



ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE UNA CONVERTIDORA DE ENVASES FLEXIBLES MEDIANTE EL MODELADO Y SIMULACIÓN DE SUS PROCESOS

ALUMNO: ESTEBAN SANTUCCI

TUTOR: ROBERTO ARTERO

AÑO: 2011

LUGAR: CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES



AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se logró no sólo por mi esfuerzo, sino también gracias a todos aquellos que me brindaron su colaboración, orientación y apoyo para alcanzar mis expectativas respecto a este documento.

En este sentido, quiero agradecer la predisposición de mi tutor, el Mg. Ing. Roberto Artero, para guiarme a lo largo de todo este proceso, en el cual me supo transmitir sus conocimientos y experiencia.

También quiero manifestar mi gratitud a mis compañeros de trabajo que me supieron facilitar la información necesaria para realizar estos estudios y concretar así mi idea de proyecto.

Por último, estoy especialmente agradecido por el apoyo incondicional y la contención de mi familia, pareja y demás afectos, por acompañarme en el largo camino de esta carrera y de elaboración de este proyecto.

Santucci, Esteban.



RESUMEN

En el presente trabajo se aborda el desarrollo, implementación y simulación en computadora de un modelo de las operaciones de conversión de una empresa productora de envases flexibles. Dicha compañía se encuentra inmersa en un mercado caracterizado por un sostenido crecimiento y alto nivel de competencia, situación que le exige concentrarse en mejorar sus procesos e innovar en sus herramientas de gestión para mantener su posición de liderazgo.

La empresa requería estudiar en profundidad el proceso de conversión de envases flexibles; proceso complejo que incluye diversos centros de trabajo, rutas de fabricación distintas según pedido, gran cantidad de variables interrelacionadas y fenómenos dinámicos. Como las herramientas habituales de análisis no pueden satisfacer esta necesidad debido a la complejidad descrita, se ha optado por la simulación de un modelo lógico-matemático del proceso como alternativa de solución.

El modelo dinámico estocástico diseñado permite simular diversos indicadores operativos, con un nivel de error sumamente admisible a los fines prácticos.

Se presentan varias aplicaciones de este simulador, evaluando los efectos operativos de nuevas tendencias en el patrón de demanda, de mejoras de productividad y de una inversión de maquinaria. A partir de ellas se ha arribado a resultados contundentes, comprobando la oportunidad de aumentar la productividad global con la aplicación de algunas de ellas.

Palabras clave: Modelado, Simulación, Operaciones, Capacidad, Producción, Envases.



ABSTRACT

The present work comprises the development, implementation and computer simulation of a model of the production operations in a flexible packaging manufacturing company. This company is in a market characterized by a sharp growth and high level of competition, situation that requires focusing on improving its processes and innovating in its management tools to hold the leadership position.

The company requested a complete analysis of the flexible packaging conversion process, whose complexity includes several work centers, different routings depending on the work order, random factors, great amount of interrelated variables and dynamic phenomena. As the usual analysis tools cannot satisfy this necessity due to the described complexity, the simulation of a logical-mathematical model of the process turned to be a suitable solution.

The designed stochastic and dynamic model allows simulating diverse operative, with a totally acceptable error for practical aims.

Diverse applications of this simulator are presented, evaluating the operative effects of new trends in the demand pattern, of productivity improvements and of equipment investment. From them it has been possible to arrive to strong results, verifying the opportunity to increase the global productivity with the application of some of these practices.

Key words: Modeling, Simulation, Operations, Capacity, Production, Packaging.



INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	8
1.1 – Objetivo e hipótesis	8
1.2 – Alcance.....	9
1.3 – Estado del Arte.....	10
1.4 – Estructura del informe.....	11
CAPÍTULO 2: GENERALIDADES SOBRE MODELADO Y SIMULACIÓN	12
CAPÍTULO 3: INTRODUCCIÓN A LA EMPRESA	16
3.1 – Generalidades de la Empresa	16
3.2 – Instalaciones	16
3.3 – Procesos operativos	16
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL MODELO DEL PROCESO DE CONVERSIÓN	19
4.1 – Objetivo y Alcance del Modelo	19
4.2 – Proceso de Conversión de envases flexibles de la empresa	21
4.3 – Modelo del Proceso de Conversión	25
4.3.1 – Descripción General del Modelo	25
4.3.2 – Variables de Entrada, Parámetros y Variables de Salida.....	27
4.3.3 – Variables y/o parámetros adicionales y algunos ajustes.....	31
4.4 - Implementación del modelo en computadora	33
4.5 – Validación del Modelo.....	40
CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN, APLICACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
5.1 – Casos de aplicación	43
5.1.1 – Variación del mix de estructuras demandado	44
5.1.2 – Mejora de productividad de máquinas	47
5.1.3 – Inversión en maquinaria adicional	52
5.2 – Conclusiones	56
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES FINALES	58
BIBLIOGRAFÍA	60



GLOSARIO

- Abarquillado:** Coincide con el defecto de curling, pero en sentido transversal a la bobina (ver definición de curling).
- ALU:** Aluminio.
- BOPP:** Polipropileno Biorientado
- Cold Seal:** es un adhesivo de contacto que sólo se adhiere a sí mismo. Está diseñado para máquinas de envasado de alta velocidad sin termo contacto. La temperatura es perjudicial porque quema las partículas de cold seal (latex de origen natural). Se adhiere en frío con presión.
- Conversión:** El proceso productivo de conversión de envases flexibles, se refiere a aquél donde los materiales se convierten mediante procesos – como laminación, impresión, etc. – en envases flexibles.
- Coteado (Coating):** es un recubrimiento que se aplica a la superficie de un sustrato. En muchos casos el coteado se aplica para mejorar las propiedades de la superficie del sustrato, como la apariencia, la adhesión, humectabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste y resistencia a los rasguños.
- CPP:** Polipropileno Cast
- Curling:** El curling es un defecto de laminación donde el film laminado se arquea en el sentido longitudinal de la bobina como consecuencia de diferentes intensidades de tensiones entre los sustratos laminados. Esto sucede porque los sustratos durante la laminación son expuestos a esfuerzos diferentes en la máquina laminadora.
- Deslaminación:** Defecto del film en el que los sustratos laminados se despegan. Esto puede ocurrir por varios motivos, como por ejemplo tiempo insuficiente de fraguado, proporción solvente



/ adhesivo incorrecta, composición de la tinta impresa en la cara del sustrato laminado, etc.

- ET: Estructura Técnica
- Gofrado: El sustrato es sometido a presión entre rodillos con diseños en relieve o en hueco. Este recurso es el que permitirá transmitir sobre la superficie del sustrato el dibujo deseado, otorgándole a éste una textura singular.
- OPP: Polipropileno orientado
- PE: Polietileno
- PEBD: Polietileno de baja densidad
- PET: Poliester
- PVC: Policloruro de vinilo
- Superestructuras: son aquellas estructuras que se les aplica Cold Seal.



CAPITULO 1: Introducción

1.1 – Objetivo e hipótesis

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y aplicar herramientas de modelado y simulación en el proceso productivo de una empresa de conversión de envases flexibles, donde los materiales se convierten mediante distintos subprocesos – como laminación, impresión, etc. – en envases flexibles. Mediante la simulación en computadora se pretende fundamentalmente analizar la capacidad de producción bajo diferentes escenarios de demanda, cambios de políticas, inversiones y mejoras productivas.

Debido a la creciente competitividad en el mercado y la dependencia de economías globales, las empresas muestran una tendencia a emplear herramientas cuantitativas cada vez más sofisticadas con el propósito de optimizar procesos, evaluar sus resultados frente a diferentes escenarios y comprender las relaciones entre las variables que afectan su operación, sin incurrir en grandes riesgos, costos ni pérdidas de tiempo.

En particular, el entorno en el que se encuentra inmerso el rubro de conversión de envases flexibles se caracteriza por un mercado con una tasa de crecimiento de alrededor del 7%, por la alta competencia dada por muchos players y los elevados estándares exigidos por el mercado, aspectos que incluso muestran una tendencia creciente. Por lo tanto, bajo tales condiciones del contexto, el objetivo mencionado surge de la necesidad tanto operativa como estratégica de analizar con mayor profundidad la capacidad de producción de la empresa, para así comprender el comportamiento e interrelación de las variables principales y gestionar para potenciar los factores claves de éxito. Esto persigue la eficiencia en las operaciones y el aumento de la rentabilidad, mejorando el nivel de servicio al cliente.

En cuanto a los aspectos estratégicos, la mejora sustancial en la precisión de los planes de producción y, por ende, en el cumplimiento de las entregas debido al uso de una herramienta con fuerte sustento estadístico, promueve el interés de la dirección de la empresa y la confianza de los clientes.

Además, la oportunidad de atender demanda adicional en temporada alta mediante un aumento de la capacidad productiva lograda por ejemplo por una



mejora en la asignación de carga de trabajo a las plantas y máquinas, acentúa el beneficio de llevar a cabo los mencionados estudios.

La hipótesis de partida que se plantea en este trabajo consiste en que la capacidad de producción de envases flexibles varía de forma significativa dependiendo del mix de demanda que acepta la empresa.

En este sentido, a lo largo del presente trabajo se buscará alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Demostrar la existencia de una relación de dependencia entre la capacidad de producción de una convertidora de envases flexibles y el mix de pedidos que recibe
- Simular y evaluar la capacidad de producción bajo un diferente escenario de demanda
- Determinar el impacto en la capacidad en función de ciertos cambios en el mix de demanda
- Analizar la capacidad de producción frente a la mejora de la eficiencia productiva de las distintas etapas del proceso
- Determinar la conveniencia de invertir en maquinaria para aumentar la capacidad de producción

1.2 – Alcance

Este trabajo está enfocado a presentar el desarrollo de un modelo dinámico, discreto, de naturaleza estocástica y con significación estadística, de los procesos de conversión de envases flexibles de una empresa líder en el mercado.

El sistema bajo estudio comprende los procesos de conversión de la empresa en su totalidad, considerando así las distintas plantas que forman parte de la misma con sus características operativas diferentes.



Por otro lado, en pos de simplificar el análisis, se agruparán pedidos en estructuras técnicas¹ similares formando familias de estructuras y se trabajará con la composición del mix de estas familias de estructuras contemplándose en el sistema las categorías de estructuras de mayor representatividad para la compañía.

Por otra parte, no se incluye en este proyecto el estudio de las operaciones de preprensa, grabado de cilindros, producción de film y metalizado de film, ya que son también procesos muy complejos, todos previos al proceso de conversión y además el hecho de no incluirlos prácticamente no altera los resultados ya que no constituyen un cuello de botella para conversión. Ello es cierto porque la apertura del mix de pedidos que se reciben permite reprogramar la carga de trabajo y continuar alimentando las líneas, e incluso se cuenta con proveedores alternativos en caso que las proyecciones de demanda de estas operaciones superen sus capacidades. Asimismo, dichas situaciones en las que la planta se ve obligada a reprogramar alguna línea/máquina por desabastecimiento de alguno de los materiales que proveen esas operaciones, con las consecuentes pérdidas de tiempo productivo, serán modeladas como eventos imponderables que surgen de forma aleatoria con una demora también aleatoria pero que responden a la estadística real de los sucesos.

1.3 – Estado del Arte

En la última época, el modelado y simulación no sólo se siguió utilizando para fines de investigación en las universidades, sino que también comenzó a tomar lugar en el rubro industrial de nuestro país. Sin embargo, aún son escasas las empresas que realmente integran dichas técnicas a sus herramientas habituales de gestión.

En cuanto a los desarrollos previos de la empresa objeto de este trabajo, no se cuenta con evidencia de haberse realizado con anterioridad estudios estadísticos de las capacidades de producción de envases flexibles ni mucho menos se había

¹ Se denomina estructura técnica a la composición técnica del envase, por ejemplo los envoltorios de las galletitas suelen tener una estructura técnica de OPP + OPP, los caramelos PVC, jabón en polvo OPP + PEB, etc. La estructura técnica del envase de los productos responde al propósito de contener, proteger el alimento y conseguir alargar su vida útil, manteniendo sus principales características fisicoquímicas, sensoriales y nutricionales.



desarrollado y simulado por computadora un modelo de sus operaciones de conversión de envases flexibles.

1.4 – Estructura del informe

El **capítulo 1** introduce los objetivos de este trabajo, plantea la hipótesis de partida y define el alcance del estudio.

El **capítulo 2** brinda un marco de referencia respecto de las áreas de conocimiento que se emplean en este informe.

El **capítulo 3** brinda una introducción de la compañía y sus operaciones, y presenta un diagnóstico de su situación y oportunidades de mejora actuales.

De aquí en adelante, el presente informe se enfoca en el desarrollo y aplicación práctica de un modelo de los procesos de producción de envases flexibles, con el fin de simularlo por computadora, generar conocimiento del comportamiento del sistema real y obtener mejoras del mismo. Dichas mejoras se realizan a través de la experimentación y variación de parámetros sobre el simulador. El **capítulo 4** presenta el desarrollo completo del modelo de las operaciones de conversión de la empresa, su parametrización y validación. Trata además la implementación del modelo en computadora. El **capítulo 5** se orienta al análisis de distintos casos de estudio y oportunidades de mejora.

Por último, el **capítulo 6** presenta las conclusiones finales del trabajo y menciona posibles desarrollos futuros en torno al modelo de las operaciones de conversión.



CAPÍTULO 2: Generalidades sobre Modelado y Simulación

El uso del modelado y simulación en computadora se fue difundiendo rápidamente como consecuencia de su capacidad de evaluar situaciones hipotéticas sin poner en riesgo recursos económicos, materiales y humanos. Además esta herramienta permite lograr un ahorro sustancial de tiempo para conocer los resultados de aquellas situaciones que se simulan, respecto del tiempo que insumiría esperar a que los cambios implementados en el sistema real surtan efecto.

Sus aplicaciones tienen un fundamento en aquellos problemas complejos que incluyen factores aleatorios, gran cantidad de variables interrelacionadas y fenómenos dinámicos.

Existe abundante bibliografía en materia de modelado y simulación. A continuación se hará una breve revisión de temas fundamentales para el desarrollo del presente trabajo.

¿Qué es un sistema?

Según Peter Senge, un sistema es una *totalidad percibida cuyos elementos se “aglomeran” porque se afectan recíprocamente a lo largo del tiempo y operan con un propósito común* (Senge, 1998).

En la actualidad el concepto de sistemas se ha introducido en muchas disciplinas a través de la “teoría general de sistemas”.

Lo que es imprescindible destacar del concepto de sistema es que es un conjunto de partes interrelacionadas que forma un “todo”, y que este no puede dividirse en todas sus partes sin la pérdida de sus propiedades.

¿Qué es un modelo?

La denominación modelo se emplea como una idealización de la realidad utilizada para plantear un problema, normalmente de manera simplificada, y planteada desde un punto de vista lógico-matemático o físico.



En otras palabras, un modelo constituye una representación conceptual de un sistema o proceso, con el objeto de analizar su naturaleza y comportamiento, desarrollar o comprobar supuestos y permitir una mejor comprensión del fenómeno real al cual el modelo representa.

Para realizar un modelo es necesario plantear una serie de hipótesis y simplificaciones, de modo que lo que se desea representar esté suficientemente plasmado en la idealización, de forma tan sencilla como sea posible para manipularlo y estudiarlo, y tan compleja como sea necesario para lograr una precisión y consistencia aceptable de los estudios deseados.

Según el pionero en materia de Dinámica Industrial, el ingeniero Jay Forrester del M.I.T.: *el valor de un modelo surge cuando éste mejora nuestra comprensión de las características del comportamiento, en forma más efectiva que si se observara el sistema real. Un modelo, comparado con el sistema verdadero que representa, puede proporcionar información a costo más bajo y permitir el logro de un conocimiento más rápido de las condiciones que no se observan en la vida real* (Forrester, 1972).

Modelos determinísticos y modelos estocásticos

Los modelos matemáticos se pueden clasificar en dos grandes categorías: modelos determinísticos y modelos estocásticos.

En los modelos determinísticos, la información y las relaciones entre variables están libres de riesgo. La calidad de los resultados obtenidos depende directamente de la calidad de la información. En cuanto a la influencia que puedan tener los factores no controlables en la determinación de los resultados de una decisión, este tipo de modelos omite el riesgo introducido por dichos factores.

En los modelos estocásticos, en cambio, una parte (o toda) la información necesaria no se conoce con certeza, y así las cantidades relevantes de las variables de estado que se requieren responden a distribuciones de probabilidad. Con el objeto de generar escenarios que sean representativos del desempeño del sistema real, es esencial que la simulación genere observaciones aleatorias que sigan dichas distribuciones, en vez de utilizar sólo los valores medios.



¿Para qué se utiliza la Simulación en computadora?

La simulación es una técnica de experimentación en que se usan modelos lógico-matemáticos (Gallagher et al, 1996).

Desde hace tiempo y, potenciada por el desarrollo de las computadoras, la técnica de simulación ha ido desarrollándose como una importante herramienta para el diseño y análisis de sistemas. Dada su gran versatilidad, ha logrado una amplia e innumerable cantidad de aplicaciones, como el diseño y operación de sistemas de colas, la administración de sistemas de inventarios, gestión de proyectos bajo incertidumbre, diseño y operación de sistemas de manufactura, análisis de riesgo financiero, etc.

Su ventaja fundamental consiste en que permite evaluar situaciones hipotéticas sin poner en riesgo recursos económicos, materiales y humanos; además permite lograr un ahorro sustancial de tiempo para conocer los resultados de aquellas situaciones que se simulan, comparado con el tiempo que insumiría esperar a que los cambios implementados en el sistema real surtan efecto. De hecho, con esta técnica se pueden simular en pocos minutos de una computadora los resultados de días, meses e incluso años de operación para explorar los efectos de distintas políticas.

Las simulaciones en el ámbito industrial se realizan en general con el propósito de mejorar el comportamiento del sistema bajo estudio, o bien de diseñar uno completamente nuevo. *En muchas aplicaciones en las que se han desarrollado modelos de simulación es natural pensar en términos de ajustar los parámetros del modelo para mejorar el desempeño del sistema. Cuando se encuentran conjuntos adecuados de parámetros para el modelo se los puede utilizar para mejorar el desempeño del sistema actual (Anderson et al, 1993).*

De todos modos, cabe destacar que *la simulación es una técnica por naturaleza imprecisa. Proporciona sólo estimaciones estadísticas y no resultados exactos, y compara alternativas más que generar una óptima (Hillier et al, 2002).*

Simulación de eventos discretos y simulación continua

En materia de simulación, puede realizarse una distinción en dos grandes categorías: simulación por eventos discretos y simulación continua.



En una simulación por eventos discretos, los cambios en el estado del sistema ocurren de manera instantánea en puntos aleatorios del tiempo como resultado de la ocurrencia de eventos discretos (Hillier et al, 2002). Este tipo de simulaciones se basa, en general, en modelos estocásticos.

En una simulación continua los cambios en el estado del sistema ocurren continuamente en el tiempo (Hillier et al, 2002). Las simulaciones de este tipo suelen requerir ecuaciones diferenciales para describir las tasas de cambio de las distintas variables de estado del sistema.



CAPÍTULO 3: Introducción a la Empresa

3.1 – Generalidades de la Empresa

La empresa cuenta con más de 45 años de trayectoria abocada a la conversión de envases flexibles, logrando un posicionamiento de liderazgo en la industria Argentina y como un importante referente en la región, estando siempre a la vanguardia de los últimos avances tecnológicos para ofrecer lo más altos estándares de calidad.

Su cartera de clientes se encuentra muy diversificada, abasteciendo envases de líneas de alimentos en general (congelados, lácteos, fiambres), productos de higiene (cuidado del hogar, de la ropa), golosinas (caramelos, chicles), chocolates (bombones, tabletas), productos de panadería (alfajores, galletas), medicamentos, etc.

3.2 – Instalaciones

La infraestructura de la empresa está compuesta por tres plantas de conversión localizadas geográficamente en ciudades diferentes.

Además de dedicarse a la conversión de envases flexibles, uno de los predios posee una planta de extrusión de PVC, equipo para metalizado de films y una planta de grabado de cilindros (insumo principal de las impresoras de huecograbado).

El proceso de conversión de envases flexibles consiste básicamente en tres etapas: Impresión, Laminación y Corte. Además, para algunas estructuras particulares, se agregan las etapas de Vinchado, Parafinado y/o Metalizado.

3.3 – Procesos operativos

La principal actividad de la empresa consiste en producir envases flexibles. El entorno de producción con el que se trabaja es fundamentalmente *'make-to-order'*, en el que básicamente ingresan los pedidos de los clientes, entran en un proceso



de autorización, se programa su producción, se producen las bobinas de envase flexible y se entregan a los clientes.

Las grandes etapas del proceso de producción de envases flexibles propias de la empresa son (ver esquema en Figura 1):

- Preprensa: evaluación y adaptación del arte requerido por los clientes según aspectos meramente productivos relativos al grabado de cilindros e impresión del film.
- Grabado de cilindros: se realizan una serie de etapas para recuperar los núcleos de los cilindros no vigentes o desgastados y alistarlos para su grabado. Es esta gran etapa la que abastece a las máquinas impresoras de cilindros de huecograbado.
- Producción de PVC: extrusión de films de PVC.
- Metalizado: proceso que le confiere al film el aspecto metalizado y las propiedades en general del aluminio.
- Conversión: proceso compuesto por varias etapas desde la impresión del film hasta el corte de la bobina en módulos, palletizado y embalaje.

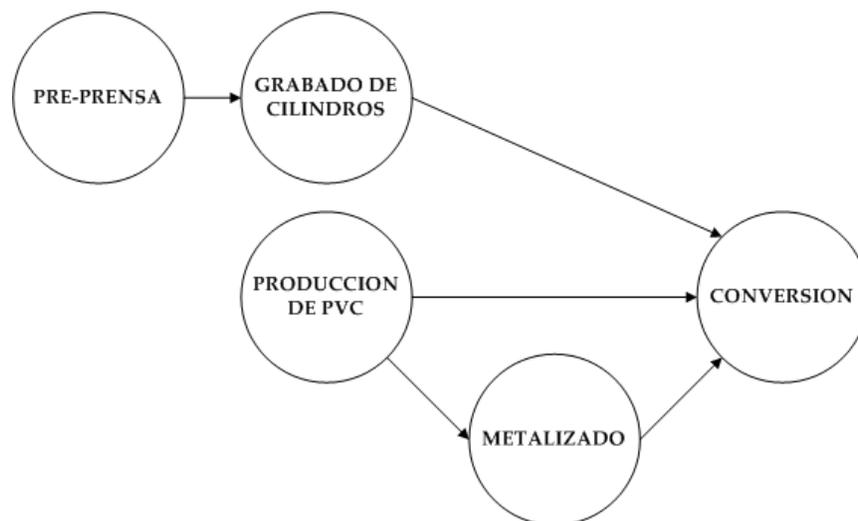


Figura 1. Esquema de las etapas del proceso global de producción de envases flexibles que son propias de la empresa.



Tal como se mencionó previamente en la sección “1.2 – Alcance”, el presente trabajo pretende estudiar sólo los procesos de conversión de esta empresa.

El proceso de conversión consiste en una serie de etapas o centros de trabajo en los cuales se realizan operaciones diferentes. Dependiendo de las especificaciones de los pedidos aceptados que ingresan al proceso, los mismos pueden seguir diferentes rutas de fabricación, es decir que la sucesión de centros de trabajo puede variar, saltando algunos centros e incluso asignándose distintas máquinas dentro de cada uno de ellos. Como resultado de esta característica de ruteos variables que poseen los pedidos en función de su estructura técnica y demás variables operativas, el cuello de botella podría transferirse en el tiempo de una etapa a otra del proceso dependiendo ello de los patrones de demanda y su apertura en mix de estructuras técnicas.

Tras sus más de 45 años de trayectoria, la empresa se encuentra atravesando una etapa de fuerte crecimiento en un contexto de expansión del volumen de mercado.

En esta situación, sus desafíos operativos crecen a la par del negocio, y toda ventaja competitiva que desarrolle es un paso adelante para alcanzar el éxito en un mercado con alta competencia.



CAPÍTULO 4: Desarrollo del Modelo del Proceso de Conversión

Como resultado de la competencia agresiva del rubro y las nuevas tendencias del mercado, la gerencia desea evaluar otros escenarios en lo referente al proceso de conversión. Sin embargo, los puntos bajo estudio no son de fácil resolución.

¿Cómo impactaría en la productividad de las plantas cierto cambio en el mix de estructuras demandado? ¿Cómo variaría en ese caso la contribución por hora de operación de cada planta? En ese caso, ¿las restricciones de capacidad se transfirieron de una etapa a otra? ¿Sería conveniente invertir en mejoras de productividad o adquisición de máquinas? Por otra parte, si los pedidos de ciertas estructuras se programaran de otro modo distinto al actual, ¿se ahorrarían horas de planta para lograr igual cantidad de despachos? Y en ese caso, ¿cuántas?

Mediante el empleo adecuado de la herramienta de simulación, la gerencia puede obtener respuestas a estas y otras situaciones hipotéticas, sin poner en riesgo recursos económicos y materiales, y sin tener que esperar semanas o meses para evaluar si una determinada política tiene el efecto deseado sobre las plantas y sus niveles de facturación.

En este capítulo se describirá el desarrollo del modelo del proceso de conversión de la empresa que permitirá, luego, realizar simulaciones para responder esas preguntas y evaluar distintas alternativas tendientes a mejorar la utilización de la capacidad instalada.

4.1 – Objetivo y Alcance del Modelo

El objetivo del modelo es proporcionar, frente a una demanda caracterizada según su mix de estructuras y acorde a una programación determinada, los resultados de los indicadores operativos de la empresa a nivel global y con una apertura por planta, centro de trabajo y máquina.

El modelo abarca el proceso de conversión de la empresa, desde la recepción de los pedidos, pasando por los diversos centros de trabajo, y hasta que son despachados a los clientes. Se modela fundamentalmente la generación de pedidos, su programación y producción (impresión, laminación, vinchado,



parafinado y corte), el tiempo de operación, el volumen en Kg y metros lineales de producción y sus niveles de *scrap* en cada etapa y totales.

El modelo no incluye los procesos de metalizado, preprensa, grabado de cilindros y producción de PVC.

Dada la gran diversidad de estructuras que la empresa ofrece, se modelarán todas ellas agrupadas en 20 (veinte) familias de estructuras que presentan condiciones similares en cuanto a características de los materiales, rutas de fabricación (asignación a plantas y máquinas), velocidades de operación y niveles de scrap. A modo de ejemplo se mencionan algunas: OPP + PEB, PET + PEB, tr laminado imp. en PET, ALU compuesto, Superestructura, etc.

Cabe destacar que se modelan también los casos de desabastecimiento imprevistos de insumos – cilindros – y de materias primas – bobinas de film primario, tintas, adhesivos – así como también las paradas correctivas y preventivas de máquina y otros casos. Su importancia recae en el perjuicio que la falta de los insumos y materias primas acarrea en el piso de planta cuando se los necesitan. Por lo tanto, se ha modelado la generación de eventos imponderables que responden a la frecuencia y duración de estos casos para representar mejor la realidad.

En resumen, como se muestra en la Figura 2, el modelo comprende:

- Plantas modeladas: “1”, “2” y “3”, que son la totalidad de las instalaciones de la empresa.
- Demanda modelada: familias de estructuras con características similares que representan el 100% de los pedidos que recibe la empresa.
- El proceso de conversión de envases flexibles a partir de la recepción de los pedidos, incluyendo su programación y asignación a plantas y máquinas, su operación en cada centro de trabajo y los eventuales desabastecimientos de materias primas e insumos, paradas correctivas y preventivas de las máquinas que el sistema pueda experimentar.

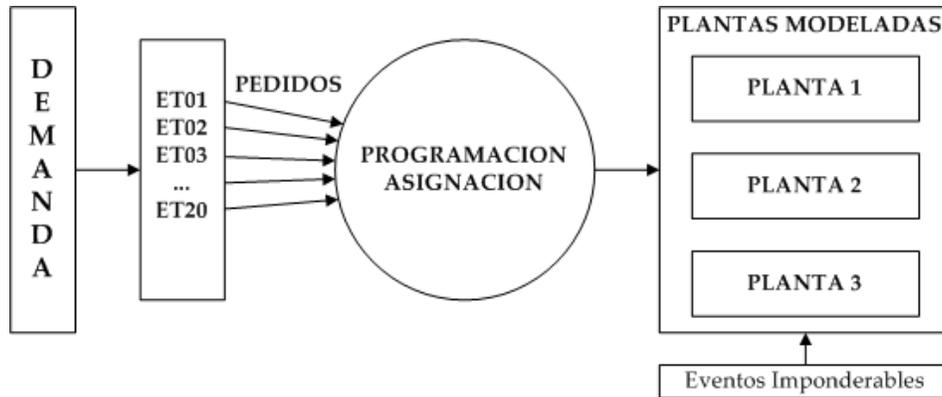


Figura 2. Esquema del alcance del modelo.

4.2 – Proceso de Conversión de envases flexibles de la empresa

Una convertidora de envases flexibles imprime y/o lamina una o varias veces materias primas como polipropileno, polietileno, papel, aluminio, poliéster, pvc y poliamida entre otras, también aplica ceras o realiza procesos de terminación como gofrado o coteado (remitirse al glosario para su definición).

El proceso completo de conversión consiste en una serie de etapas, algunas de las cuales son anteriores a la parte meramente operativa, como la recepción de pedidos y programación de la producción. Una vez superadas las mismas, las órdenes de trabajo programadas (OTs) son enviadas a los centros de trabajo en los cuales se realizan operaciones diferentes. Dependiendo de sus especificaciones, la sucesión de centros de trabajo para cada OT puede variar, saltando algunos centros de trabajo e incluso asignándoseles distintas máquinas dentro de cada uno de ellos.

Recepción de pedidos y programación de la producción

Los pedidos de los clientes ingresan a la compañía por tres vías: mail, fax o directamente por el sistema.

Una vez ingresados y autorizados los pedidos, se confirma o renegocia la fecha de entrega del pedido en función de la disponibilidad de materias primas y cilindros y la capacidad de producción disponible para la semana correspondiente.



Por último, se programan en planta secuenciando los pedidos dentro de períodos semanales según la disponibilidad actual y esperada de materias primas y cilindros, además de considerar también otros criterios operativos.

Como output del proceso, se emiten a planta las OTs para iniciar el proceso productivo de conversión de envases flexibles.

Impresión

El proceso de producción para una OT, que en virtud de sus especificaciones debiera pasar por todos los centros de trabajo, en primera instancia ingresaría al centro de trabajo *Impresión*.

En este centro de trabajo se le imprime de forma continua a la bobina del film virgen el arte del envase aprobado por el cliente en la etapa de pre-prensa. La tecnología de impresión utilizada es de huecograbado (ver Figura 3). Las máquinas impresoras que componen este centro de trabajo varían en sus velocidades de impresión dependiendo de una serie de variables: el sustrato especificado en la OT, la antigüedad de la máquina, condiciones ambientales (temperatura y presión), maquinista, etc.

Dentro de este centro de trabajo, y dependiendo de la planta, hay máquinas impresoras capaces de aplicar cold seal al sustrato sujeto a impresión. El cold seal es un adhesivo que permite el sellado del flexible en frío. En general es requerido por aquellos clientes y productos cuya velocidad de envasado es muy alta, lo que impide alcanzar altas temperaturas de sellado. Este tipo de trabajos que requieren la aplicación de cold seal son llamados Superestructuras.

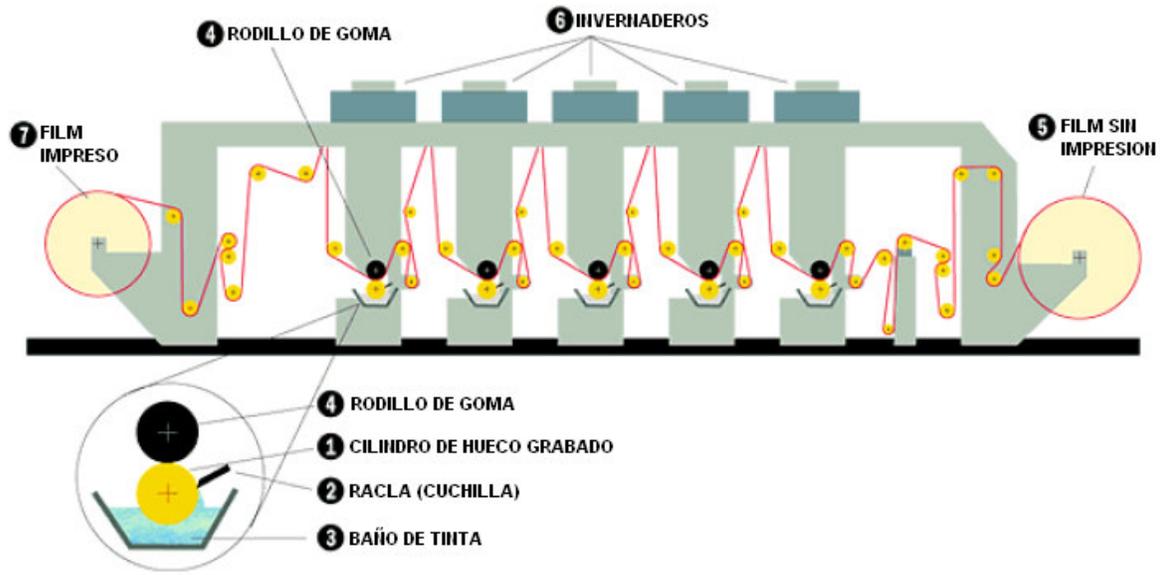


Figura 3. Diagrama explicativo de una máquina impresora de huecograbado.

Laminación

Luego, el film impreso pasa al siguiente centro de trabajo donde se lamina el sustrato impreso con otro/s sustrato/s hasta lograr las barreras (de oxígeno, humedad, etc.) que requiere el producto a envasar. Este centro de trabajo se trata de la *Laminación*, donde por medio de un adhesivo (con o sin base solvente) se pegan dos capas de sustratos (ver Figura 4). En la jerga del rubro, se denominan bilaminados a los films que han sufrido una etapa de laminación, trilaminados a los que sufrieron dos laminaciones y tetralaminados a los que tienen tres laminaciones. En general se los puede especificar como multilaminados.

En este centro de trabajo, las OTs pueden asignarse a laminadoras con o sin base solvente, dependiendo del sustrato que se lamina y/o de la etapa de laminación.

Además, existen laminadoras que se encuentran integradas a las impresoras, esto implica que las máquinas impresoras cuentan con la opción de laminación en línea del sustrato impreso con otro sustrato.

Por último, la bobina del film laminado debe colocarse en un depósito intermedio un cierto tiempo para fines de fraguado y así evitar defectos de deslaminación,



curling y abarquillado (remitirse al glosario para su definición) por baja solidificación del adhesivo.

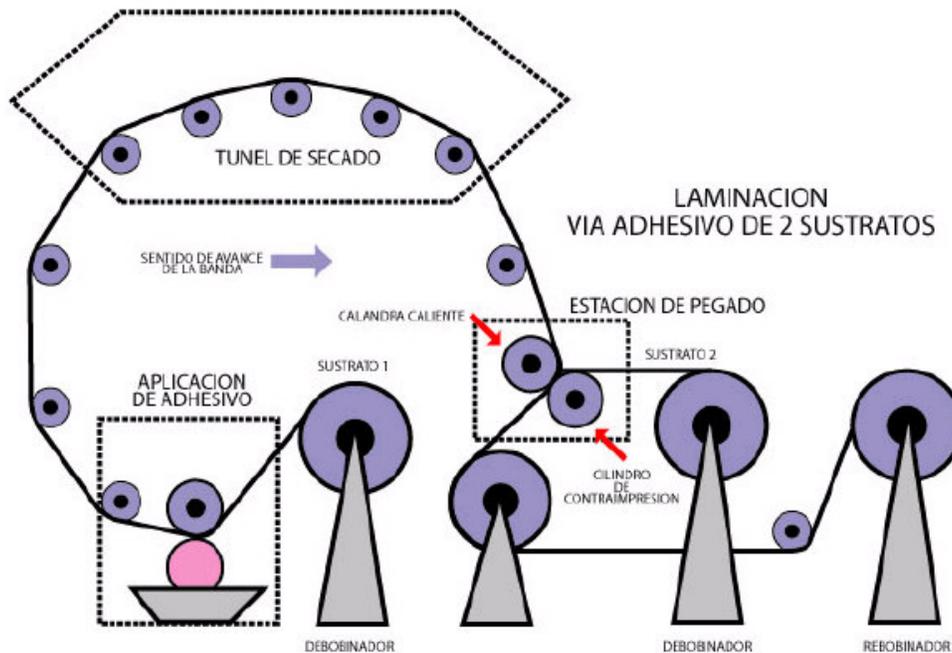


Figura 4. Diagrama explicativo de una máquina laminadora.

Vinchado

A continuación, la OT puede pasar por el centro de trabajo *Vinchado* donde se le pega al film una vincha de aluminio utilizando como adhesivo una cera especial.

Parafinado

El *Parafinado* consiste en la aplicación de parafina, cera o 'hotmelt' a una o ambas caras del flexible para fines de no adhesión con el producto, por ejemplo: yogures, caramelos, chicles, etc.



Corte

Por último, se corta la bobina de flexible en un número entero de partes iguales (módulos) y que depende de la especificación solicitada por el cliente. Luego, se palletiza, embala y despacha al cliente, cuando así corresponde.

4.3 – Modelo del Proceso de Conversión

Una vez mencionados en la introducción de este capítulo algunos objetivos relacionados con el modelo a desarrollar y la explicación posterior del proceso real, se continúa con la etapa específica de desarrollo del modelo.

Para ello, se parte por una descripción general de este modelo lógico-matemático, indicada en la sección 4.3.1. Del entendimiento del sistema sujeto a estudio se desprende la estructuración del modelo, configurando un mapa funcional que se detalla en la misma sección y que esquematiza la relación entre las partes (módulos) fundamentales. Luego, en la sección 4.3.2 se definen las variables de entrada y de salida, así como también los parámetros con los que cuenta el modelo, y otros adicionales complementando con algunos ajustes en la sección 4.3.3.

4.3.1 – Descripción General del Modelo

El modelo desarrollado recae dentro de la categoría de modelos dinámicos ya que los procesos estudiados evolucionan en el tiempo. Además, el modelo es discreto porque representa la evolución del sistema por pasos, y no en forma continua respecto del tiempo. Por último, como la información es imperfecta y las variables de estado que se analizan responden a distribuciones de probabilidad, el modelo es estocástico.

Esencialmente, el modelo consta de cinco componentes principales, como muestra el esquema funcional del modelo en la Figura 5:

- Input (variables de entrada, parámetros e inicialización)
- Generador aleatorio de pedidos
- Plantas de Conversión



- Programación / Asignación
- Output (variables de salida, indicadores)

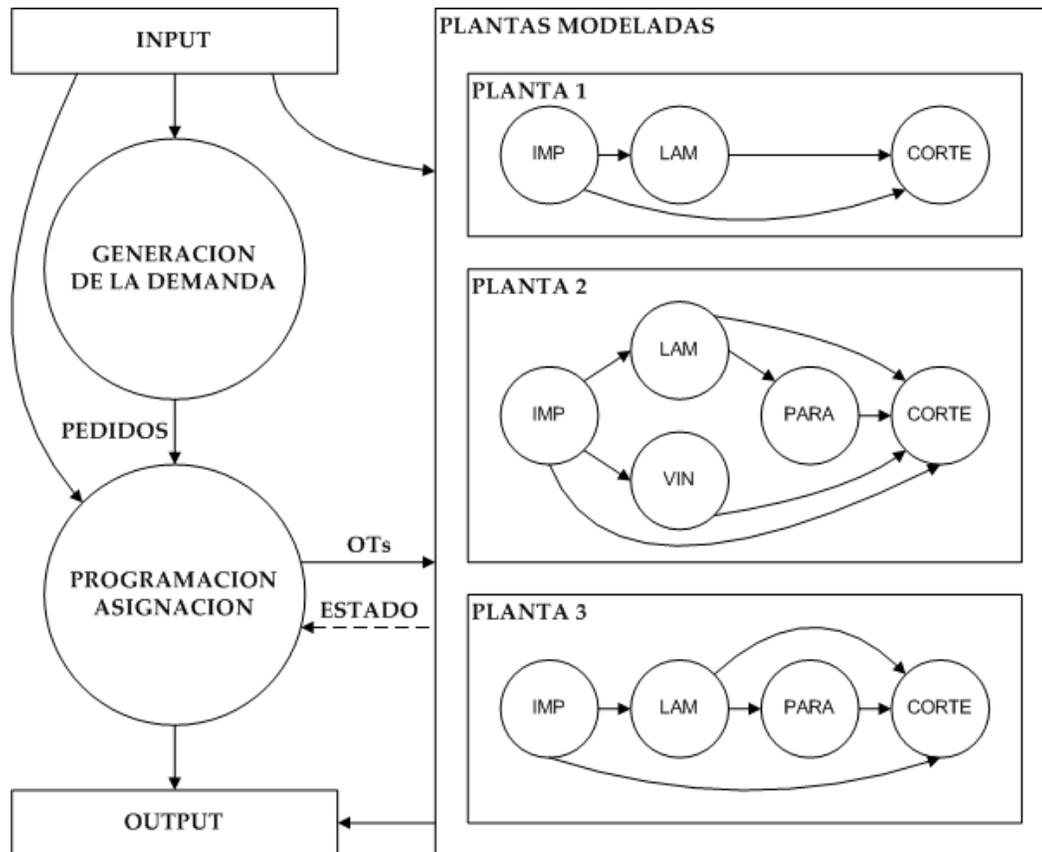


Figura 5. Esquema funcional del modelo

En la función de *Input* se establecen los parámetros de la condición a simular, parámetros propios del modelo y se inicializan todas las condiciones de las plantas y máquinas.

La función del *Generador* es entregar pedidos de manera aleatoria, pero conservando la estadística real. Los pedidos así generados deben ser función del mes y tener las características necesarias para producir la bobina de flexible (estructura, cantidad solicitada, fecha de entrega prometida).



La generación descrita constituye la entrada para las operaciones de la empresa. Con estos pedidos deben tomarse decisiones operativas, ejecutadas por la función de *Programación*. Estas decisiones se traducen en Órdenes de Trabajo (OTs) que involucran la asignación de plantas y máquinas. Estas OTs, sumadas a las acciones operativas que ellos permiten (impresión, laminación, corte, etc.), van modificando el estado de las plantas, entendido como las posiciones y estado de ejecución de pedidos y la carga de trabajo de las máquinas. Las OTs, por su parte, están sujetas a las características productivas de las plantas y máquinas y de la estructura técnica de los pedidos, que le imponen restricciones de velocidad de operación, tiempos de fraguado, rutas de fabricación, factores de *scrap*, etc.

Para un conjunto dado de pedidos con un patrón de demanda predefinido y manteniendo la heurística de programación habitual, interesa observar la eficacia y eficiencia de esas decisiones; es decir, si los pedidos son completados o no, con qué niveles de productividad se los lleva a cabo y cuál es la utilización de las máquinas que se emplean para completarlos. Es decir, estas decisiones pueden calificarse observando un conjunto de indicadores que ellas generan, como las toneladas de flexible producidas (total y por estructura), el tiempo de espera promedio y la eficiencia productiva de cada máquina, su velocidad promedio de operación y otros.

4.3.2 – Variables de Entrada, Parámetros y Variables de Salida

En la Figura 6 se incluyen las variables de entrada, parámetros y variables de salida junto con el esquema funcional del modelo. En ella se señalan los módulos donde las variables de entrada y parámetros son ingresados y de dónde se obtienen los indicadores de resultado.

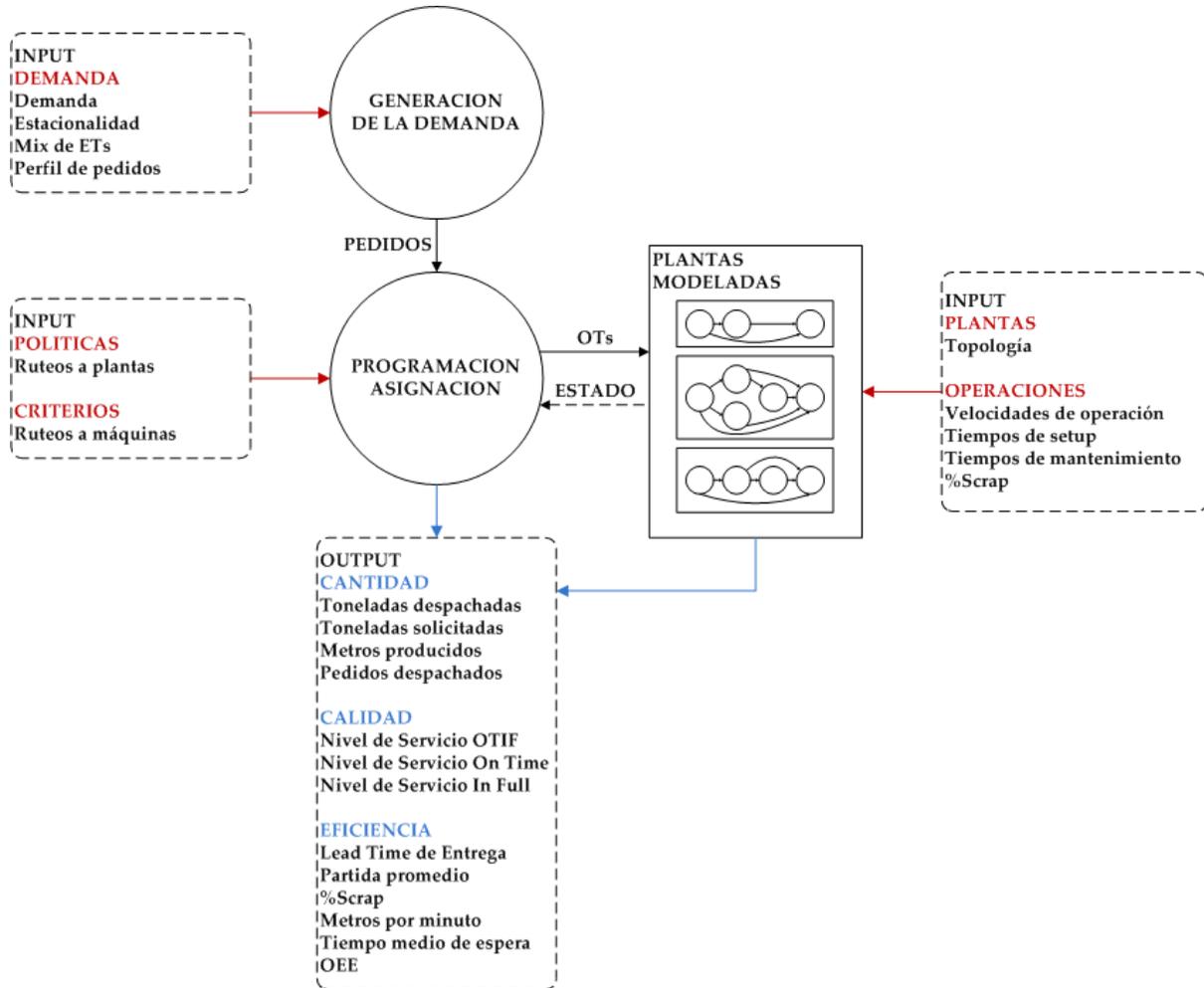


Figura 6. Esquema funcional del modelo con los inputs y outputs.

Las *variables de entrada* (Tabla I) caracterizan los factores externos del escenario que se pretende simular, y ciertos elementos de políticas y tácticas de la empresa. Son variables generadas con independencia de las variables internas del modelo, y pueden ser tanto exógenas (por ej. relacionadas con la demanda) como endógenas (por ej. turnos de operación, programación de pedidos).



Variable de Entrada	Observaciones
Mes	Mes en el que opera el sistema.
Tasa de arribo de pedidos del mes	Frecuencia de arribo de pedidos a la que se espera que ingresen al sistema en el mes señalado.
Turnos de trabajo	Cantidad de turnos que las plantas operan.
Tipo de Estructura del Pedido	Familia de Estructuras técnicas a la que pertenece el pedido.
Volumen del Pedido	Tamaño del pedido en Kg.
Programación de Pedidos a Plantas	Asignación de pedidos a las Plantas.
Programación de Pedidos a Máquinas	Heurística de programación de pedidos a las máquinas de la planta asignada.
Factor operativo de Scrap	Factor de incremento de la cantidad inicial a producir de cada pedido en concepto del <i>scrap</i> esperado de producción.
Factor de Imponderables	Frecuencia de generación y tiempos de duración de eventos no productivos por máquina (mantenimiento preventivo y correctivo, falta de materias primas, insumos, etc.)

Tabla I. Variables de Entrada del modelo.

En cambio, los *parámetros* configuran la forma en la que el sistema responde a los estímulos recibidos (pedidos ingresados con diversas características), es decir que son los coeficientes y factores de las “funciones de transferencia”, es decir, de las relaciones matemáticas que explican cómo se transfieren las condiciones de entrada a la salida.

Los parámetros fundamentales del modelo son todos aquellos relacionados con la operatoria de las plantas y el tiempo de operación de las máquinas. Estos se muestran en la Tabla II.



Parámetro	Símbolo y Dominio	Unidades	Observaciones
Velocidad media de operación	$V_m \geq 0$	m/min	Por máquina y tipo de estructura.
Desvío estándar de la velocidad media de operación	$\sigma_{V_m} > 0$	m/min	Por máquina y tipo de estructura.
%Scrap promedio	$S\% \geq 0$	%	Por máquina y tipo de estructura.
Desvío estándar del %Scrap promedio	$\sigma_{S\%} > 0$	%	Por máquina y tipo de estructura.
Factor de conversión de Kg a Metros Lineales	$E_q \geq 0$	m/Kg	Por tipo de estructura y planta.

Tabla II. Parámetros de Plantas del modelo.

Las *variables de salida* representan los resultados de las funciones de transferencia del modelo. En este modelo, se muestran a través de indicadores de resultado que son de interés de estudio acorde al objetivo planteado. Las variables de salida del modelo son las que se indican a continuación en la Tabla III.

Variable de Salida	Símbolo y Dominio	Unidades	Observaciones
Toneladas Despachadas	$T_nProd \geq 0$	Tons	Global, por planta, centro de trabajo, máquina y tipo de estructura.
Toneladas Solicitadas	$T_nSolic \geq 0$	Tons	Global, por planta, centro de trabajo, máquina y tipo de estructura.
Metros Producidos	$MtsProd \geq 0$	Km	Global, por planta, centro de trabajo, máquina y tipo de estructura.
Pedidos Despachados	$Ped \geq 0$	Adimens.	Global, por planta, centro de trabajo y máquina y tipo de estructura.



Nivel de Servicio (OTIF)	NS	%	Global y por planta.
Lead Time de Entrega	$LTE \geq 0$	Días	Global y por planta.
Partida Promedio	$KgPP \geq 0$	Kg	Global, por planta, centro de trabajo y máquina y tipo de estructura.
%Scrap	$\%Scrap \geq 0$	%	Global, por planta, centro de trabajo y máquina y tipo de estructura.
Metros por minuto productivo	$Mts/min \geq 0$	m/min	Global, por planta, centro de trabajo y máquina.
Tiempo Medio de Espera	$t_{ME} \geq 0$	Hs.	Por centro de trabajo y máquina.
Tasa de Rendimiento	$Rend \geq 0$	%	Global, por planta, centro de trabajo y máquina.
Tasa de Disponibilidad	$Disp \geq 0$	%	Global, por planta, centro de trabajo y máquina.
Tasa de Calidad	$Cal \geq 0$	%	Global, por planta, centro de trabajo y máquina.
OEE (Overall Equipment Effectiveness)	$OEE \geq 0$	%	Global, por planta, centro de trabajo y máquina.

Tabla III. Variables de Salida del modelo.

4.3.3 – Variables y/o parámetros adicionales y algunos ajustes

Cabe destacar que, además de las variables y/o parámetros mencionados en la sección precedente, pueden modificarse otros parámetros tomados como default por el modelo y que también pueden ser ingresados externamente. Estos parámetros son resultado de la estadística tomada del año 2010, del criterio empírico del área de planificación o de datos técnicos.

A continuación se listan las diversas tablas de variables y/o parámetros:

- La tasa de generación de pedidos en función del mes: tiene por objeto describir patrones de demanda mensuales consistentes con la realidad. Impacta en el módulo de Generación de la Demanda. La tasa de



generación de pedidos es básicamente el ratio entre la cantidad de pedidos generados en el mes x del 2010 y la cantidad de horas laborables en ese mes. La tasa que se obtiene describe la cantidad de pedidos por hora laborable.

- La tabla de equivalencia de Kg a metros lineales para las distintas familias de estructuras: a los efectos de cambio de unidades, determinación de tiempos de operación y cálculo de indicadores.
- La tabla de tiempos de operación por máquina y familia de estructura:
Al activar el modo estocástico de simulación, los valores de estos tiempos se los afecta con una distribución de probabilidad que mejor ajusta la estadística de los datos reales. Esta distribución es la Beta Generalizada que cuenta con dos parámetros de forma, un valor mínimo y uno máximo. Entonces, la media determinística se multiplica por el valor arrojado por esta distribución, y el valor total es dividido por la relación entre la media y la moda.

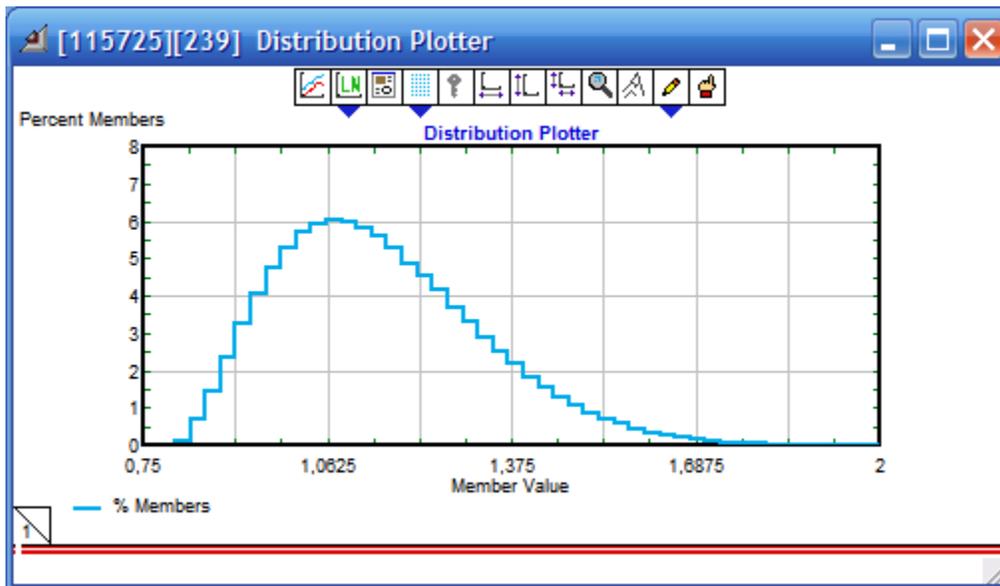


Figura 7. Gráfico de ajuste de datos con una distribución Beta Generalizada



Se optó por utilizar distribuciones beta para ajustar los tiempos de operación y mantener la relación entre la moda (el valor más frecuente) y la media, considerando que los valores que se utilizan normalmente en Operaciones corresponden a la moda.

Sin embargo, se observa que en temporada alta las velocidades de operación son algo más rápidas, probablemente debido a la exigencia de la temporada. Por ello, se utiliza un valor algo menor de la relación media/moda, considerándose el valor más representativo.

Esta forma de cálculo responde perfectamente a la manera en que se adimensionalizaron los datos, tal que se puedan correr fácilmente la simulación en ambos modos (Determinístico y Estocástico).

- La tabla de porcentajes de scrap por máquina y familia de estructura: Asimismo, con los porcentajes de scrap se procedió de manera similar que con los tiempos explicados precedentemente en lo que respecta a la determinación de sus valores estocásticos. Ellos fueron analizados y recogidos de la estadística real y se ajustaron con la distribución Beta Generalizada.

4.4 - Implementación del modelo en computadora

Con el propósito de realizar diversos estudios del sistema real empleando la simulación del modelo del proceso de conversión, se utilizó el software **Extend™ versión 6.0.7**. Este software de simulación está diseñado para manejar simulaciones de procesos industriales y con la envergadura y complejidad que presentan los procesos de esta empresa de producción de envases flexibles.

Por medio de este software, la implementación del modelo se realiza programando bloques, los cuales se encargan de ejecutar ciertas funciones o instrucciones. Estos bloques se encuentran interconectados entre sí e intercambian ítems y señales.

Los ítems son objetos virtuales que representan, por ejemplo, a un pedido o a una OT, y que tienen atributos tales como la fecha de entrega prometida o la cantidad de Kg a producir. Las señales, en cambio, son valores escalares que se transmiten entre bloques, transfiriendo información. Los bloques inteligentes realizan acciones de acuerdo a los ítems y las señales que reciben.



No sólo se han utilizado los bloques estándar que ofrece el software sino que además se han diseñado y creado numerosos bloques con propósitos específicos del modelo industrial desarrollado. Estos bloques han sido construidos a los efectos de estructurar adecuadamente el diseño, simplificar la etapa de validación funcional del modelo y la visualización del modelo completo.

En cuanto a la estructura que se menciona en el párrafo anterior, el simulador se ha diseñado y programado en capas que representan el incremento del nivel de detalle en la programación al ascender el número de capas. La Figura 8 representa esquemáticamente el diseño en capas descrito.



Figura 8. Esquema de implementación del modelo en el software de simulación.

Entonces, fundamentalmente se distinguen tres capas:

1. En la primera capa se estructura el simulador en concordancia con el esquema funcional del modelo con sus principales componentes (módulos), sus vinculaciones y la interfaz con el usuario. Es en esta capa donde se llevan a cabo las interacciones con el usuario: se ingresan los inputs y leen los outputs de la simulación. Su pantalla es la mostrada en la Figura 9.

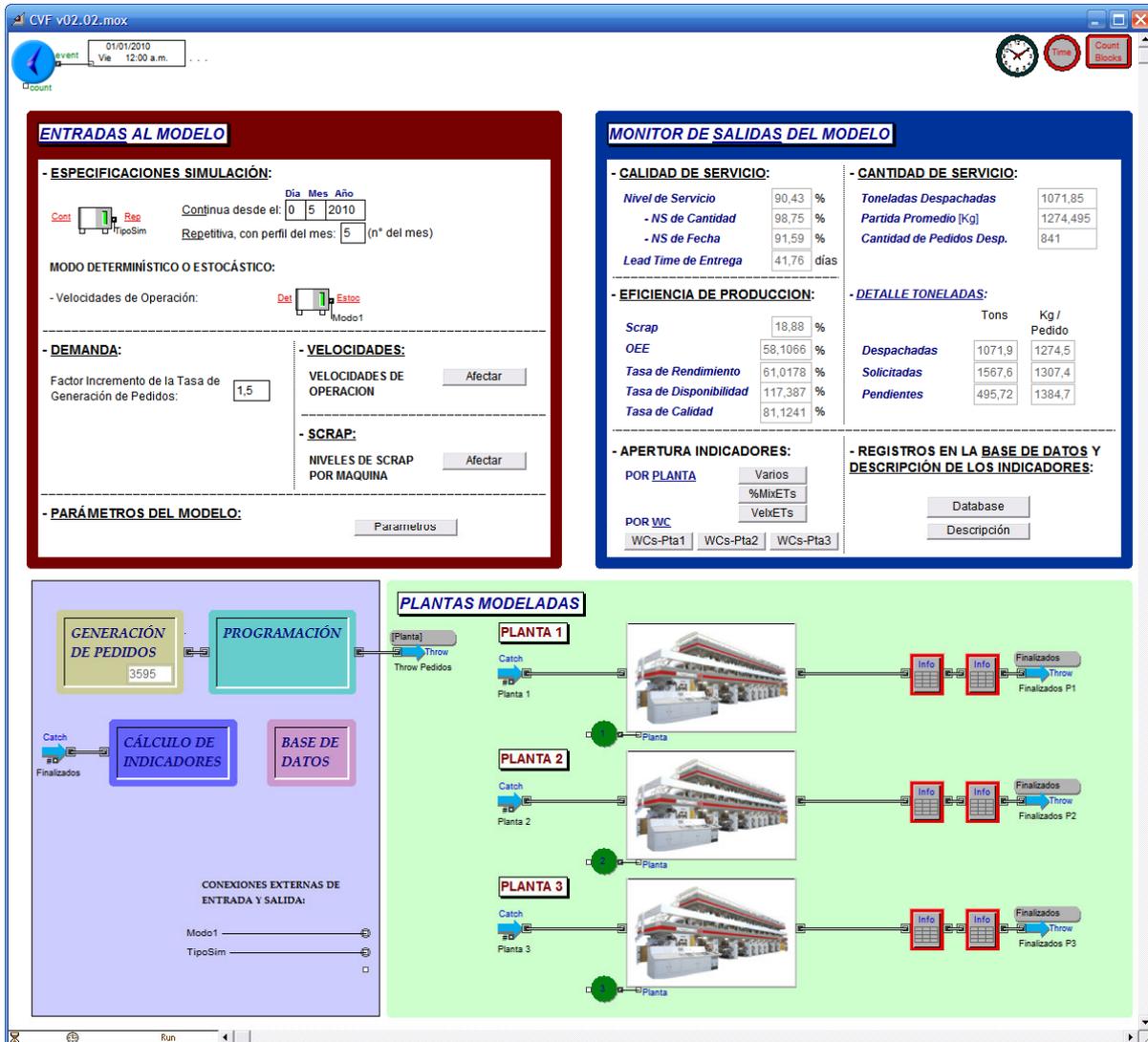


Figura 9. Vista general de la pantalla principal del simulador.

El sector indicado como *Entradas al Modelo* es donde se ingresan las variables de entrada y los principales parámetros de la simulación. En la Figura 10 se muestra una ampliación del mismo.



ENTRADAS AL MODELO

- ESPECIFICACIONES SIMULACIÓN:

Cont TipoSim Rep Continua desde el: Día Mes Año
0 5 2010
Repetitiva, con perfil del mes: 5 (n° del mes)

MODO DETERMINÍSTICO O ESTOCÁSTICO:

- Velocidades de Operación: Det Estoc Modo1

- DEMANDA: Factor Incremento de la Tasa de Generación de Pedidos: 1,5

- VELOCIDADES: VELOCIDADES DE OPERACION

- SCRAP: NIVELES DE SCRAP POR MAQUINA

- PARÁMETROS DEL MODELO:

Figura 10. Panel de Entradas del Modelo (INPUTs).

Una parte clave del modelo son sus salidas: ellas representan las variables de interés de estudio, el objeto que justifica los esfuerzos de desarrollo. Por tal motivo, se otorgó especial atención a la forma de presentar y registrar tales resultados, que se muestra en la Figura 11.

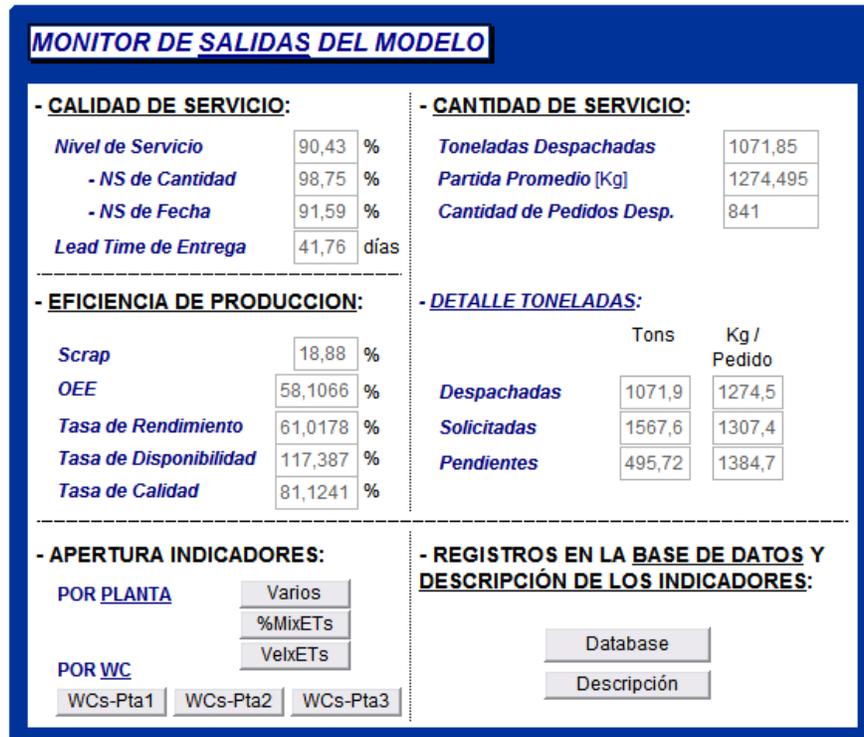


Figura 11. Panel de Salidas del Modelo (OUTPUTs).

Tomando como ejemplo el módulo de las Plantas, aquí las plantas son únicamente un componente o módulo en la pantalla principal del simulador para luego ser desagregado en una segunda capa en los elementos Centros de Trabajo.

2. La segunda capa describe el nivel de sistemas y tiene que ver esencialmente con la funcionalidad de los módulos, inicialización de variables y cálculo de indicadores. Este nivel se estructura fundamentalmente en base a bloques jerárquicos.

Los bloques jerárquicos son bloques diseñados que agrupan bloques estándar del software. Ellos fueron diseñados y creados para cumplir con propósitos específicos del modelo desarrollado. Las ventajas son: simplifican el diseño del modelo programado, le otorgan un carácter de versatilidad y flexibilidad para introducir modificaciones y mejoran la visualización del modelo completo.



Siguiendo con el ejemplo de las Plantas, al desagregar este módulo en la segunda capa se distinguen esencialmente cinco elementos que representan los distintos Centros de Trabajo que son el mismo bloque jerárquico diseñado con la versatilidad para poder representar cada centro de trabajo respectivamente. El mismo se muestra en la Figura 12.

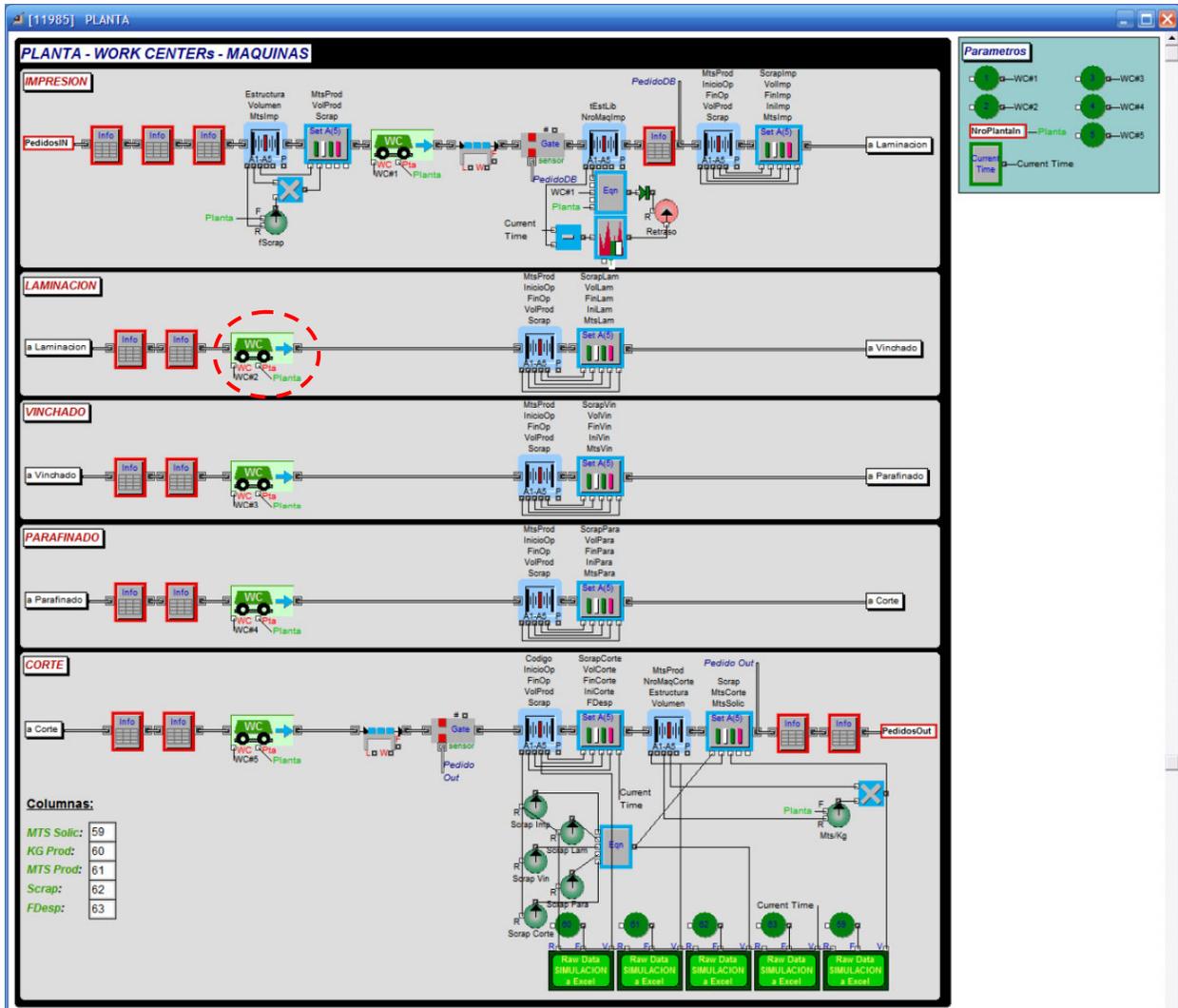


Figura 12. Bloque jerárquico Centro de Trabajo dentro del módulo Planta.



de 51.000 bloques de las bibliotecas estándar del programa y casi 1.500 bloques jerárquicos de diseño propio.

Además, este software permite montar animaciones en los simuladores. El propósito de las animaciones recae fundamentalmente en facilitar la comprensión de los procesos ya que puede observarse por ejemplo el avance individual de cada pedido por las plantas. Sin embargo, para realizar corridas con el fin de evaluar resultados esta capacidad es deshabilitada porque puede aumentar el tiempo de simulación.

4.5 – Validación del Modelo

La fase de validación cuantitativa se afrontó en dos etapas: una primera etapa de validación de los módulos principales del modelo (generación de la demanda, programación, planta y cálculo de indicadores), y una segunda en la que se validó el modelo completo para un mes del año 2010 considerado dentro del período de temporada alta del negocio, respetando las condiciones nominales correspondientes a la situación en ese entonces.

El motivo por el cual se efectuó un análisis de los resultados de los módulos principales por separado, previo a una validación total, fue por conveniencia meramente práctica. *Como con todos los programas de gran tamaño, uno debe intentar depurar por "módulos" o subrutinas. Es decir, uno debe tratar de descomponer el programa en partes pequeñas y controlables, que sean cada una un todo lógico, para luego intentar depurar las partes* (Ross, 1999).

Una vez completada esta etapa por módulos, se avanzó hacia la validación del modelo completo.

El proceso de validación del modelo completo se llevó a cabo de la siguiente manera: se realizó la cantidad de corridas necesarias para obtener un error estadístico aceptable en los resultados promediados, todas ellas con los parámetros nominales y los valores de entrada correspondientes a ese mes. Se promediaron los resultados de todas las simulaciones para cada indicador y se contrastaron con los valores reales de todos estos indicadores, obteniéndose así los errores porcentuales.



El resultado de esta fase de validación se presenta en la Tabla IV, donde puede observarse que los errores son todos menores del $\pm 10\%$. Este nivel de error total es aceptable a los fines prácticos de su utilización como herramienta de análisis.

Indicadores de Resultado	Error Relativo (Simulado vs. Real)
Toneladas Despachadas	-2,4%
Partida Promedio	-5,9%
Cantidad de Pedidos Desp.	3,9%
Lead Time de Entrega	-5,3%
Scrap	-0,7%
Metros producidos por familia de ET:	
PVC	-1,0%
PVC VINCHADO	-2,5%
OPP + PEB	1,2%
OPP + CPP	0,0%
PET + PEB	1,5%
PET + PAP	-0,8%
PET + PVC	0,0%
TRILAMINADO S/IMP	0,0%
TRILAMINADO IMP EN OPP	0,3%
TRILAMINADO IMP EN PET	-0,1%
TETRALAMINADO	0,2%
PAPEL	2,6%
ALU COMPUESTO	0,3%
CELOFAN	0,9%
TRILAMINADO IMP EN PAP	0,0%
MONOLAMINA OPP	0,0%
OPP + OPP	-2,6%
POLITWIST O CPP	-0,5%
SUPERESTRUCTURA	0,5%
METALIZADOS (PVC)	0,1%

Tabla IV. Resultados de la validación del modelo.

Este capítulo cubrió el desarrollo del modelo de producción de envases flexibles de la empresa. En primera instancia, en esta sección se presentaron en términos generales los objetivos y alcance del modelo. Luego, se comparó el proceso real



respecto del modelo desarrollado en función de las necesidades de simulación requeridas.

Cabe resaltar que este desarrollo posee su principal ventaja en que evaluar tales alternativas y cambios en las operaciones reales no pone en riesgo recursos económicos, materiales ni humanos, y además proporciona un gran ahorro de tiempo en lo que respecta al conocimiento de los resultados de las modificaciones del sistema analizadas.

En el capítulo siguiente se tratan diversos casos de estudio analizados mediante la utilización de esta potente herramienta de simulación.



CAPÍTULO 5: Simulación, aplicaciones y análisis de resultados

El capítulo anterior abarcó el desarrollo del modelo del proceso de producción de envases flexibles y su correspondiente validación. En la presente sección se muestran los resultados, análisis y conclusiones que surgen de la utilización del modelo como herramienta de simulación para evaluar diversos interrogantes que se plantea la empresa.

Las necesidades de respuesta que contaba la empresa y que fueron objeto de estudio eran:

- El aumento de la demanda de pedidos que pertenecen a una misma familia de estructuras: ¿cómo impactaría en las restricciones de capacidad un cambio en el mix de estructuras demandadas en respuesta a las potenciales tendencias del mercado?
- La mejora de productividad de máquinas: ¿qué sucedería con las toneladas despachadas si la empresa invirtiera en mejoras mecánicas para aumentar la velocidad de operación? ¿cuántas toneladas más se despachan? ¿cuál es el cuello de botella que predomina ahora?
- La inversión en adquisición de máquinas: ¿cómo impactaría en las toneladas despachadas invertir en una máquina adicional? ¿originaría esto una transferencia o predominio del cuello de botella en alguna etapa anterior/posterior del proceso? ¿en cuál?

5.1 – Casos de aplicación

En esta sección se desarrollan los casos de aplicación mencionados precedentemente. Para cada uno se parte por una breve introducción al caso, luego se presentan sus resultados y, por último, se efectúa un análisis de los mismos.



5.1.1 – Variación del mix de estructuras demandado

La gerencia busca evaluar qué impacto generarían las nuevas tendencias de mercado y otros cambios estratégicos de ventas con posibilidades de suceder en el mediano/largo plazo en las capacidades de producción y, principalmente, en las toneladas despachadas.

Entonces, se utiliza el simulador con este propósito modificando el mix de estructuras demandado en función de las nuevas tendencias de mercado en lo referente a aspectos de demanda propiamente y de sustentabilidad junto con cambios estratégicos de ventas orientados a la captación de ciertos nichos de mercado y otros a la mejora de costos y eficiencia. Se graficaron las toneladas despachadas y la variación de la utilización de la capacidad y los metros por hora productiva globales de cada centro de trabajo. Los gráficos y sus correspondientes análisis se presentan a continuación:

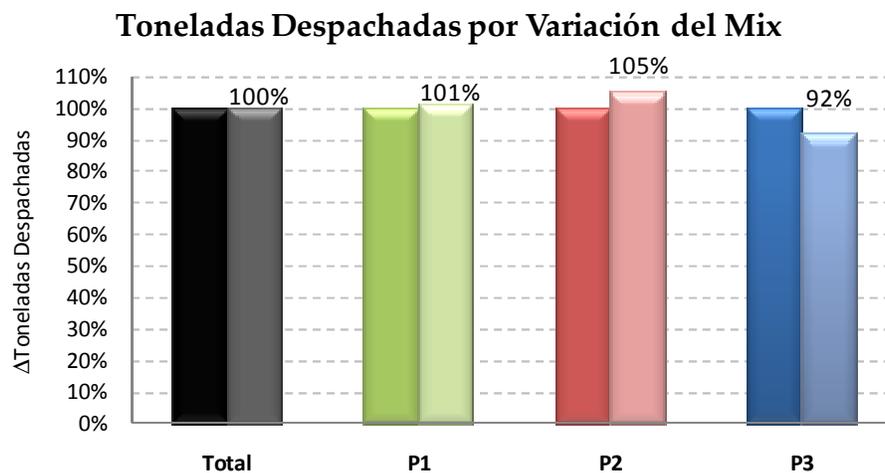


Figura 14. Variación de las Toneladas Despachadas en Total y por Planta al modificar el mix de estructuras demandado.

En la Figura 14 se observa que si bien las toneladas despachadas Totales prácticamente no variaron respecto del caso Base, su composición por planta sí lo hizo siendo más notable en las Plantas 2 y 3, con cerca de 5% y -8% respectivamente. La justificación se halla en que el nuevo mix de estructuras



demandado redujo su demanda de estructuras que usualmente se asignan a la Planta 3 y aumentó la de aquellas que se asignan a las Plantas 1 y 2.

Ahora bien, en la Tabla V y Figuras 15 se observan cuáles fueron las consecuencias de la modificación del mix de estructuras en la partida promedio, porcentaje de *scrap*, utilización y productividad.

Indicadores Varios	Variación
Partida Media	-1,4%
# Pedidos Desp	1,3%
% Scrap	-0,6%

Tabla V. Variación de indicadores varios del caso con modificaciones en el mix de estructuras demandado respecto del caso Base.

Las variaciones de los indicadores mostrados en la Tabla V no son significativas, pero es interesante comentar su relación y cambios respecto del caso Base.

La partida media se redujo con este nuevo mix: manteniendo el patrón de demanda parametrizado en el caso Base en cuanto al tamaño de los pedidos por familia de estructuras, la reducción de la partida media representa un aumento de los pedidos de estructuras de menor tamaño o bien que se redujo la demanda de los de mayor tamaño.

La cantidad de pedidos despachados aumentó: la reducción de la partida media se vio compensada por un incremento de la cantidad de pedidos despachados, lo que permitió igualar las toneladas despachadas del caso Base.

El porcentaje de scrap se redujo: lo notable de este cambio del mix es que conlleva una reducción global del porcentaje de scrap, dada la esencia de las estructuras cuya demanda varió y su asignación a plantas y máquinas.

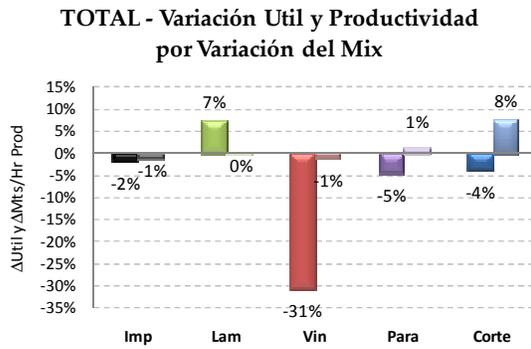


Figura 15.a

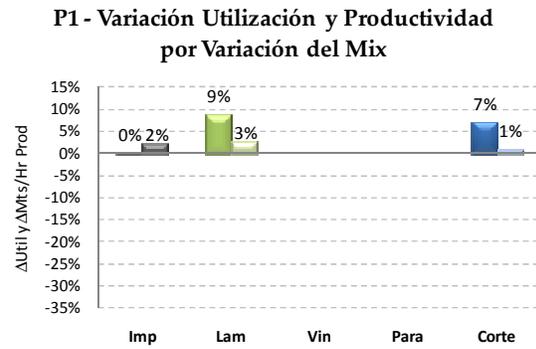


Figura 15.b

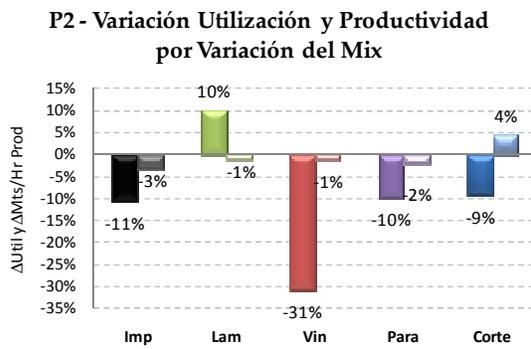


Figura 15.c

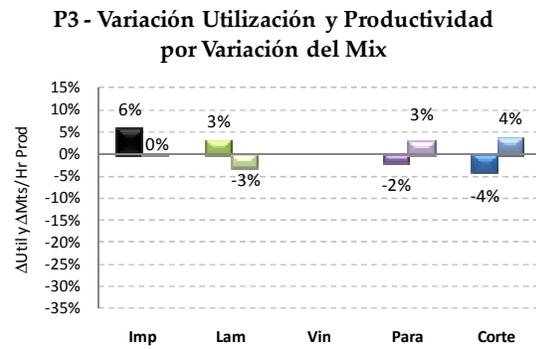


Figura 15.d

Figura 15. a-d) Variación de la Utilización de la Capacidad² y Productividad (metros lineales por hora productiva) en Total y por Planta al modificar el mix de estructuras demandado.

Las Figuras 15 muestran la variación de la utilización de la capacidad y de la productividad por centro de trabajo, a nivel global y por planta. Observando estas variaciones a nivel global (Figura 15.a) se destacan el mayor requerimiento de horas de laminación (7%) y la baja considerable de horas de vinchado (31%),

² La utilización de la capacidad está determinada como el total de horas-máquina productivas respecto del total de horas-máquina disponibles. La variación de esta utilización está expresada como la diferencia de la misma entre un caso y otro, en puntos porcentuales. Se ha tomado esta forma de medir la utilización de la capacidad para independizarla del mix de demanda, ya que aquí se están comparando dos casos con mix diferentes.



acompañado por bajas menores de horas de parafinado y corte. Además, se nota un aumento significativo de la productividad de las cortadoras en cerca del 8%, lo cual permite, junto con la mayor demanda de multilaminados, alcanzar las toneladas despachadas del caso Base aún cuando las horas utilizadas de Corte son menores.

De lo mencionado en el párrafo anterior se desprende que las laminadoras se verán muy demandadas en un escenario como el simulado, mientras que las vinchadoras se encontrarán ociosas gran parte de su tiempo disponible.

5.1.2 – Mejora de productividad de máquinas

Con un propósito similar al caso anterior de uso del simulador, aquí se desea conocer si las toneladas despachadas aumentarían, en qué magnitud y ello qué cambios conllevarían en las restricciones de capacidad del sistema si se llevaran a cabo una serie de mejoras orientadas a incrementar la productividad de las máquinas.

Las variables que inciden en la velocidad de operación y, entonces, en la capacidad de producción de los distintos centros de trabajo son diversas. A modo de ejemplo, se enumeran las siguientes:

- complejidad del diseño de la imagen final del envase
- cantidad de cuerpos impresores necesarios
- materias primas (films, tintas, adhesivos)
- ancho, espesor y peso específico del material
- grado de exigencia o tolerancia admisible del cliente
- experiencia del maquinista
- temperatura y humedad del ambiente
- higiene de los equipos
- cantidad de módulos impresos
- nivel de refile de los materiales



Por lo tanto, para mejorar la productividad de las máquinas, las iniciativas deberían estar orientadas a minimizar el campo de acción de aquellas variables controlables. Por ejemplo: mediante la inversión para reforzar los equipos de refrigeración se podrían alcanzar valores más homogéneos de temperatura y humedad controlados; reduciendo la diversidad de anchos de las bobinas, manteniendo unas pocas estrictamente necesarias, mejoraría la eficiencia operativa; capacitando a los maquinistas; aumentando la exigencia hacia los proveedores en cuanto a la reducción de la variabilidad de las características técnicas de las materias primas, etc.

En este sentido, se realizaron corridas de simulación variando las velocidades de operación de todas las máquinas mediante el empleo de distintos factores incrementales (mismos incrementos relativos a todas las máquinas) y se graficaron las toneladas despachadas, lead time de entrega y los metros lineales producidos, todas ellas en función del factor de incremento de la velocidad de operación.

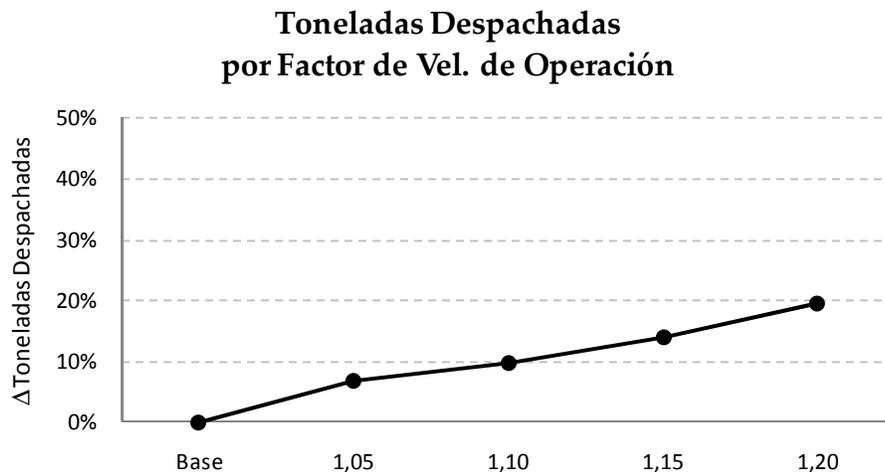


Figura 16. Variación de las Toneladas Despachadas Totales para distintos Factores incrementales de la Velocidad de Operación.

De la Figura 16 se observa que el tonelaje parece aumentar de forma directamente proporcional con el incremento de las velocidades de operación de las máquinas, dentro de un escenario de demanda insatisfecha.



Lead Time de Entrega por Factor de Vel. de Operación

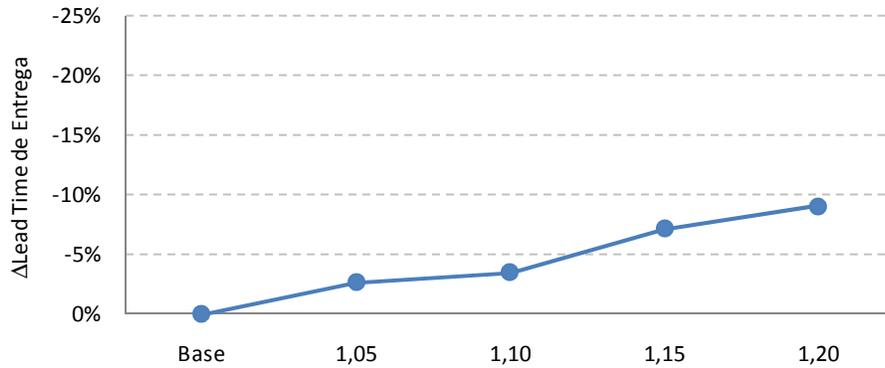


Figura 17. Variación del Lead Time de Entrega para distintos Factores incrementales de la Velocidad de Operación.

En la Figura 17 se nota que el lead time de entrega se reduce al mejorar el ritmo de producción, pero esto deja en evidencia que la mejora relativa en el lead time es menos que proporcional al incremento en la velocidad de operación. Esto se debe a que el lead time de entrega está compuesto básicamente por los tiempos de programación y de producción, mientras que el incremento de las velocidades de operación tienen sólo efecto en parte de este último.



Δ Metros Prod Total y por Planta por Factor de Vel. de Operación

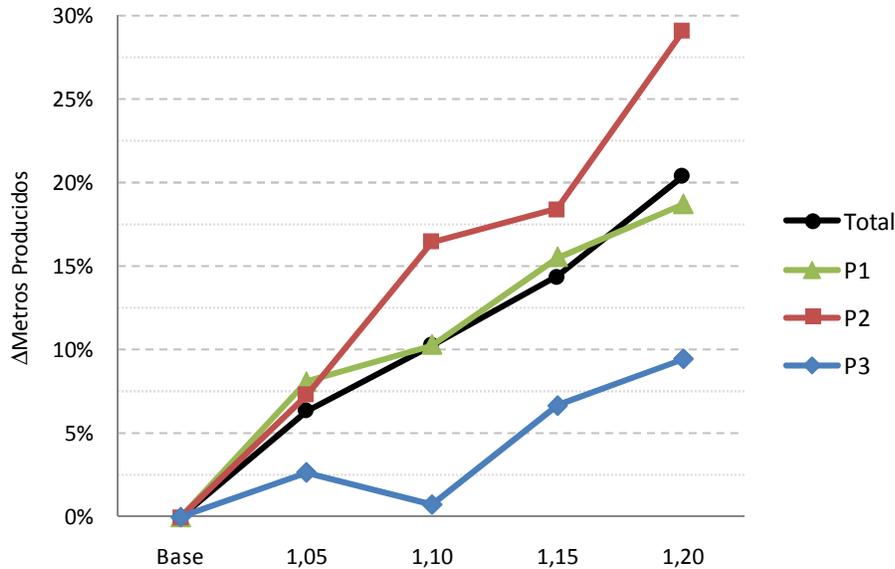


Figura 18. Variación de los Metros Lineales Despachados en Total y por Planta para distintos Factores incrementales de la Velocidad de Operación.

De la Figura 18 se observa que la variación de los metros lineales despachados Totales presenta el mismo comportamiento que el de las toneladas despachadas al mejorar la productividad de las plantas. Sin embargo, al desagregar esta variación a nivel de planta, el comportamiento en cada una de ellas es diferente.

La Planta 1 persigue el mismo comportamiento que el Total. Esto es así fundamentalmente porque el 91% de la demanda que se le asigna a esta planta requiere a lo sumo una etapa de laminación, además de pasar por impresión y corte que lo requieren todos los pedidos. Por lo tanto, dado a que esta planta cuenta solo con estos tres centros de trabajo y el mix de estructuras que se le asigna en su mayoría requiere una ruta de fabricación que involucra a los tres centros, entonces un incremento equivalente en las velocidades de operación de todas las máquinas generará un incremento prácticamente proporcional en los metros lineales producidos.



Frente a estos mismos cambios de velocidades de operación, la Planta 2 se comporta de una forma diferente respecto de la Planta 1: la variación de los metros lineales despachados posee una proporción lineal mayor a 1 (uno) con respecto al factor de incremento de la velocidad de operación. Esto sucede porque la Planta 2 abastece un mix de estructuras con mayor amplitud que la Planta 1 y que persiguen diversos ruteos, y no uno solo.

En este sentido, se observa que las diferencias entre las productividades globales de los centros de trabajo de la Planta 2 no son despreciables. Entonces, en condiciones de demanda insatisfecha, el aumento relativo del flujo de pedidos de las distintas rutas de fabricación varía dependiendo de sus restricciones de capacidad.

Por lo tanto, en esta situación se ven favorecidos los pedidos cuyas familias de estructuras persiguen un ruteo sin restricciones considerables, y además que se caracterizan por poseer partidas promedio mayores. Por lo tanto, ello conlleva para los distintos casos simulados que estos pedidos fluyan más rápidamente alcanzando un aumento de los metros lineales producidos que permiten superar más que proporcionalmente el incremento dado en las velocidades de operación de las máquinas. En la Tabla VI se puede observar cuáles fueron las familias de estructuras cuya proporción dentro del mix de pedidos despachados de la Planta 2 varió respecto del caso Base.

Estructura	Base	1,20	Dif
%ET1	25,9%	27,3%	1,4%
%ET2	13,9%	17,5%	3,6%
%ET19	21,8%	16,9%	-5,0%

Tabla VI. Variación de la proporción de tres familias de estructuras dentro del mix de pedidos despachados en la Planta 2 respecto del caso Base.

A diferencia de las situaciones anteriores, la Planta 3 experimenta una variación de los metros lineales despachados en una proporción lineal inferior a 1 (uno) con respecto al factor de incremento de la velocidad de operación. Esto sucede porque la Planta 3 abastece un mix de estructuras cuyo patrón de demanda se caracteriza por partidas más pequeñas (45% menores que la Planta 1). Como consecuencia de ello y ante las mejoras en la velocidad de operación, las máquinas que son



restricciones de capacidad responden de la siguiente forma: por un lado, reducen el tiempo de operación por partida; pero, por otra parte, esto aumenta la frecuencia de cambios de trabajo con sus correspondientes tiempos de setup no productivos, los que no han sido afectados con las mejoras simuladas.

Como resultado, los altos tiempos de setup en esta planta y las partidas pequeñas juegan un papel importante frente a los esfuerzos de aumentar los metros lineales despachados con mejoras de velocidad de operación, haciendo que los mismos aumenten en menor proporción al incremento de velocidad.

5.1.3 – Inversión en maquinaria adicional

La gerencia busca evaluar si la inversión en nueva maquinaria para la Planta 1 le permitiría abastecer demanda adicional y, en el caso afirmativo, cuánta y específicamente maquinaria de qué centro de trabajo, para así determinar el retorno de una inversión en este sentido.

De acuerdo a los datos provistos por esta herramienta al simular el caso Base y validados contra los datos reales, se conoce que el centro de trabajo Impresión de los tres centros disponibles en la Planta 1 no es una restricción de capacidad.

Entonces, se utiliza el simulador para el fin mencionado realizando corridas de simulación para tres casos:

1. Adquisición de una nueva cortadora (caso 1.a)
2. Adquisición de una nueva laminadora (caso 1.b)
3. Adquisición conjunta de una nueva cortadora y laminadora (caso 1.c)

Cabe destacar que para estos tres casos se asume que el aumento de capacidad simulado se da en condiciones de mix de estructura constante.

Se graficaron las variaciones de los indicadores de congestión³ y cantidad producida para cada uno de los casos mencionados respecto del caso base. Los gráficos y sus correspondientes análisis se presentan a continuación:

³ Los valores de los Tiempos Medios de Espera (en horas) fueron modificados por cuestiones de confidencialidad. Sin embargo, a los efectos de los análisis se mantuvo la proporcionalidad de los mismos entre las máquinas de un mismo centro de trabajo, con los otros centros y entre los distintos casos.

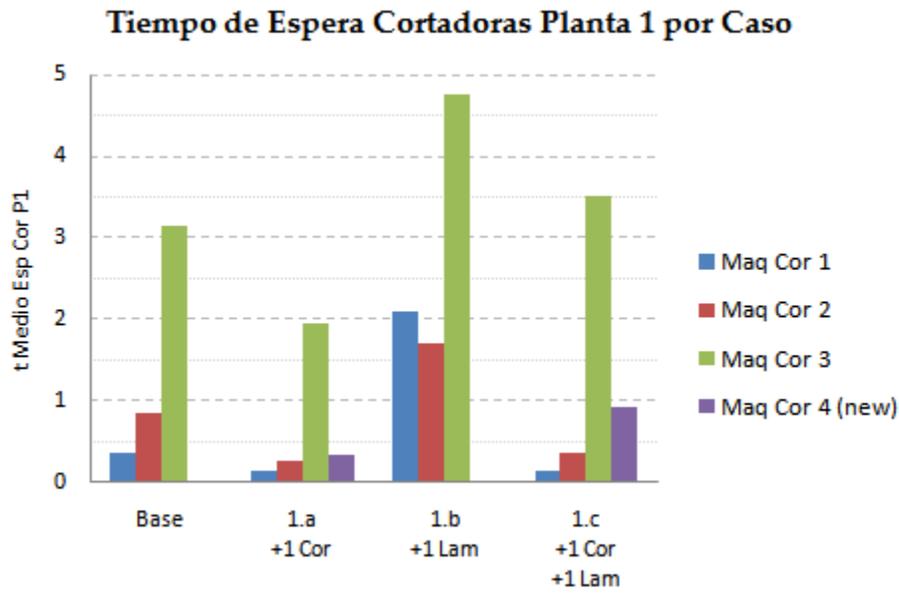


Figura 19.a

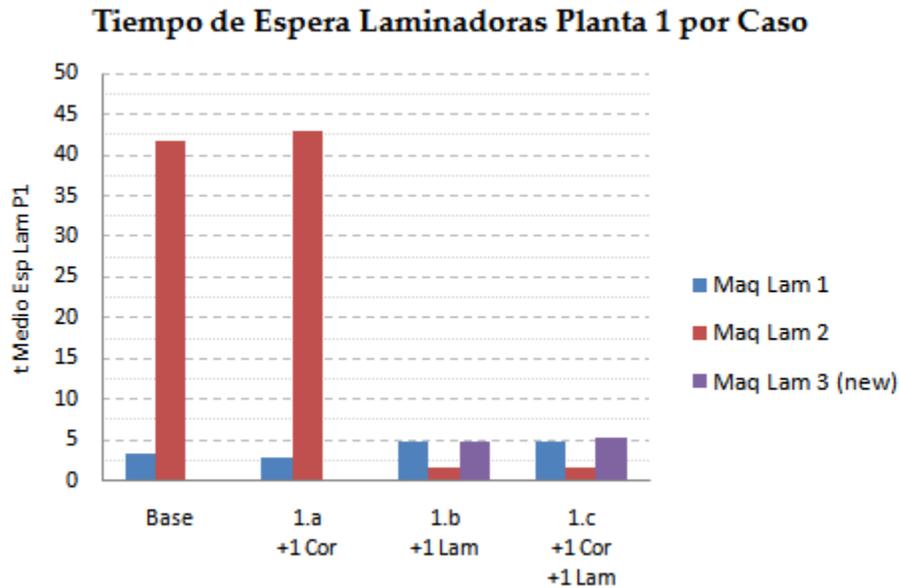


Figura 19.b

Figura 19. (a) Tiempo Medio de Espera de las máquinas Cortadoras y (b) de las máquinas Laminadoras de la Planta 1, para cada caso simulado.



En primer lugar, de la observación de las Figuras 19.a y 19.b para el caso Base se nota un desbalance de carga entre las máquinas dentro de cada centro de trabajo. Esto se da principalmente por las diferencias que existen entre cada una en cuanto a su antigüedad, tecnología y algunas de las variables comentadas para el caso de “Mejora de Productividad de Máquinas”, lo que obliga a que la asignación de carga para cada una no sea equitativa en función de la estructura de los pedidos, especificación de calidad de los clientes, productividad, etc.

En la Figura 19.a se observa que al adquirir una nueva máquina cortadora para la Planta 1 (caso 1.a), los tiempos medios de espera de las 3 cortadoras iniciales se verían reducidos en cerca de un 45% respecto del caso Base, en promedio. Sin embargo, esto no afecta a los tiempos medios de espera de las laminadoras, como se muestra en la Figura 19.b.

Por otro lado, si se invierte en una laminadora (caso 1.b), en vez de en una cortadora, los tiempos medio de espera de las cortadoras se incrementarían significativamente dado al incremento del flujo de trabajo que recibirían las cortadoras. Esto se refleja también en una reducción importante del tiempo medio de espera de la laminadora 2 respecto del caso Base.

Por lo tanto, parecería que en el caso Base el cuello de botella es el centro de trabajo Laminación. Si se incorpora una nueva cortadora (caso 1.a), la situación de restricciones no cambia. Sin embargo, si se adquiere una nueva laminadora en vez de una cortadora (caso 1.b), el cuello de botella se transfiere al centro de trabajo Corte.

Ahora bien, si se adquieren en forma conjunta una nueva laminadora y cortadora (caso 1.c), los tiempos medios de espera para las laminadoras no son muy distintos al caso 1.b. Por el contrario, las cortadoras se verían más congestionadas en comparación con el caso Base, aunque con tiempos medios de espera menores que si se hubiera adquirido solo la laminadora (caso 1.b). En consecuencia, para este último caso 1.c el cuello de botella se transferiría de las laminadoras en el caso Base a las cortadoras.

Por último, para confirmar lo previamente enunciado, se grafica la variación de las toneladas despachadas de la Planta 1 para cada caso simulado:

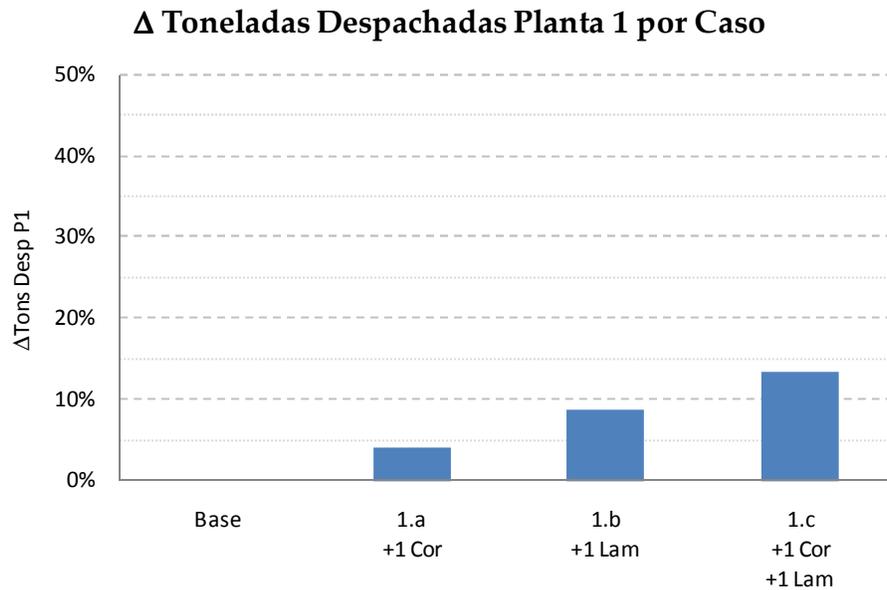


Figura 20. Variación de las Toneladas Despachadas de la Planta 1 para cada caso.

La Figura 20 deja en evidencia un incremento en las toneladas despachadas al adquirir una cortadora (caso 1.a), una laminadora (caso 1.b) o ambas (caso 1.c), siendo mayor en ese orden.

El aumento en las toneladas despachadas es mayor en el caso 1.b (9%) que en el caso 1.a (4%) debido a que el centro de trabajo Laminación refleja esencialmente una restricción de capacidad. El 4% de incremento en las toneladas despachadas del caso 1.a se explica específicamente de la reducción de los tiempos medios de espera de las cortadoras para un mismo período de tiempo (un mes), y bajo un escenario de demanda insatisfecha. Por otro lado, la incorporación de ambas máquinas genera la superposición de ambos efectos incrementales de las toneladas despachadas, alcanzando un aumento del 13%.

En conclusión, la posición del cuello de botella en el centro de trabajo Laminación de la Planta 1 se observa más claramente al reforzar dicho centro, logrando un incremento de las toneladas despachadas en esta Planta mayor que si se hubiera



reforzado el centro de trabajo Corte. Por lo tanto, bajo la hipótesis que el patrón del mix de estructuras para el mes simulado aproximadamente se mantiene para el resto de los meses de temporada alta y, entonces, meses de mayor exigencia de la capacidad instalada, es conveniente invertir en una nueva laminadora que descongestione este centro de trabajo, logrando un aumento del 9% de las toneladas despachadas por esta Planta en comparación con el caso Base.

Una inversión en esa línea provocaría una transferencia del cuello de botella hacia el centro de trabajo Corte. Dependiendo de la magnitud de la demanda esperada, podría evaluarse la conveniencia de invertir también en una cortadora para acompañar ese crecimiento, alcanzando en total un 13% de toneladas adicionales.

5.2 – Conclusiones

En esta sección se analizaron los resultados de varias aplicaciones del simulador llevadas a cabo con el fin de responder a las necesidades de información de la empresa.

Del análisis de los resultados se resuelve que la posición del cuello de botella en la Planta 1 se encuentra en el centro de trabajo Laminación. Esto queda en evidencia al simular la adquisición de una máquina adicional para dicho centro, logrando incrementos de toneladas despachadas mayores que si se hubiera reforzado el centro de trabajo Corte. Sin embargo, esta decisión implicaría la transferencia del cuello de botella o recurso crítico hacia las cortadoras, dejando las mismas en una situación de extrema exigencia. Por lo tanto, sería conveniente invertir también en una cortadora para mejorar tal situación y, por supuesto, aumentar aún más las toneladas despachadas. Sin embargo, esto estaría sujeto a las evaluaciones de factibilidad económico - financiera correspondientes.

En cuanto a las mejoras de productividad de las máquinas para lograr un aumento de las toneladas despachadas, la proporcionalidad entre ambos por Planta dependerá esencialmente del mix de estructuras asignado, rutas de fabricación, restricciones de capacidad y partida media.

Para la Planta 1, donde la mayoría de los pedidos que se le asignan persiguen una misma ruta de fabricación, su crecimiento en toneladas será proporcional (con factor aproximado 1) al incremento de las velocidades de operación.



En cambio, la Planta 2 establece varias rutas de fabricación, dada la apertura del mix de estructuras que se le asigna. Asimismo, los diversos ruteos poseen distinta significación en sus cuellos de botella. Además, los pedidos de algunas familias de estructuras con bajas restricciones de capacidad en sus rutas se caracterizan por producirse en partidas más grandes respecto de la media. Entonces, todo ello resulta finalmente en un aumento proporcional con factor mayor a 1 respecto de la mejora de productividad de las máquinas.

Por el contrario, la Planta 3 recibe un mix de demanda caracterizado por tamaños de pedido más pequeños respecto de las otras plantas. Como consecuencia, aquí empieza a jugar un papel importante los tiempos operativos fijos por pedido como los tiempos de setup de máquina, en los que los factores de incremento de velocidad de operación no fueron aplicados. Por lo tanto, la Planta 3 alcanza crecimientos en las toneladas despachadas que poseen una proporción lineal menor a 1 respecto a los incrementos de productividad simulados.

Por otro lado, al simular una modificación del mix de estructuras demandado alineado a las nuevas tendencias de mercado y otros cambios estratégicos de ventas queda de manifiesto que las toneladas despachadas totales no varían respecto del caso Base. Sin embargo, al analizar la performance de producción y capacidades se observa varios cambios: la partida media es menor, pero se despachan más pedidos; el scrap disminuye; aumenta la utilización de las laminadoras; se reduce significativamente la utilización de las vinchadoras; y, por último, mejora la productividad de las cortadoras. Cabe destacar que, mientras que las vinchadoras se encontrarán ociosas gran parte de su tiempo disponible, las laminadoras se verán muy demandadas en un escenario como el simulado.



CAPÍTULO 6: Conclusiones Finales

El presente trabajo se desarrolló sobre una empresa de producción de envases flexibles, inmersa en un mercado caracterizado por un sostenido crecimiento y alto nivel de competencia. Si bien la empresa es líder en el país, la dinámica de su entorno en constante movimiento le exige atender sus desafíos operativos para mantener su posición de liderazgo.

Los estudios aquí realizados tienen un enfoque cuali-cuantitativo, con un fuerte foco en este último aspecto que presenta oportunidades para nuevos desarrollos en la empresa. En este sentido, el conjunto de análisis realizados resultaron innovadores para la gerencia.

Mediante el uso del simulador desarrollado, todas aquellas preguntas e inquietudes de la empresa que carecían de una respuesta hasta ese momento y que son difíciles de responder con una precisión aceptable con las herramientas analíticas comunes, encontraron una respuesta precisa a los fines prácticos.

El modelo diseñado e implementado en el software de simulación puso de manifiesto vinculaciones entre variables difíciles de detectar sin una herramienta similar y mucho menos de manera intuitiva.

Las conclusiones arribadas del análisis de los resultados arrojados por el simulador demuestran una riqueza incomparable en cuanto a precisión que no se podría conseguir de otro modo que en la realidad. Además, la empresa obtiene un importante ahorro de tiempo y dinero simulando en computadora todas sus inquietudes en vez de implementarlas en la realidad para conocer lo que sucedería, con el riesgo de que el resultado no sea el esperado.

Los casos simulados permitieron comprender mejor a la naturaleza del proceso, el comportamiento de sus recursos (máquinas), demanda (mix de estructuras) y productos (toneladas despachadas) y las relaciones existentes (por ej.: toneladas despachadas con velocidades de operación, demanda y restricciones de capacidad).

Por último, la versatilidad y flexibilidad de diseño de esta herramienta de simulación permite que la misma sea adaptada fácilmente a la realidad de cada momento, como por ejemplo incorporando más máquinas de cualquier centro de trabajo, nuevas rutas de fabricación, etc. Por lo tanto, el simulador está preparado además para responder de manera oportuna a futuras inquietudes que la empresa



pueda plantearse, sin agotar, los estudios realizados y aquí presentados, su amplio campo de opciones de simulación.

Desarrollos futuros

En el transcurso del actual trabajo se han detectado algunas oportunidades de mejora del desarrollo del simulador, como así también de simulación y análisis. Sin embargo, por cuestiones de plazo o por no revestir de mayor importancia, se ha postergado su implementación o análisis. Algunas mejoras se caracterizan por resultar en añadidos de complejidad al modelo del proceso de conversión de envases flexibles de la empresa. Por otra parte, se estima que otras oportunidades de mejora no serían de difícil implementación.

En relación al módulo de Programación, se podría interpretar en mayor profundidad la lógica “tácita” de programación actual de la empresa, con el fin de modelarla con la complejidad que ello requiera. Esto podría reemplazar la programación probabilística condicionada que se implementó en el modelo, si bien esta última permitió alcanzar resultados satisfactorios en las simulaciones y el análisis de sus resultados.

Por otro lado, esta herramienta de simulación servirá de base para incorporar en el mismo software una herramienta de optimización que permita maximizar/minimizar una función objetivo (por ejemplo las toneladas despachadas, el nivel de servicio) sujeta a una serie de restricciones y sus relaciones, las cuales han podido ser estudiadas en profundidad y otras incluso detectadas gracias al desarrollo de este simulador.



BIBLIOGRAFÍA

Anderson, D. R., Sweeney, Dennis J., Williams, Thomas A., *Introducción a los modelos cuantitativos para administración*, Ed. Iberoamérica, 1993.

Apics CPIM, Basics of Supply Chain Management, Participant Workbook, Version 2.2, October 2006.

Gallagher, C. A. y Watson, Hugh J., *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones en administración*, Ed. McGraw Hill, 1982.

García, R. M., *Inferencia Estadística y Diseño de Experimentos*, Edición del autor, 2001.

Hansen, G., *Automatización, Reingeniería en los procesos de negocios a través de la simulación*, Ed. Prentice Hall, 1998.

Hillier, F., Lieberman, G., *Investigación de Operaciones*, Ed. McGraw Hill, Séptima Edición, 2002.

Forrester, J. W., *Dinámica Industrial*, Ed. El Ateneo, 1972.

Ross, S. M., *Simulación*, Ed. Prentice Hall, Segunda Edición, 1999.

Senge, P., *La Quinta Disciplina*, Ed. Granica, 1998.

Software de aplicaciones específicas utilizado

BestFit 4.5 (de Palisade Decision Tools).

ExtendSim Version 6.0, 2006.