 categorías distintas, de manera de simular el proceso que lleva a cabo el supervisor de la línea para reducir el descarte, que consiste en agrupar las bobinas de largo similar hasta conformar un lote entero para cargar en la línea de cordón. Además fue necesario agregar dispersión en el volumen de cada bobina para simular los cortes de material.

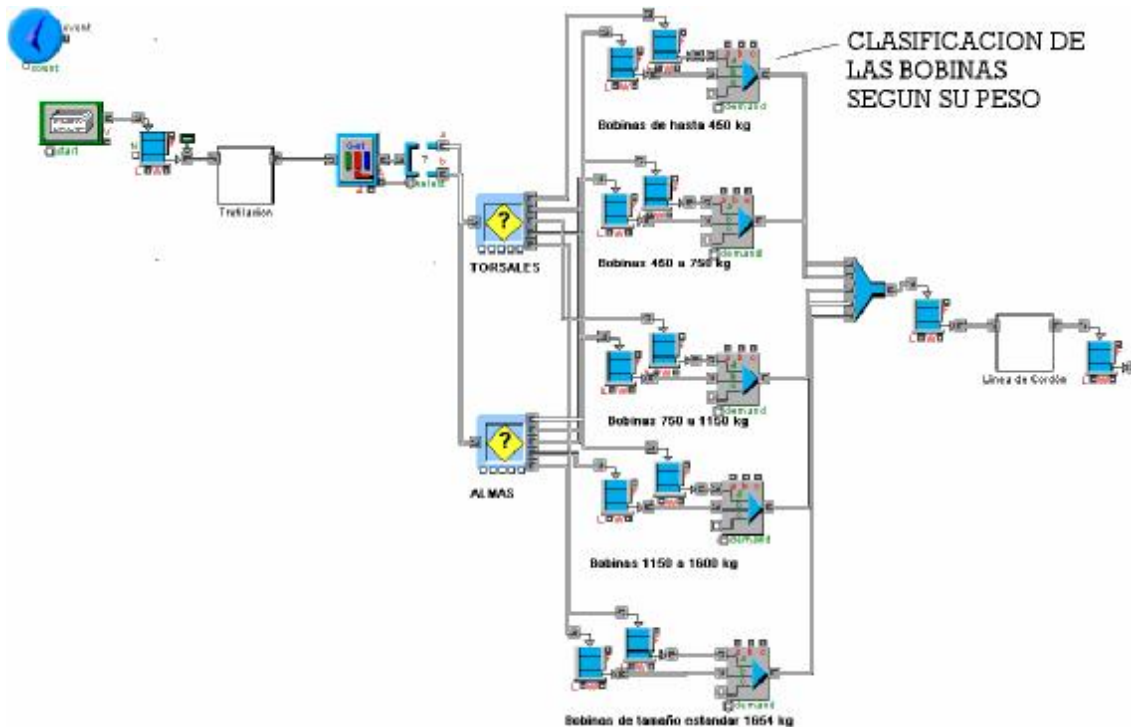


Figura 57 Construcción de un nuevo modelo agregando la posibilidad de que ocurran cortes en el material y la posterior función de clasificación de las bobinas según el volumen

A lo largo de la simulación con una probabilidad  $p$  se darán cortes en la trefiladora, lo cual ocasionará detener el proceso, evacuar una bobina corta, realizar una soldadura y recomenzar el proceso, operación que demorará 45 minutos.

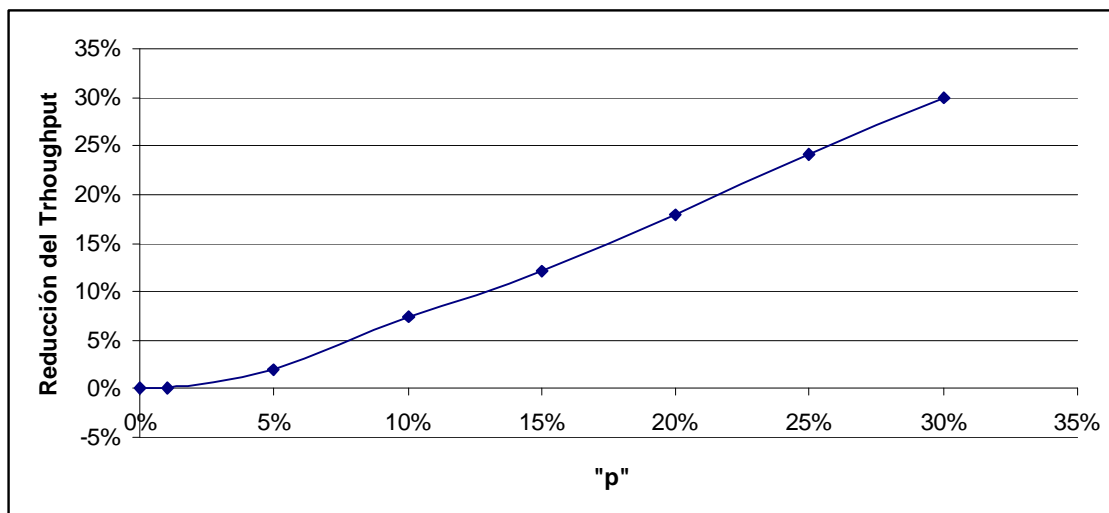


Figura 58 Disminución del Throughput para distintos valores de  $p$  según la simulación en EXTEND®

Se realizaron varias simulaciones modificando la proporción de bobinas cortas frente al total de bobinas, es decir asignando distintos valores a  $p$ . Este parámetro puede interpretarse de manera equivalente como la tasa de cortes que se dan en la trefiladora. En la Figura 58 se observa cómo disminuye el throughput para distintos valores de dicho parámetro según los resultados de la simulación. Como se evidencia la Figura 56, actualmente la tasa de generación de cortes es cercana al 18 %, lo cual según los resultados de la Figura 58 equivale a una reducción del throughput cercana al 15 %. Esta reducción es considerable, y explica en gran medida la baja performance que se evidencia en la Tabla 9.

### 5.3 Gastos de Operación

Los costos de la operación incluyen la mano de obra, las horas extra, el costo de la energía y el costo de acarreo de inventarios. La operación de la línea de cordón actualmente se realiza con un equipo de 3 operarios, en 3 turnos de producción. La cantidad de operarios por turno no será discutida, debido a la naturaleza de las operaciones la cantidad de operarios es la adecuada, y cualquier intento de disminuirla conduciría a problemas de operación y reclamos gremiales. Sin embargo, a lo largo del año se ha observado la necesidad de incurrir en horas extra los días de franco para cumplir los programas de producción. La necesidad de trabajar los días de franco es básicamente por no alcanzar la producción en horas normales, estudiando los volúmenes de producción logrados podemos determinar si con una operación óptima se podrían haber ahorrado las horas extra y cuál habría sido el ahorro como % del costo de la mano de obra de la línea. La línea de trefilación trabaja en 4 turnos, por lo que las horas extra incurridas son exclusivamente debido a ausencias del personal y no entran en nuestro análisis.

En la Tabla 10 se muestran los históricos de horas extra trabajadas. De un total de 50 días de franco se trabajaron 25. Dado que el costo de la mano de obra un día franco equivale a 4 veces el costo de la mano de obra un día normal, el sobre costo que se pagó durante el año es equivalente a 100 días de



producción, es decir, un 30 % de sobre-costo de mano de obra en la línea de durante el 2011.

	<i>Turnos Disponibles</i>	<i>Turnos Franco Trabajados</i>	<i>Turnos Feriados Trabajados</i>	<i>Programa</i>
<i>Ene-11</i>	37	0	0	416
<i>Feb-11</i>	68	3	0	945
<i>Mar-11</i>	68	6	3	1010,6
<i>Abr-11</i>	68	6	3	1108,2
<i>May-11</i>	71	0	0	1079
<i>Jun-11</i>	71	3	0	1140
<i>Jul-11</i>	71	9	0	997,2
<i>Ago-11</i>	77	12	0	1252,4
<i>Sep-11</i>	71	9	0	1290,9
<i>Oct-11</i>	70	12	0	1278,6
<i>Nov-11</i>	71	7	0	1208

**Tabla 10 Utilización de horas extra para cumplir programas de producción**

Según la Tabla 10 en varias oportunidades fue necesario hacer horas extras para cumplir los programas. Tiene sentido plantearse según los históricos de producción, y las distribuciones de probabilidad de la Figura 53, cuál es la probabilidad de cumplir los programas sin hacer uso de horas extra, y hacer la comparación con la planta modelada. En la Figura 59 se muestra la representación gráfica del cálculo de probabilidad de cumplir una determinada meta de producción. Según realicemos el cálculo con la distribución de probabilidades real, basada en los históricos de producción, o simulada utilizando los resultados del Capítulo IV, obtendremos la probabilidad de cumplimiento de la planta Real y Modelada respectivamente. Para el cálculo, las distribuciones de probabilidad se construyen en base a los días hábiles del mes y sin utilizar horas extra. Una mayor probabilidad de cumplimiento implica una menor probabilidad de utilización de horas extra, por lo tanto una probable mejora en los costos.

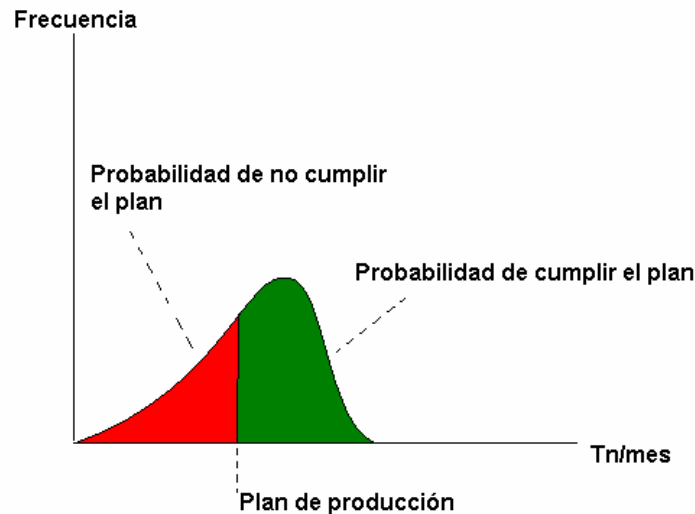


Figura 59 Representación del cálculo de probabilidad de cumplimiento del plan de producción

	Turnos Disponibles	Programa	Probabilidad Cumplir Plan	
			Planta Modelada	Planta Real
<b>Ene-11</b>	37	416	99%	80%
<b>Feb-11</b>	68	945	91%	47%
<b>Mar-11</b>	68	1011	81%	39%
<b>Abr-11</b>	68	1108	46%	21%
<b>May-11</b>	71	1079	93%	46%
<b>Jun-11</b>	71	1140	90%	39%
<b>Jul-11</b>	71	997	80%	41%
<b>Ago-11</b>	77	1252	41%	15%
<b>Sep-11</b>	71	1291	58%	20%
<b>Oct-11</b>	70	1279	13%	10%
<b>Nov-11</b>	71	1208	78%	29%

Tabla 11 Probabilidad de cumplir pedidos sin utilizar horas extra

Para cuantificar las posibles reducciones de costos debido a la menor utilización de horas extra, se pueden plantear distintos incrementos de throughput con respecto al valor real que se obtuvo en la Figura 53, estimar la probabilidad de cumplir los planes si usar horas extra y el valor promedio de horas extra a utilizar, para luego calcular el valor medio del costo de producción en horas extra. En la Figura 60 se observa la reducción en los costos de mano de obra por un aumento del throughput de la planta calculado de la manera explicada. El Costo de Mano de Obra es respecto a toda la planta, formada por los sectores de Trefilación y Cordon, por lo cual el impacto total de las horas

extra es algo menor al 30 % que habíamos mencionado anteriormente. Igualmente, el costo extra de mano de obra por horas extra es cercano al 23 %, y es una gran oportunidad de mejora.

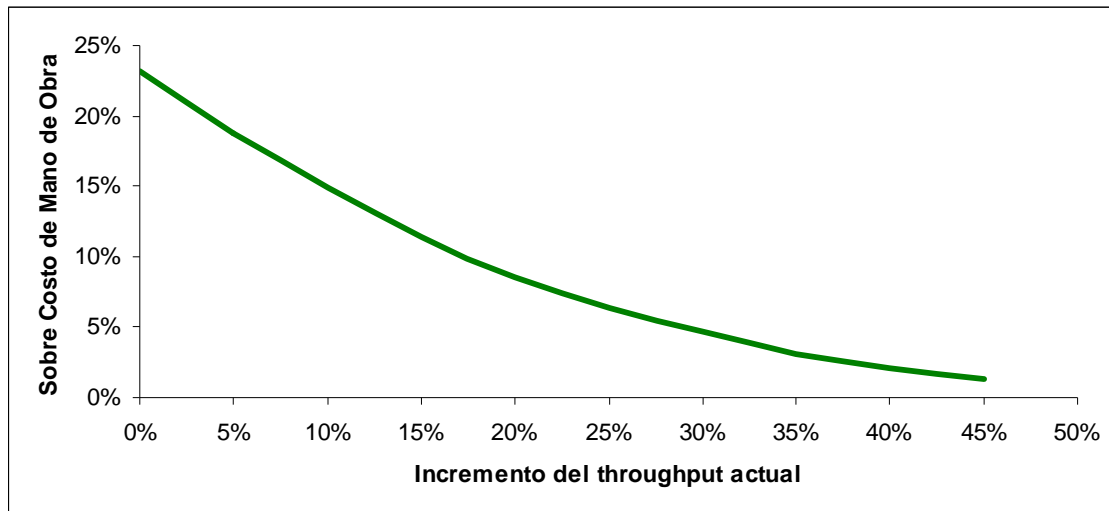


Figura 60 Calculo del sobre costo por necesidad de incurrir en hs extra para distintos incrementos del throughput por encima del valor actual

		Incremento throughput						
		0,0%	5,0%	10,0%	15,0%	20,0%	25,0%	30,0%
Costo Transformación	Materia Prima	64,5%	64,5%	64,5%	64,5%	64,5%	64,5%	64,5%
	Costo Mano de Obra	11,7%	11,3%	11,0%	10,6%	10,4%	10,1%	10,0%
	Costo Energía	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%
	Costo Mantenimiento	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%
	Costo Staff	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%
	Otros	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%
MARGEN		10,0%	10,4%	10,8%	11,1%	11,4%	11,6%	11,8%
PRECIO DE VENTA		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabla 12 Resumen de potencial aumento del margen

La Tabla 12 muestra el aumento de margen que se espera obtener, a partir de los ahorros que se muestran en la Figura 60, si se corrigen las causas que deterioran la performance de la planta para aumentar el throughput.

En el caso de eliminar el problema de cortes de material obtendríamos un aumento de throughput medio del 15%, que según la Figura 60 nos permitiría obtener un costo extra de horas extra 11 %, frente a un sobre costo actual de horas extra del 23 %. Este ahorro implica una reducción del costo total de de

aproximadamente un 1,1%. Ese ahorro del 1,1 %, frente a un margen actual del 10 % representaría un aumento del margen del 11 % antes de impuestos.

#### 5.4 Cumplimiento de programas

Aún utilizando los días franco para compensar atrasos en la producción, se dieron situaciones donde no se pudo alcanzar el programa de producción.

	<i>Programa</i>	<i>Logrado</i>
<i>Ene-11</i>	360	416
<i>Feb-11</i>	915	945
<i>Mar-11</i>	<b>1030</b>	<b>1010,6</b>
<i>Abr-11</i>	1105	1108,2
<i>May-11</i>	<b>1172</b>	<b>1079</b>
<i>Jun-11</i>	1105	1140
<i>Jul-11</i>	<b>1150</b>	<b>997,2</b>
<i>Ago-11</i>	1250	1252,4
<i>Sep-11</i>	1260	1290,9
<i>Oct-11</i>	1240	1278,6
<i>Nov-11</i>	1200	1208

**Tabla 13 Cumplimiento de programas**

El mes de Julio es una excepción, dado que el horno de tratamiento tuvo problemas que precisaron la intervención de un técnico especializado del fabricante del equipo, es un equipo moderno y confiable, no es de esperar que situaciones así se den de manera recurrente. En promedio el cumplimiento de los programas fue de un 97,75 %, es un valor aceptable, pero se debe destacar que fue logrado incurriendo en costos de horas extra inaceptables. Se aclara que los meses donde la producción fue mayor al plan fue debido a que se adelantó producción del mes siguiente en consenso con las áreas de Planificación y Programación de la Producción.

#### 5.6 Puntos destacados

A lo largo de este capítulo se ha comparado la performance actual con la simulada, concluyendo:

- El throughput de la planta es menor del esperado para las medidas 12,70 mm y 15,24 mm, en un 15 % y 35 % aproximadamente, lo cual indica que con el mix promedio de producción el throughput real es un

20 % menor al esperado, o de manera equivalente, el throughput podría ser aumentado un 25 % si se descubren y atacan las causas que provocan la baja performance la planta.

- En todos los casos el throughput presenta más variabilidad de la simulada, seguramente por la existencia de efectos no contemplados en la simulación original, entre ellos la alta tasa de corte de material.
- La menor performance de la planta está en gran parte explicada por la alta tasa de cortes. La tasa de cortes actual implica una reducción del 15 % del throughput de la planta, es la causa principal de la baja performance. Eliminando solamente este problema aumentaríamos un 11 % el margen antes de impuestos.
- La trefiladora en algunas ocasiones ha producido bobinas de más de medidas que no se necesitaban, acumulando stock innecesario, disminuyendo el throughput del sistema dado que la misma es el cuello de botella. Los tamaños de lote de producción deberían optimizarse según los resultados obtenidos en el Capítulo IV. La utilización de tamaños de lote de producción pequeños en la trefilación pueden reducir el throughput sensiblemente, y por ello aumentar los costos en utilización de horas extra,
- Se ha recurrido a la producción en días de franco para cumplir los programas, ocasionando un sobre costo del 23 % en mano de obra. Incluso en ocasiones el programa no ha podido cumplirse. Hemos visto que aumentos del throughput de la planta se traducen en una disminución del costo extra por horas extra según la Figura 60 y por ello aumento del margen antes de impuestos según la Tabla 12, dando un potencial de 16 % de aumento de margen.

## CAPÍTULO VI: PROCESO DE MEJORA CONTINUA

En este capítulo se planteará el proceso de mejora continua establecido por E. M. Goldratt y J. Cox (1986) dentro del marco de la teoría de las restricciones. Los 5 pasos del proceso propuestos fueron adelantados en un capítulo anterior, básicamente se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Identificar la(s) restricción(es) del sistema
2. Decidir como explotar la(s) limitación(es) del sistema
3. Subordinar todos los procesos a la restricción del sistema
4. Elevar la(s) restricción(es) del sistema
5. Verificar si como resultado de este procedimiento la restricción ha sido superada, si es así volver al punto 1, pero no permitir que la inercia se convierta en la limitación del sistema

### 6.1 PASO 1: Identificar las restricciones del sistema

A grandes rasgos se podrían tener 3 posibles restricciones en el sistema: el mercado, la fábrica, la provisión de materia prima.

Dado que actualmente se está incurriendo en costos extras de operación para satisfacer la demanda del mercado, la restricción en el corto plazo no parece estar en el mercado. La restricción podría estar en la provisión de materia prima, en este caso la provisión de alambrón de alto carbono en los diámetros, volúmenes y calidad necesaria, o bien podría estar en la planta de cordón pretensado. La revisión de alguno de los supuestos planteados en el Capítulo IV puede aclarar algo el panorama. El principal supuesto del que se partió para realizar el modelo de la planta fue infinita disponibilidad de materia prima libre de problemas de calidad. El no contar con materia prima suficiente evidentemente disminuiría el throughput del sistema, por otro lado, el no contar con la calidad adecuada de material podría conducir a cortes de material tanto en trefilación como en la línea de cordón, dando lugar a interrupciones y por ello disminución del throughput. Además, si los problemas de calidad se detectan luego de la trefilación se debería proceder a descartar material, desclasándolo a chatarra, perdiendo dinero por ello. Finalmente, la restricción

podría estar en el proceso de fabricación, en cuyo caso se sabe por lo estudiado en el Capítulo V que la trefilación es el posible cuello de botella, y el primer lugar donde se debería hacer foco. Según la teoría de las restricciones, debería impedirse a toda costa que el material no apto llegue al cuello de botella (E. M. Goldratt, J. Cox, 1986).

Utilizando los resultados del Capítulo V, se sabe que actualmente existe una performance baja de la planta, pero que igualmente, aún en la planta simulada, los meses de alta demanda existe una alta probabilidad de que el programa de producción no pueda ser cumplido sin utilizar horas extra de producción.

Además, los valores de utilización de las instalaciones en varios casos llegaron a ser cercanos al 100%, por ello sabemos que la planta en parte restringe el throughput, queda investigar si la provisión de materia prima también restringe el throughput y en qué medida.

### **6.1.1 Problemas relevados en la trefiladora**

Mediante entrevistas con los responsables de la planta y el personal involucrado se ha podido relevar la siguiente información:

1. Material de menor calidad: muchas veces la baja calidad no afecta la producción ni la calidad del producto final. Otras veces, la calidad resulta en problemas durante el proceso productivo, provocando cortes del material y por ende disminución del throughput de las líneas. En otras oportunidades, el material con baja calidad, luego de ser lanzado a las líneas debe ser descartado por detectarse que los problemas de calidad o bien se corta con mucha frecuencia dentro de la máquina, produciendo pérdidas de tiempo y además bobinas que salen cortas. Cuando una bobina sale corta se mantiene separada, hasta que se juntan varias bobinas de similares condiciones, debiendo mantener la bobina inmovilizada durante semanas o meses.
2. En el devanado de la materia prima se dan muchos enredos de material, lo cual da lugar a interrupciones y pérdida de tiempo.
3. El bobinador de la máquina no funciona correctamente el material, lo cual ha dado lugar a desechar algunas bobinas de alambre trefilado.

4. La temperatura del alambre excede los parámetros normales, lo cual puede producir cortes de material en la trefiladora y en los procesos posteriores.
5. La trefiladora en varias oportunidades ha tenido que detenerse por falta de bobinas vacías, en esos casos, las bobinas estaban ocupadas o bien con bobinas cortas o con material difícil de procesar por lo cual se demoraba su tratamiento. Si bien la cantidad de bobinas en existencia es la adecuada, muchas bobinas quedan detenidas por estos problemas, por lo cual tener más problemas solo ocultaría más el problema, no solucionaría la pérdida de productividad de la planta.

Estos puntos relevados, dan lugar a una disminución del throughput de trefilación, un aumento del stock intermedio y del tiempo de tránsito del material, y además afectan a los procesos siguientes. A continuación se mostrarán las acciones tomadas para solucionar algunas de estas causas.

### **6.1.2 Calidad de la materia prima**

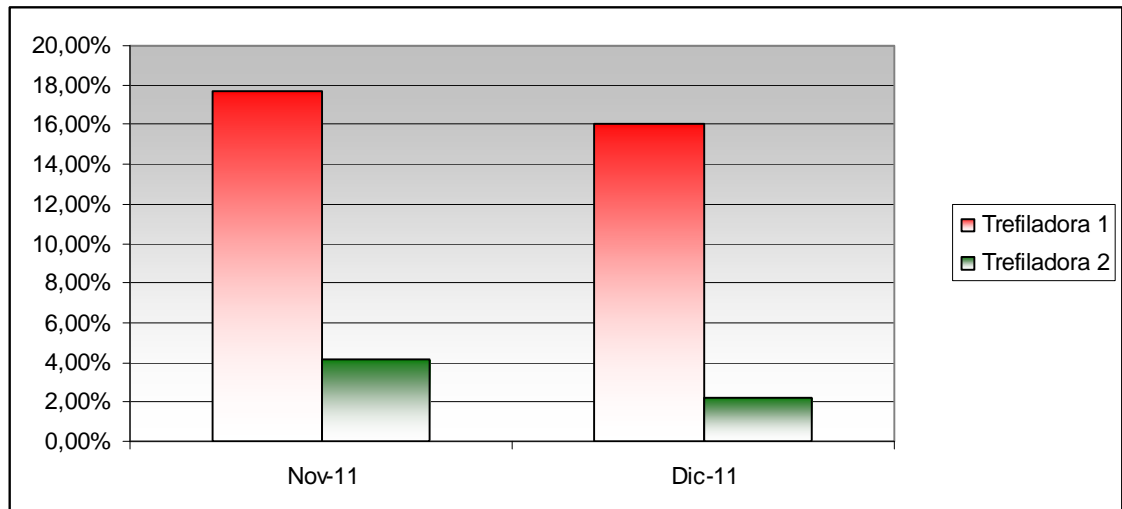
De las entrevistas citadas se obtuvo información de que la calidad de la materia prima podría ser un condicionante del proceso. Con el propósito de obtener rebajas importantes en el precio de la materia prima se suele aceptar material de menor calidad, muchas veces la baja calidad no afecta la producción ni la calidad del producto final. Otras veces, la calidad resulta en problemas durante el proceso productivo, provocando cortes del material y por ende disminución del throughput de las líneas. En otras oportunidades, el material con baja calidad, luego de ser lanzado a las líneas debe ser descartado por detectarse que la problemas de calidad, o bien producen tantos problemas en las líneas de producción que directamente se hace imposible su tratamiento. Si se pudiera cuantificar en moneda los problemas asociados a la calidad, y obtener además información estadística acerca del grado de calidad percibido, podríamos comparar el ahorro en el precio de la materia prima con el sobre costo de operación, para evaluar si efectivamente es conveniente seguir aceptando material de baja calidad. Con respecto a este asunto, se ha



encontrado un trabajo realizado por V. G Narayanan (2002) en el cual analiza los impactos de implementar costeo ABC en la empresa Insteel, fabricante de Cordón Pretensado y otros derivados del alambre de acero. En dicho trabajo se resalta que uno de los mayores beneficios de la implementación del costeo ABC son los aprendizajes que se logran en el proceso, mencionando particularmente que uno de los resultados más importantes fue demostrar que la utilización de materia prima de baja calidad, y bajo costo, traía aparejado mayores costos de operación debido a frecuentes roturas de material que provocaban interrupciones en los procesos y además provocaban la rotura de máquinas, y que el ahorro en precio de la materia prima no lograba compensar sobre-costo de operación. Esta conclusión a la que llega V. G. Narayanan (2002) podría ser totalmente aplicable en la planta bajo análisis, por lo que debe estudiarse en detalle el balance económico que se obtiene cada vez que se decide utilizar materia prima de menor calidad.

Al respecto de este problema se consultó al Departamento de Calidad que lleva un registro de los cortes de material y del grado de calidad de la materia prima utilizada. En dichos registros no se evidencia que la calidad de la materia prima sea un factor determinante de la frecuencia de cortes, sin embargo la totalidad de cortes registrados por este Departamento es muy inferior a la cantidad de cortes registrados por el Departamento de Producción.

Por último, se decidió destinar una segunda trefiladora para abastecer a la planta durante los meses de noviembre y diciembre. Esta segunda trefiladora (Trefiladora 2) es de una tecnología más vieja, y si bien tiene menor productividad, la experiencia resulta útil para estudiar la razón por la que se dan los cortes.



**Figura 61 Comparación de la generación de bobinas cortas entre la máquina Trefiladora 1 y la máquina Trefiladora 2**

De la Figura 61 se puede concluir que con la misma materia prima, la Trefiladora 2 presenta un comportamiento mucho mejor que la Trefiladora 1, la proporción de bobinas cortas generadas es notablemente menor, por lo que las causas podrían hallarse en el proceso de la Trefiladora 1. A igual calidad de materia prima, los factores que pueden implicar mayores cortes de material son:

- Mayor velocidad de trabajo: la trefiladora 1 es una máquina moderna de alta velocidad. Una alta velocidad de trabajo puede ser contraproducente cuando la materia prima no es la adecuada. La trefiladora 2 funciona al 50 % de la velocidad, pudiendo ser esta la razón por la que el material no se corta.
- Refrigeración: pueden existir problemas de refrigeración en la trefiladora 1 que produzcan incrementen la fragilidad del material y ocasionen los cortes. Este es uno de los factores relevados en las entrevistas con el personal del sector.

Estas causas serán estudiadas en los apartados siguientes.

## 6.2 PASO 2: Explotar las restricciones del sistema

Durante los meses de Noviembre y Diciembre se dieron las siguientes directivas:

- Se asignó máxima prioridad a la atención por parte de mantenimiento a la trefiladora

### **6.3 PASO 3: Subordinar todos los procesos a la restricción del sistema**

- Se asignó máxima prioridad al abastecimiento de materia prima de la trefiladora, asegurando que siempre haya una carga de material en espera para ser trefilado

### **6.4 PASO 4: Elevar la(s) restricción(es) del sistema**

En base los puntos mencionados en los apartados se tomaron las siguientes acciones durante el mes de Enero de 2012 aprovechando el paro anual de la planta de cordón:

- Punto 1: el departamento de Ingeniería a pedido del sector de Producción instaló un equipo para mejorar el devanado de materia prima y así evitar enredos. El equipo había sido comprado con anterioridad por recomendación del fabricante de la máquina.
- Punto 2: el sector de mantenimiento modificó el bobinador para corregir los problemas en el bobinado
- Punto 3: el sector de mantenimiento procedió a investigar los problemas de refrigeración de la trefiladora 1, encontrando que los circuitos de refrigeración estaban parcialmente obstruidos por lo cual la temperatura del alambre se incrementaba, lo cual puede dar lugar a que el alambre se fragilice y corte tanto dentro de la trefiladora como en los procesos posteriores. Se desobstruyó el circuito totalmente, mejorando la refrigeración.

### 6.5: Verificar si la restricción ha sido superada

Se esperaba que estas acciones den frutos en el corto plazo, sin embargo de la Figura 62 se evidencia que los problemas con el material no han sido solucionados, dado que la proporción de cortes no se modificó luego del mes de enero 2012. Las evidencias parecen sugerir que existen problemas con la materia prima y que la misma debe ser procesada a menores velocidades para evitar los cortes de material. Sin embargo, reducir la velocidad no sería una solución real al problema, la calidad de la materia prima debe ser la adecuada para que la planta pueda operar óptimamente a las velocidades actuales.

PROPORCIÓN DE BOBINAS CORTAS (< 1600 kg) SOBRE EL TOTAL DE BOBINAS TREFILADAS

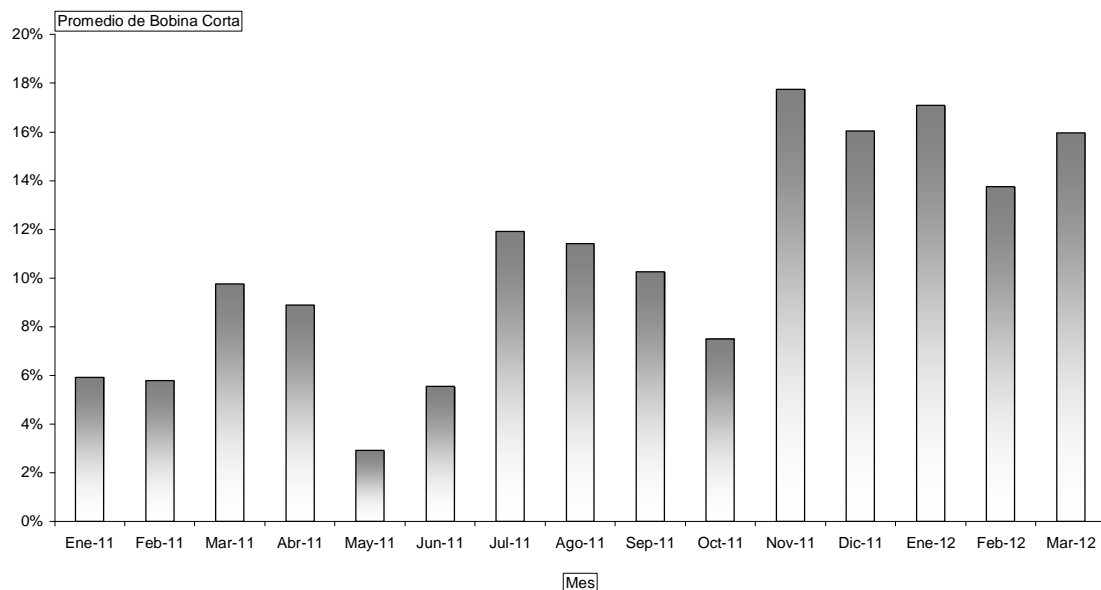


Figura 62 Evolución de los cortes de material en la trefiladora

### 6.6 Puntos destacados

Se ha comenzado el ciclo de mejora continua para aumentar la performance de la planta. Este ciclo deberá ser recorrido continuamente, hasta que eventualmente la restricción se encuentre fuera de la planta. Llegado ese punto el trabajo continuaría en conjunto con las áreas comerciales de la empresa. Se espera obtener como beneficio de este ciclo una reducción del 15 % del costo de mano de obra, equivalente a una reducción del 1,1% del costo total, y por

ello un aumento del margen del 11 % antes de impuestos como se indicó en el Capítulo V.

El proceso de mejora continua deberá ser reiniciado, estudiando las causas que originan los cortes de material en la trefiladora. Se recomienda:

- Estudiar si existe correlación entre la velocidad de trabajo y los cortes de material: la experiencia realizada en comprar la trefiladora 1 y la trefiladora 2 parecen indicar que existe correlación. Esto podría ayudar a probar que existen problemas con la materia prima.
- Trabajar en conjunto con el Departamento de Calidad para estudiar la evolución pasada de los cortes de material y su relación con la materia prima utilizada: dado que el problema parece haberse acentuado luego de Octubre de 2011, se debería estudiar en detalle si hubo alguna modificación en la calidad de la materia prima suministrada.
- Mejorar el reporte de los cortes de material: cada vez que se da un corte de material, el operario debería llevar al Departamento de Calidad una muestra del material para que se analice. Este proceso parece no estar funcionando correctamente, dado que la cantidad de cortes registrados en el Departamento de Calidad es aproximadamente el 10 % de la cantidad de cortes declarados por producción.
- Evitar la compra de materia prima de baja calidad con descuentos: la evidencia parece sugerir que la calidad de la materia prima produce costos adicionales de producción y alta merma de material

## CAPÍTULO VII: EVALUACION DE PROYECTOS

En este capítulo se revisarán los métodos utilizados para la evaluación de proyectos en empresas industriales, para finalmente evaluar los siguientes proyectos planteados:

- Inversión en reparación integral de Cableadora para reestablecer condiciones originales: desde el año 2005 la cableadora se encuentra trabajando por debajo de su velocidad máxima, debido a la falla incipiente de los rodamientos principales. La reparación de la misma implica una inversión y una pérdida de ventas considerable. Como beneficio se obtendría un aumento de capacidad de la cableadora y un aumento de confiabilidad de la misma, a ser evaluados económicamente.
- Destinar una segunda trefiladora para la producción de alambre para cordón: en este caso, la segunda trefiladora está actualmente fabricando otros productos. Se deberá evaluar el costo de dejar de fabricar los productos actuales en dicha trefiladora y compararlos con los beneficios que obtendríamos al destintar dicha máquina a la fabricación de alambre para cordón.

### 7.1 Evaluación Financiera de Decisiones

Frecuentemente en la operación de una planta existela necesidad de tomar decisiones dicotómicas, como ser “comprar una máquina nueva o seguir con la máquina vieja”. En este ejemplo, se debería calcular el valor de la compañía con la compra de la nueva máquina y compararlo con el valor de la compañía en caso de seguir utilizando la máquina vieja. El valor de la empresa es igual al Valor Actual del Flujo de Fondos de la misma, por lo cual lo anterior se puede expresar como:

Si  $V.A.N.(FF_{\text{máquina nueva}}) > V.A.N.(FF_{\text{máquina vieja}}) \rightarrow$  comprar máquina nueva

Donde

V.A.N.( $FF_{\text{maquina nueva}}$ ): es el valor actual neto del flujo de fondos que se darían en caso de comprar la máquina nueva

V.A.N.( $FF_{\text{maquina vieja}}$ ): es el valor actual neto del flujo de fondos que se darían en caso de seguir con la máquina vieja

Además, siempre que el tipo de decisión no cambie el riesgo de la empresa, lo cual para el tipo de decisiones que se toman en el piso de planta es usualmente correcto, la misma expresión puede ser transformada a

Si  $V.A.N.(\Delta FF) > 0 \rightarrow$  comprar máquina nueva

Donde

V.A.N.( $\Delta FF$ ) : es el valor actual neto del flujo de fondos diferencial, es decir, la diferencia entre los flujos de fondos de ambas opciones, expresado como:

$$\Delta FF = FF_{\text{maquina nueva}} - FF_{\text{maquina vieja}}$$

Por lo tanto, para la tomar la decisión financieramente conveniente basta con calcular el flujo de fondos diferenciales de ambas alternativas y luego descontarlos a la tasa de descuento apropiada. El Flujo de fondos puede ser calculado a partir del resultado operativo de la empresa de la siguiente manera:

$$\begin{array}{r}
 \underline{D \text{ Ebit}} \\
 - D \text{ Ebit } \times t\% \\
 + D \text{ Amortizaciones y Depreciaciones} \\
 - D \text{ Aumentos en Necesidad Operativa de Fondos} \\
 - D \text{ Inversiones en Activos Fijos} \\
 + D \text{ Valor Contable de Activos Vendidos} \\
 \hline
 = D \text{ Flujo de Fondos Libres}
 \end{array}$$

**Tabla 14 Cálculo del Flujo de Fondos del proyecto**

El flujo de fondos debe representar el valor promedio ponderado por su probabilidad de ocurrencia. La tasa de descuento a utilizar se calcula mediante el CAPM:

$$K_a = r_f + r_{\text{Arg}} + B_a (R_m - r_f) \approx 25 \%$$

, donde para la empresa bajo análisis

$$\beta_a = D/(D+E) \beta_d + E/(D+E) \beta_e \approx E/(D+E) \beta_e \approx 1,5$$

$$\beta_e = 2,15$$

$$E/(D+E): \text{proporción del equity} = 0,7$$

Y los siguientes datos de mercado

$$R_f: 2,4 \%$$

$$R_m - R_f: \text{prima por riesgo de mercado } 10 \%$$

## 7.2 Inversión en Reparación Integral de la Cableadora

Se conoce desde el 2005 que los rodamientos principales de la cableadora presentan signos de deterioro. A partir de entonces se debió reducir la velocidad de la misma a en un 25 %, disminuyendo la capacidad de la instalación en un 17 %. Estudios de los fabricantes indican que la falla ha seguido progresando, y de no realizar la reparación en tiempo podría darse la falla repentina y por ende se debería detener la producción hasta que se realice la reparación.

El tiempo de paro estimado de la instalación ante una falla repentina se estima en 60 días, con el agravante de que luego de la reparación el estado original de funcionamiento no podría ser alcanzado y la velocidad seguiría limitada. Si por el contrario la reparación se hace de manera programada, se contaría con la ayuda de especialistas de la empresa que fabricó la máquina y de todos los recursos necesarios, por lo cual se espera realizar el trabajo en 30 días y obtener como resultado final las condiciones originales de funcionamiento de la máquina, esto representa un aumento de velocidad del 33 %.

Debe cuantificarse económicamente cada uno de los efectos que se darían en cada escenario, para poder hacer la comparativa y la regla de decisión sería:



Si V.A.N.(reparación programada) > V.A.N.(reparación no programada) →  
Proceder a la reparación programada

## 7.2.1 Cuantificación económica de los escenarios

### 7.2.1.1 OPCION 1: Reparación Programada durante 2012

- *D CMV por inversión en reparación programada (materiales y servicios):* el costo de la reparación se prevé en 1.000.000 AR\$.
- *D CMV por ahorro hs extra Escenario 1:* una vez reestablecida la producción, la velocidad de la cableadora sería un 33 % mayor a la actual – dando lugar a un aumento de capacidad de la planta que según el Análisis de Sensibilidades del Capítulo IV sería solamente del 4 %, dado que la Cableadora solamente es la restricción en la medida 9,53 mm. El incremento de capacidad se traduciría únicamente en una reducción de las hs extra, dado que no se esperan modificaciones en la demanda según lo visto en el Capítulo III, resultando en un ahorro de 160.000 AR\$ anuales.
- *Inversión en ampliación de galpón para acumular inventario por aproximadamente 1.000.000 AR\$*
- *D CMV por adelantar producción en Escenario 1:* se deberá parar la planta durante 30 días, pudiendo acumular el stock con anterioridad para no perder las ventas del mes, pagando el sobre-costos de acarreo de inventarios y el costo de las horas extra necesarias para adelantar producción. En base a la demanda estimada, la capacidad de producción y de acumulación de inventarios, los costos asociados a la acumulación de inventarios y la pérdida de pedidos, se puede optimizar un plan de producción anual. Siguiendo los lineamientos de R. E. Crandall (1998) se puede utilizar una planilla de Excel® para hacer esto, utilizando la herramienta SOLVER para ello.

El planeamiento de la producción es la función de fijar los objetivos de producción para cumplir los planes de ventas, y a la vez cumplir los

lineamientos de la empresa de rentabilidad (R. E. Crandall, 1998). Por ello a la hora de realizar el plan se debe tener en cuenta por lo menos:

- La demanda del mercado, en forma del plan de ventas
- La capacidad de producción mensual en horas normales, a un mix de producción promedio según la información del mercado que se tiene, y utilizando los resultados del Capítulo V
- La disponibilidad de los recursos: mano de obra, materia prima, restricciones de energía, etc
- La capacidad de producción disponible en horas extra y su extra costo asociado
- Las modificaciones que pueden tener lugar durante el año los costos de la materia prima, mano de obra, etc.
- El costo de mantener inventarios y la capacidad disponible para ello
- El costo de desatender pedidos
- Los paros programados por mantenimiento

En base a esta información es sencillo armar una planilla y mediante algún algoritmo resolver óptimamente el problema. El procedimiento seguido es el que desarrolló R. E. Crandall (1998), quien implementa la solución óptima del plan de producción mediante el planteo de un problema de Programación Lineal, y utiliza una planilla de cálculos para la resolución (). Se deberá plantear el escenario con y sin el paro de la planta para luego conocer el extra costo de dicha alternativa.

En la Figura 63 se observa la planilla de cálculos utilizada. Los datos de entrada a dicha planilla son:

- Costo de Materia prima [\$/Tn]
- Costo de acarreo de inventarios [\$/Tn/mes]
- Costo de pedidos no cumplidos [\$/Tn/mes]
- Costo de la mano de obra [\$/hora]
- Costo de las horas extra [\$/hora] normales (utilizadas para cubrir vacaciones o ausencias del personal)
- Costo de las horas extra en franco [\$/hora]

- Cantidad de operadores por turno
- Capacidad de almacenamiento
- Datos del mes: cantidad de días hábiles, de feriados, de domingos, etc.
- Cantidad de operarios de vacaciones, expresado en cantidad de turnos
- Capacidad promedio de la planta [tn/mes] haciendo un promedio ponderado de las capacidades para cada medida en función del mix histórico de la demanda
- Demanda [Tn/mes]

Las variables de salida de la planilla, que son modificadas por el programa para optimizar el plan de producción, son:

- Producción [tn/mes]
- Inventario acumulado [tn]
- Pedidos no cumplidos [tn/mes]

Otras variables calculadas a partir de los resultados, y que se usan en el planteo de las restricciones:

- Costos:
  - Extra Costo por horas en franco: 400 % del costo de la hora de trabajo
  - Extra Costo por acumulación de inventarios: 25%/año del costo del producto
  - Extra Costo por pérdida de pedidos: supondremos que la venta directamente se pierde, siendo este el peor caso
- Total de Turnos trabajados
- Total Turnos en franco trabajados

Las restricciones del sistema son:

- $(\text{Inventario})_N \leq (\text{Capacidad de almacenamiento})_N$
- $(\text{Turnos en franco trabajados})_N \leq (\text{Turnos en franco disponibles})_N$
- $(\text{Turnos trabajados})_N \leq (\text{Turnos disponibles})_N$
- $(\text{Inventarios})_{N-1} - (\text{Pedidos Demorados})_{N-1} = (\text{Producción})_N - (\text{Demanda})_N$

- $(\text{Inventarios})_{12} = 0$ , esta condición se implementa poniendo un costo de acarreo de inventarios excesivamente alto en el mes 12 por estar limitada la cantidad de restricciones admisibles
- $(\text{Pedidos Demorados})_{12} = 0$ , esta condición se implementa poniendo un costo de acarreo de inventarios excesivamente alto en el mes 12 por estar limitada la cantidad de restricciones admisibles

Donde  $N$  identifica el mes actual y  $N-1$  el mes anterior.

La función objetivo es el valor actual de la suma de los costos de producción, el programa buscará minimizar dicha función.

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Costo Materia prima	[\$/Tn]	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	\$ 790	
Costo Inventario	[\$/Tn/mes]	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 1.000.000	
Costo Pedidos no cumplidos	[\$/Tn]	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 1.000.000	
Costo Mano Obra	[\$/h]	\$ 20	\$ 20	\$ 20	\$ 25	\$ 25	\$ 25	\$ 25	\$ 25	\$ 25	\$ 25	\$ 25	\$ 25	
Costo Hs. Extra Norm	[\$/h]	\$ 30	\$ 30	\$ 30	\$ 38	\$ 38	\$ 38	\$ 38	\$ 38	\$ 38	\$ 38	\$ 38	\$ 38	
Costo Hs. Extra Frco	[\$/h]	\$ 80	\$ 80	\$ 80	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	
Operadores / turno		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Capacidad Almacenamiento	[Tn]	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	
Días mes	[días]	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	30	
Días feriados	[días]	1	0	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	
Días producción	[días]	30	28	30	29	29	29	30	30	29	30	29	28	
Domingos	[días]	5	4	4	4	5	4	5	4	4	5	4	4	
Sábados	[días]	5	4	4	5	5	4	5	4	4	5	4	4	
Plantel de vacaciones	[turnos]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Turnos de producción Disponibles	[turnos]	70	68	74	70	67	71	70	74	71	70	71	68	
Capacidad	[Tn/turno]	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	
Turnos disp. franco		24	16	20	20	28	20	24	20	20	24	20	24	
Demanda	[Tn]	416	945	1010,6	1108,2	1079	1140	997,2	1252,4	1290,9	1278,6	1208	800	
Producción	[Tn]	930	882	984	932	893	1078	1108	1250	1210	1250	1208	800	
Inventarios	[Tn]	514	451	424	248	62	0	111	109	28	0	0	0	
Pedidos no cumplidos	[Tn]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Turnos en franco	[turnos]	0	0	0	0	0	10	13	20	20	24	20	0	
Turnos trabajados	[turnos]	70	66	74	70	67	81	83	94	91	94	91	60	
Turnos Disponibles	[turnos]	94	84	94	90	95	91	94	94	91	94	91	92	
Net leftover	[Tn]	514	451	424	248	62	0	111	109	28	0	0	0	
Ending Inventory	[Tn]	514	451	424	248	62	0	111	109	28	0	0	0	
Turnos Disponibles	[turnos]	94	84	94	90	95	91	94	94	91	94	91	92	
Horas Extra Franco	[hs]	0	0	0	2	6	403	534	800	800	960	793	0	
Horas Operario Max Disponibles	[hs]	3760	3360	3760	3600	3800	3640	3760	3760	3640	3760	3640	3680	
Extra Costo hs franco	[\$]	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 103	\$ 332	\$ 24.174	\$ 32.012	\$ 48.000	\$ 48.000	\$ 57.600	\$ 47.585	\$ 0	
Extra costo materia prima	[\$]	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
Extra Costo inventario	[\$]	\$ 7.466	\$ 6.428	\$ 5.930	\$ 3.394	\$ 829	\$ 0	\$ 1.435	\$ 1.379	\$ 352	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
Extra Costo Pedidos perdidos	[\$]	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
Extra Costo Total	[\$]	\$ 7.466	\$ 6.428	\$ 5.930	\$ 3.498	\$ 1.161	\$ 24.174	\$ 33.447	\$ 49.379	\$ 48.352	\$ 57.600	\$ 47.585	\$ 0	
VAN[Extra Costo]		\$ 244.486												
Tasa de descuento mensual		1,88%												

VALORES DE SALIDA
  CELDAS A ITERAR
  PARAMETROS DE ENTRADA

Figura 63 Planilla para optimización de plan anual mediante la herramienta Solver integrada en el Excel®

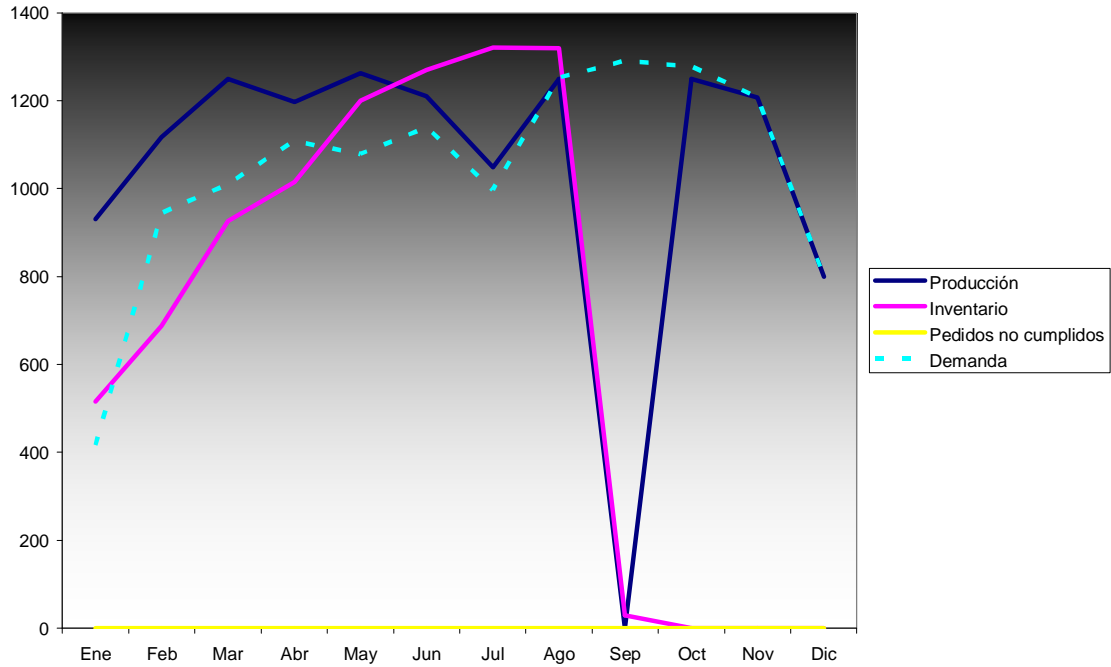


Figura 64 Plan de Producción en un escenario de paro de planta de 30 días

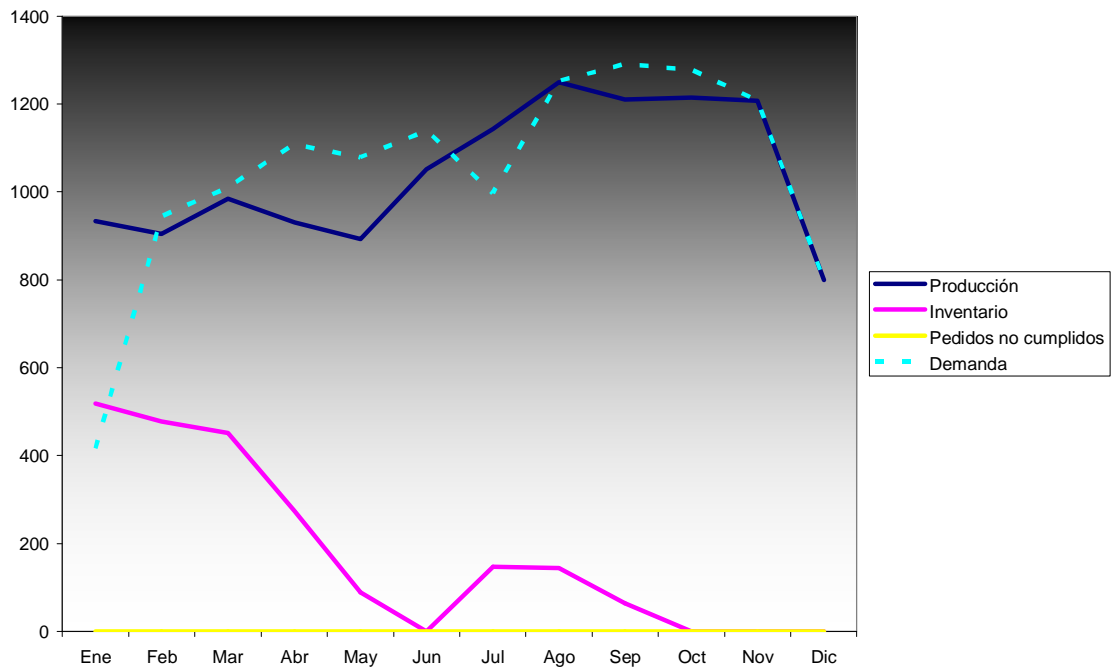


Figura 65 Plan de Producción Anual en un escenario sin paro de planta

Se observa que en ambos escenarios es recomendable recurrir a la acumulación de inventarios para satisfacer la demanda, y no será necesario perder pedidos.

*D CMV por adelantar producción en Escenario 1:* el diferencial de costo de producción de ambos escenarios es de aproximadamente 889000 AR\$, dado por el costo adicional de las horas extra y la acumulación de inventarios.

#### **7.2.1.2 OPCION 2: No reparar**

En caso de que se decida no realizar la reparación, se incurrirá en los siguientes extra-costos:

- *D Ventas por instalación parada reparación no programada:* el fabricante espera con probabilidad 100% que la falla transcurra durante los próximos 5 años, se puede modelar la probabilidad de falla como una variable aleatoria uniforme [1 ; 5], de manera que la falla se puede dar con igual probabilidad durante los próximos 5 años. En el momento que se de la falla, se perderá el equivalente a 2 meses de ventas. La pérdida de ventas se prevé en este caso en 1.500.000 AR\$, dejando de lado los costos que surgirían en este caso por desatender pedidos, como ser la pérdida de ventas futuras además de las presentes.
- Una vez reestablecida la producción, la velocidad de la cableadora sería la misma velocidad que hoy, dado que al hacerse la reparación en emergencia no se contarían con los especialistas ni repuestos adecuados, la velocidad máxima no podría alcanzarse. En ese caso no se prevé en adelante ninguna otra alteración en el estado de resultados.

#### **7.2.1.3 Cálculo del Valor Actual del Flujo de Fondos Diferencial de ambos escenarios**

<b>Estado de Resultados</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
Δ <i>Ventas por instalación parada reparación no programada</i>	\$ 1.789	\$ 1.789	\$ 1.789	\$ 1.789	\$ 1.789	\$ 0	\$ 0
Δ <i>CMV por ahorro hs extra Escenario 1</i>	\$ 160	\$ 160	\$ 160	\$ 160	\$ 160	\$ 160	\$ 160
Δ <i>CMV por hs extra para adelantar producción en Escenario 1</i>	-\$ 889	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Δ <i>CMV por costo de reparación no programada en Escenario 2</i>	\$ 300	\$ 300	\$ 300	\$ 300	\$ 300	\$ 0	\$ 0
Δ <i>CMV por inversión en reparación programada (materiales y servicios)</i>	-\$ 1.000						
Δ <i>Amortización Galpón nuevo para almacenar material</i>	-\$ 100	-\$ 100	-\$ 100	-\$ 100	-\$ 100		
<b>D EBIT</b>	<b>\$ 260</b>	<b>\$ 2.149</b>	<b>\$ 2.149</b>	<b>\$ 2.149</b>	<b>\$ 2.149</b>	<b>\$ 160</b>	<b>\$ 160</b>
Δ <i>Tax (35%)</i>	-\$ 91	-\$ 752	-\$ 752	-\$ 752	-\$ 752	-\$ 56	-\$ 56
<b>D EBIT (1-t)</b>	<b>\$ 169</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 104</b>	<b>\$ 104</b>
<i>Ajustes para Flujo de Fondos</i>							
<b>D EBIT (1-t)</b>	<b>\$ 169</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 1.397</b>	<b>\$ 104</b>	<b>\$ 104</b>
Δ <i>NOF por disminución de ventas por reparación no programada</i>	-\$ 1.565	-\$ 1.565	-\$ 1.565	-\$ 1.565	-\$ 1.565	\$ 0	\$ 0
Δ <i>NOF por recuperación de ventas en siguiente período a reparación no programada</i>		\$ 1.565	\$ 1.565	\$ 1.565	\$ 1.565	\$ 1.565	\$ 0
Δ <i>Amortización Galpón nuevo para almacenar material</i>	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 0	\$ 0
Δ <i>Inversión de construcción de galpón</i>	-\$ 1.000						
<b>D Flujo de Fondos</b>	<b>-\$ 2.296</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.669</b>	<b>\$ 104</b>
<b>D Flujo a Perpetuidad</b>							<b>\$ 416</b>
<b>D Flujo de Fondos</b>	<b>-\$ 2.296</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.497</b>	<b>\$ 1.669</b>	<b>\$ 520</b>
<b>Tasa</b>	<b>25%</b>						
<b>VAN</b>	<b>\$ 1.537</b>						
<b>TIR</b>	<b>60%</b>						

**Tabla 15 Flujo de Fondos Diferencial de ambos escenarios**

Dados los resultados de la Tabla 15, corresponde llevar a cabo la reparación de manera programada para asegurar el mejor resultado económico, con un Valor Actual Neto cercano al 1.500.000 AR\$.

### 7.3 Evaluación destinación de una trefiladora extra para la producción de alambre para cordón

Se ha visto a lo largo de este trabajo, que la trefilación es hoy el cuello de botella de la planta de cordón pretensado. Sería posible destinar otra trefiladora para aumentar la producción, pero sacrificando la producción de otros productos. Nuevamente, se deberían plantear los escenarios alternativos y evaluar el valor actual del flujo de fondos diferenciales para tomar la decisión. El problema en cuestión puede analizarse desde otro enfoque, que es el de la selección de un mix de producción óptimo que maximice el throughput medido en \$/hora, para aprovechar al máximo las restricciones del sistema, y podría



incluirse en el Paso 2 del proceso de mejora continua que sugieren E. M. Goldratt y J. Cox (1986). En términos del diseño del mix de producción óptimo, podemos escribir el Paso 2 de la siguiente manera (L. D. Fredendall 1997) :

- **Paso 2: Explotar al máximo las restricciones del sistema**
  - Calcular el margen de contribución de cada producto como la diferencia entre el Precio de Venta y el Costo de la Materia Prima
  - Calcular el ratio entre el Margen de Contribución y el Tiempo de Procesamiento en el Cuello de Botella (MC / TPCB)
  - En orden decreciente de MC/TPCB asignar la capacidad de producción del Cuello de Botella hasta que la capacidad el mismo haya sido agotada
  - Los productos que no pasan por el cuello de botella deben ser producidos en orden de prioridad según su Margen de Contribución

Actualmente existen 3 máquinas de trefilación en donde se puede procesar el material para el Cordón Pretensado. Los productos que pueden ser fabricados por dichas máquinas son:

<b>PRODUCTO</b>	<b>Utilización de Trefilación</b>	<b>Precio Materia Prima</b>	<b>Precio Venta</b>	<b>Margen de Contribución</b>	<b>Indicador MC/TPCB</b>
	[hs/Tn]	[US\$/Tn]	[US\$/Tn]	[US\$/Tn]	[US\$/h]
<b>Alambre para Cordón Pretensado</b>	0.625	790	1252	462	739
<b>Alambre para Trenzas</b>	1	790	1400	610	610
<b>Alambres industriales</b>	3	790	1100	310	103
<b>Alambre para Baja Relajación</b>	4	790	1200	410	103

**Tabla 16 Productos a fabricar ordenados según la relación Margen / Tiempo de Procesamiento**

El cuadro de la Tabla 16 se muestra que el producto de mayor prioridad para la empresa es el Cordón Pretensado, a pesar de que su margen de contribución no es el mayor. Por lo tanto, se debería sacrificar capacidad de trefilación asignada a otros productos para cumplir la demanda de Cordón Pretensado. Una vez garantizada la producción del alambre para Cordón, se debería asignar capacidad a la producción de Alambres para Trenzas, y solamente

después se debería asignar capacidad a los productos restantes.

## CAPITULO VIII: CONCLUSIONES

Al iniciar la investigación se planteó como interrogante cuáles eran los factores que restringían la rentabilidad de la empresa. Las primeras semanas de la investigación, dedicadas casi exclusivamente a la investigación bibliográfica en temas Management y Operaciones, llevaron de a poco a estudiar la Teoría de las Restricciones, que plantea justamente que existe siempre una restricción a la rentabilidad, ya sea esta un proceso, una máquina, una política o el mercado mismo. Como principal resultado de la investigación se descubrió que la principal restricción se encuentra en la planta, dado que se recurre a horas extra de producción para abastecer al mercado. Con mayor precisión la restricción se encuentra en el área de trefilado. Como se vio en el Capítulo IV la trefilación es un cuello de botella en las medidas 12,70 mm y 15,23 mm, por lo que es el principal factor que restringe la rentabilidad. Adicionalmente, se encontró que en el funcionamiento actual de la planta existen problemas que no habían sido anticipados que crean restricciones que pueden ser superadas. Particularmente se encontró que en el proceso de trefilación se da una gran cantidad de cortes de material, que generan hasta un 18 % de bobinas más cortas que el estándar lo cual reduce el throughput en un 15 % aproximadamente. Esta disminución del throughput trae como consecuencia la concurrente necesidad de utilizar horas extra para cumplir los programas de producción, aumentando los Gastos de Operación. Por lo tanto, respondiendo a los interrogantes planteados en la Introducción, a pesar del difícil contexto que rodea a la empresa, descrito en el Capítulo III, es posible aumentar la rentabilidad mediante el aumento del throughput y la consiguiente reducción de los Gastos de Operación, debiendo encontrar la causa de los cortes de material para ello.

En lo referente al objetivo principal de la tesis, dirigido a hallar la manera de aumentar la rentabilidad, a lo largo del Capítulo V se concluyó que la rentabilidad actual de la planta es inferior a la que se obtendría si la performance de la planta fuera la obtenida en la simulación. El contraste que se realizó en dicho capítulo permitió detectar las causas de la baja performance. En este capítulo se demostró que el Gasto de Operación actual podría ser disminuido mediante un incremento del throughput  $T_n$ /día del 25 %. El

resultado económico, ante un mercado que por lo visto en el Capítulo III no presenta signos de aumentar su demanda, sería un aumento del margen de ganancia antes de impuestos en aproximadamente un 16 %, según la Tabla 12. En el Capítulo V también se demostró que existen problemas a ser resueltos en la máquina trefiladora que congestionan el flujo de producción y son la principal causa de baja performance de la planta, quedó demostrado que el problema principal es la gran cantidad de cortes de material, y resolviendo este problema ya se obtendría un aumento del margen del 11 %. Si bien la causa raíz de los cortes de material no puede ser conocida sin estudiar en detalle las propiedades metalúrgicas de la materia prima y las características del proceso de trefilación, a lo largo de este trabajo se han podido descartar el resto de las posibles causas mediante la implementación de medidas reales en la fábrica. Las causas secundarias de la menor performance actual parecen estar radicadas en la falta de una política de lotes de producción de la trefiladora, quedando a criterio de la supervisión la determinación de los lotes de producción.

Respondiendo a los objetivos secundarios de la investigación, como se muestra en el en el Análisis de Sensibilidad del Capítulo IV, resumido en la Tabla 7, existen varias variables que inciden en la performance la planta, pueden ser utilizadas para reducir los Gastos de Operación y fueron cuantificadas durante el trabajo:

- **Tiempos de las operaciones:** en todos los casos los tiempos utilizados fueron recogidos de los históricos de producción, por lo cual son tiempos observados, no necesariamente óptimos. Una reducción en los tiempos de carga o set-up de las máquinas que son cuello de botella traería aparejado un aumento sensible del throughput, disminuyendo el uso de horas extra. A su vez, disminuir la dispersión de los tiempos de las operaciones permite obtener un flujo más predecible en los procesos. Para ello sería necesario hacer un estudio detallado de los métodos y tiempos de las operaciones, haciendo foco en la trefilación que resulta ser el cuello de botella.
- **Tiempos de paro por mantenimiento:** las distribuciones de tiempo entre fallas y duración de la reparación que incluimos en el Capítulo IV fueron recogidas de los históricos del área Mantenimiento. La reducción de

estos parámetros permitiría aumentar la disponibilidad de las máquinas, en especial sería importante garantizar altos valores de disponibilidad en la cableadora y la trefiladora, dado que resultan ser cuellos de botella en diferentes medidas de producción. Dentro de la técnica de Mantenimiento Industrial existen varias herramientas que pueden ser útiles para tal fin.

- Velocidades de máquina: en los cuellos de botella sabemos que cualquier aumento de throughput local implicaría un aumento de throughput global de similar magnitud. Hemos visto en el Capítulo VII que para aumentar la velocidad de la cableadora resultaría necesario realizar una reparación mayor. Un aumento de velocidad en el resto de las máquinas requiere un estudio técnico, tanto debido a la tecnología electro-mecánica de las máquinas como a las modificaciones metalúrgicas que pueden ocurrir como consecuencia de un cambio de condiciones de proceso. En particular en el proceso de trefilación, un aumento de velocidad puede traer como consecuencia la fragilización del alambre, lo cual puede afectar procesos posteriores o la calidad del producto final, por lo cual cada cambio de condiciones de proceso debe ser estudiado en detalle por técnicos competentes en el área.
- Tamaño de batch en la trefiladora: hemos visto en el Capítulo IV que el tamaño del batch modifica la performance de la planta de diferentes maneras, valores muy pequeños lo disminuyen considerablemente, y valores muy altos dan como resultados altos niveles de WIP y largos tiempos de tránsito. Se debería partir del tamaño recomendado en el Capítulo IV y luego evaluar pequeñas modificaciones hasta llegar a un óptimo para cada medida de producción.

Cada una de estas medidas permite aumentar el throughput, y por ello reducir el uso de horas extra, disminuyendo los Gastos de Operación.

En el Capítulo VI se dieron los lineamientos generales para aumentar la performance de la planta mediante propuestas concretas, y se dieron los lineamientos para iniciar el ciclo de mejora continua como proponen E. M. Goldratt, y J. Cox (1986). Como ya se mencionó, durante este capítulo se pudo

descartar que exista algún problema con la trefiladora que sea responsable de la alta generación de los cortes, concluyendo que el problema está localizado en la calidad de la materia prima o en el proceso de trefilación, si bien el estudio de las características de la materia prima adecuada para el proceso se encuentra fuera del alcance de este trabajo, el problema pudo ser localizado, y su impacto económico pudo ser estimado.

El marco general en el que se situó la investigación fue dentro de la Teoría de las Restricciones. Los lineamientos que la teoría propone han demostrado ser prácticos para las decisiones que se toman en el piso de planta, en el sentido que logra unir el mundo de las operaciones con el mundo económico al asociar las variables Throughput, Inventario y Gasto de Operación directamente con la rentabilidad del negocio. Esto ha sido estudiado en el Capítulo I y II, y aplicado de manera general en el resto de la investigación. Las decisiones que se suelen tomar en el piso de planta son en general de corto plazo, y por ello la Teoría de las Restricciones parece acertada para tal entorno, dado que en el corto plazo casi todos los costos se deben considerar fijos. Por el contrario, las decisiones a largo plazo podrían ser evaluadas mediante otros enfoques donde se consideren variables otros costos involucrados en la operación de la empresa.

Respondiendo uno de los objetivos secundarios planteados en la Introducción, la simulación ha resultado ser una herramienta que presenta las siguientes ventajas frente a otras técnicas de análisis:

- Permite experimentar con un modelo tan real como se requiera, casi sin costo alguno.
- Durante las etapas de construcción del modelo, detalladas en el Capítulo IV, se logra una comprensión total de la operación de la planta, y al comparar la operación real con la simulada las diferencias y los puntos a atacar se descubren de manera natural, siendo casi evidente dónde se debe trabajar para mejorar la performance.
- Se obtiene una herramienta apropiada para la evaluación de decisiones y comparación de escenarios

La simulación ha logrado revertir la idea errónea que se tenía acerca de las restricciones de la planta, ya que se creía que la restricción de la misma era la máquina cableadora debido a la necesidad de disminuir su velocidad debido a la falla incipiente de los rodamientos principales. Por el contrario, las simulaciones indican que el cuello de botella de la planta se encuentra mayormente en el sector de trefilación, y ahí es donde la gerencia debería apuntar sus esfuerzos. Más precisamente, la restricción parece estar dentro del proceso de fabricación que genera cortes en el material, ya sea por problemas de calidad de la materia prima o por problemas del proceso, lo que trae como consecuencia que las bobinas sean más cortas del estándar, lo cual repercute en la performance aguas abajo de la planta. En el momento de escribir estas conclusiones se está investigando dicho fenómeno, perteneciente al campo de la metalurgia, con los sectores de Producción, Calidad y Mantenimiento.

En el Capítulo VII se vio que la inversión más urgente resulta ser el reacondicionado preventivo de la cableadora, no para lograr un aumento de capacidad, sino para evitar el costo de oportunidad de parar la instalación ante un avance de la falla en los rodamientos principales. Tal reparación hoy está siendo programada para septiembre de 2012. En dicho capítulo además se mostró cómo utilizar herramientas de programación lineal para planificar la producción anual de la planta en base a la demanda, la evolución de la disponibilidad y el costo de los recursos, los días de planta parada programada, etc. También se ha planteado en el Capítulo VII la posibilidad de sacrificar otros productos que fabrica el sector trefilación para abastecer a la línea de Cordón, siguiendo los criterios de la Teoría de las Restricciones para elegir el mix de producción se llegó a la conclusión de que el alambre para Cordón Pretensado resulta ser económicamente más conveniente para la empresa que el resto de los productos, y se debería priorizar su producción frente a otros productos. Se ha visto que las recomendaciones de la Teoría de las Restricciones frente a la selección del mix óptimo de producción indican priorizar aquellos productos que presentan mayor margen de contribución por tiempo de procesamiento en el cuello de botella. Ambas conclusiones eran objetivos secundarios de la presente investigación.

La metodología utilizada, basada en modelar y simular la operación de la planta, detallada en el Capítulo IV permitió:

- Analizar y comprender las operaciones de la planta para la construcción de un modelo detallado
- Conocer la capacidad de la planta y caracterizar el throughput de producción mediante distribuciones estadísticas, datos muy útiles para realizar la programación de la producción
- Conocer cómo afectan los parámetros de las máquinas que componen la planta a la performance global de la misma
- Encontrar oportunidades de mejora en cada uno de los factores que intervienen en la operación, y evaluar su impacto en el throughput

Sin embargo la parte más rica del proceso se da cuando se compara lo simulado con la realidad. Durante las sucesivas comparaciones entre los resultados que arroja el modelo y los resultados actuales, se encuentran nuevos factores que inciden en la planta que no habían sido modelados en un principio. Muchas veces estos factores permiten descubrir grandes oportunidades de mejora. En el caso analizado en esta investigación se descubrió la incidencia de los cortes de material cuando se investigaba como evolucionaba el WIP a lo largo del tiempo, dado que el comportamiento era muy distinto al que la simulación arrojaba.



## Bibliografía

Bih-Ru Lea y Hokey Min (2003). Selection of management accounting systems in Just-In-Time and Theory of Constraints-based manufacturing. *International Journal of Production Research*, VOL 41, NO. 13, 2879 - 2910.

Boyd, L. y Gupta, M. (2004). Constraints Management, What is the theory?. *International Journal of Operations & Production Management*, VOL 24, pg. 350

Caplan, Dennis (2010). Management Accounting: Concepts and Techniques. Oregon State University, College of Business.  
<http://denniscaplan.fatcow.com/TOC.htm>

Coate, C. J. y Frey, K. J. (1999). Integrating ABC, TOC, and financial reporting. *Journal of Cost Management (July/August)*: 22-27.

Centro de Investigación en Finanzas UTDT , “Índice de Confianza del Consumidor”.  
[http://www.utdt.edu/ver\\_contenido.php?id\\_contenido=2575&id\\_item\\_menu=498](http://www.utdt.edu/ver_contenido.php?id_contenido=2575&id_item_menu=498)  
2

Crandall, R. E. (1998). Production Planning in a variable demand environment. *Production and Inventory Management Journal*, 4<sup>th</sup> quarter 1998; 39, 4; pg. 34

Dugdale, D. y Jones, T.C. (2003). Battles in the costing war: UK debates, 1950–75. *Accounting, Business & Financial History* 13:3 November 2003 305–338

Edwards, J. D. (1958). “This new costing concept – Direct Costing?”; *The Accounting Review*, 1958.

Goldratt E. M. y Cox, J. (1986). *La Meta. Un proceso de mejora continua*. Tercera Edición. Buenos Aires: Granica.

Fredendall ,L. D. y LEA, B. R. (1997). Improving the product mix heuristic in the theory of constraints. *International Journal of Production Research*, 1997, VOL. 35, NO. 6, 1535-1544.

Harling , J. (1957). Simulation Techniques in Operations. *Operations Research* May – June 1958.

Harris (1936). What did we earn last month. *NACA Bulletin*, January: 15

INDEC, Indicador Sintético de la Actividad de la Construcción (ISAC).  
<http://www.indec.mecon.gov.ar/>

Kendall, D.G. (1953). Stochastic Process Occurring in the Theory of Queues. *Ann Math Stat*, VOL 24, 338.

Lloyd y Taylor, J. (2004). WIP Inventory: Asset or Liability?. *Cost Engineering* Vol. 46/No. 8 AUGUST 2004

Monish Madan (2005). Determination of efficient simulation model fidelity for flexible manufacturing systems. *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, No. 2–3, March–May 2005, 236 – 250.

Narayanan, V. G y Sarkar, R.G. (2002). The Impact of Activity-Based Costing on Managerial Decisions at Insteel Industries—A Field Study. *Harvard Business School, Boston, MA 02163*.

Ptak, Carol A. (1988). A comparison of Inventory Models and Carrying Costs. *International Journal of Production Research*; 4<sup>th</sup> quarter 1988; 29,4; pg. 1

Roser, C. , Nakano, M y Tanaka, M (2001). A Practical Bottleneck Detection Method. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*

Schwartz, B. L. (1970). Optimal Inventory Policies in Perturbed Demand Models. *Management Science*, Vol. 16, No. 8, April, 1970.

Spencer, M.S. (1994). Economic theory, cost accounting and theory of constraints: an examination of relationships and problems. *International Journal of Production Research*, 1994, VOL 32, NO. 2, 299 - 308.

Timme, Stephen G. (2003). Total Cost of Holding Inventory. *Council of Logistics Management's newsletter, Logistics Comment*, Volume 38, Mar./Apr. 2004

U.S. International Trade Commission (2010). *Prestressed Concrete Steel Wire Strand from Brazil, India, Japan, Korea, Mexico, and Thailand Investigation*. Investigation Nos. 701-TA-432 and 731-TA-1024-1028 (Review) and AA1921-188 (Third Review). Washington, DC.

U.S. International Trade Commission (2010) *Prestressed Concrete Steel Wire Strand from China*. Investigation Nos. 701-TA-464 and 731-TA-1160. Washington, DC.

Watson, K. J. y Patti, A. (2008). A comparison of JIT and TOC buffering philosophies on system performance with unplanned machine downtime. *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 7, 1 April 2008, 1869–1885.

Willem J Selen (1987). Inventory Cost Definition in an EOQ Model Application. *Production and Inventory Management Journal*; Fourth Quarter 1987; 28, 4; ABI/INFORM Global, pg. 44.