

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la dinámica de sistemas. Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: César Narváez Rodríguez

Julio 2022

Después de estos años, puedo decir que la carrera me ha enseñado dos cosas realmente importantes:

La primera, es que casi nada se consigue fácilmente. Tras superar estos años, tengo claro siempre hay que avanzar, contra viento y marea, hasta alcanzar el objetivo que tenga en cada momento de mi vida: completar la carrera, el máster, encontrar trabajo, etc.

La segunda, y más importante, es saber que nunca en mi vida estaré solo. Mi recompensa por estos años no es salir de la facultad siendo ingeniero, es saber que en este tiempo he conocido a un pequeño grupo de grandes personas. No hay nada que una más que superar dificultades juntos, o eso dicen. La verdad es que no hay nada que una más que contener un ataque de risa en la biblio antes de un examen, o celebrar la llegada del verano saltando al mar después de exámenes, pillar tremendas viciadas al futbolín, cocinar la cena más horrible jamás concebida (que nunca podemos acabarnos), o bailar tremendo reguetón un viernes, aunque al principio fingiera que no me gustara.

Diría que os voy a echar de menos, pero sé que esta amistad no la vamos a perder.

Como no, no puedo no agradecer a mi familia el gran apoyo que me han dado a lo largo de todo este tiempo, en especial a mi madre. Ella ha sido la primera en celebrar conmigo mis avances, y nadie mejor que ella sabe los momentos bajos que he tenido. Ha sido la luz que me rescata de mi propio agobio cuando mi propia cabeza me estaba machacando. Me ha arropado con sus abrazos cuando estaba de rodillas y me ha dado la energía que me faltaba para continuar en todo instante.

Esta última victoria va sobre todo por ti.

Te quiero, mamá.

Resumen

Uno de los campos de aplicación más importantes de la Ingeniería Industrial está enfocado en los procesos productivos. La habilidad de diseñar, modelar y optimizar procesos industriales capacita a un ingeniero no con la propia experiencia en modelado, si no que también le provee con suficiente visión sistémica para ver dónde aplicar mejoras pertinentes para poder optimizar estos procesos.

Para obtener esta visión, es importante emplear una herramienta adecuada. En este estudio, se ha decidido recurrir a la Dinámica de Sistemas. Para su correcto uso, es necesario entender un proceso de fabricación como un sistema complejo, en el que todas las variables (máquinas, personal, tiempo) están relacionadas. Así, es necesario estudiar la línea como un conjunto, y observar en que manera los parámetros se afectan entre ellos y con el conjunto. Los elementos de la Dinámica de Sistemas: Variables de Stock, flujos, etc. Hacen no sólo posible, si no sencillo, conseguir modelar y optimizar cualquier proceso industrial.

Summary

One of the most important fields of application of Industrial Engineering is focussed around manufacturing processes. Being able to design, model and optimize industrial processes allows the ingeneer not only to acquire habilities as a process designer, but provides him with enough vision to see where to apply any necessary improvements, in order to optimize the fabrication line.

In order to achieve gain this vision, it is necessary to use an optimal tool. For this essay, System Dynamics has been chosen. This method requires to understand any industrial procces as a complex system, where all variables (available machines, Manpower, time) are intertwined. Thus, it is necessary to study any proccess as a hole, and see how any change over a particular parameter affects the manufacturing line. By using the elements of the System Dynamics, stocks variables, flows, etc. it's not only posible, but easy, to model and optimize any industrial process.

ÍNDICE

1. Introducción	7
1.1 Objetivos.....	8
2. La Dinámica de Sistemas	9
2.1 Aplicación de la Dinámica de Sistemas en la Ingeniería Industrial.....	10
2.2 Herramientas para la aplicación de la Dinámica de Sistemas en la Ingeniería Industrial	11
2.2.1 Vensim	12
2.2.2 Anylogic.....	13
3. Metodología	15
4. Aplicación a un modelo básico.....	21
4.1 Características de partida	21
4.2 Modelado.....	21
4.3 Resultados.....	26
4.4 Optimización.....	26
5. Diseño de una planta de producción de envases de cartón: Graphic Packaging International Maliaño.....	30
5.1 Descripción del caso	30
5.2 Características de partida	30
5.3 Modelado.....	31
5.3.1 Preimpresión.....	34
5.3.2 Impresión	40
5.3.3 Troquelado.....	47
5.3.4 Línea Premium (Estampadora y Troqueladora 5).....	53
5.3.5 Finishing: Plegado, conformado y manipulado	58
5.3.6 Salida de Fábrica	71
5.3.7 Gestión de Residuos	75
5.3.8 Costes de Almacenamiento	79
5.3.8 Aclaración sobre el registro de los costes e ingresos	80
5.4 Funcionamiento esperado	83
5.5 Resultados.....	86
6. Optimización de una planta de producción de envases de cartón: Graphic Packaging International Maliaño.....	99
6.1 Optimización de las Prioridades de salida de fábrica	99
6.2 Optimización de la producción en planta para cumplir con el programa de salidas de producto inicial.....	105
6.3 Estudio del rendimiento de la planta buscando producir al mayor ritmo posible	109

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de
Sistemas.
Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

7. Conclusiones.....	122
8. Observaciones del Autor	124
9. Bibliografía	125

1. Introducción

A la hora de implementar mejoras en cualquier proceso productivo, es necesario conocer a fondo los elementos que lo componen, sean máquinas de producción, transporte, o personal.

Sin embargo, no solo se ha de tener en cuenta qué partes conforman el todo del proceso, sino que se deben de estudiar como estos elementos interactúan entre sí, como parte del todo que es el sistema. En una planta de producción de envases de plástico, por ejemplo, puede existir un cuello de botella en una plancha que de forma a la materia prima; al cambiar un determinado parámetro de funcionamiento de esta máquina, buscando una mejora en este punto crítico, dicho punto se podría desplazar a otra parte del proceso. Este hecho podría pasar desapercibido, en cuyo caso se generarán pérdidas, que deberían haberse evitado.

Por ello, es necesario concebir cada línea de producción como un sistema complejo, en el que se valoren tanto la existencia de los agentes que lo componen, como las relaciones que establecen entre sí estos últimos.

Además, estos agentes ejercerán unos sobre otros distintos grados de influencia, complicando en exceso el estudio a realizar para optimizar el proceso de fabricación. En principio, sería necesario iterar repetidas veces, hasta valorar todos los efectos que producen las distintas modificaciones incorporadas a los agentes del sistema. Pero, como anteriormente se ha comentado, este proceso sería largo y daría lugar a errores, al probablemente no valorar todas las consecuencias que se producen.

Para resolver este problema, se recurrirá al uso de la Dinámica de Sistemas, herramienta mediante la cual se abordará el cumplimiento de los objetivos presentados a continuación.

Presentados los objetivos, el estudio de este trabajo explicará la herramienta con la que se trabajará y la metodología a la hora de emplearla en este estudio en particular. Para facilitar la visualización de esta, se creará un modelo sencillo a forma de introducción. Habiendo explicado dicho modelo, se pasará a construir una simulación basada en la planta de producción de envases de cartón, Graphic Packaging International, donde el autor ha realizado sus prácticas en este cuatrimestre.

1.1 Objetivos

- Estudiar la viabilidad del modelado dinámico como herramienta de ingeniería, para la organización y gestión de procesos industriales, y su optimización.
- Emplear los conceptos de la Dinámica de Sistemas para representar un modelo industrial básico.
- Estudiar el comportamiento de un modelo básico y proceder a la optimización de la organización y gestión de éste.
- Aplicación de los principios empleados en el modelo básico en un caso real. Modelado de una planta de producción de envases de cartón.
- Estudiar el comportamiento sistema de la planta de producción de envases y proceder a la optimización de la organización y gestión este.
- Concluir la viabilidad de las rutas de mejora obtenidas del cálculo de optimización del programa.
- Valorar la viabilidad de Anylogic como herramienta para la aplicación de la Dinámica de Sistemas en la optimización de procesos productivos en general, y en particular, en la mejora del proceso productivo de la planta de envases de cartón.

2. La Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas es un método que estudia el desarrollo de un entorno complejo mediante su modelado, poniendo de manifiesto tanto las relaciones que desarrollan entre sí los elementos que lo componen, llamados agentes, como las que estos mantienen con el sistema mismo.

Un sistema es ese conjunto de interacciones que se producen entre un grupo de elementos, que posee un conjunto de características que no pueden encontrarse en el estudio individual de las partes que lo componen.

Un sistema cuyos datos evolucionan y se observan a lo largo del tiempo es un sistema dinámico.

Como se mencionó brevemente en el primer párrafo, la forma de representar un sistema dinámico es a través de un modelo. A través de estas herramientas se plasman las variables más significativas presentes en el entorno. Los principales tipos de variables sobre los que se trabaja en la Dinámica de Sistemas son las siguientes:

- Variables de Estado. Son esas variables que representan elementos que se experimentan acumulaciones positivas o negativas a lo largo del tiempo. Son niveles intermedios entre los flujos de un sistema. En este estudio, se referirá de forma habitual a estas variables como Variables de Stock.
- Variables de cambio. También llamadas variables de flujo. A través de ellas, se modela el cambio de una variable de estado a otra, o a nube.
- Variables dinámicas. Influyen en el comportamiento del sistema mediante su interacción con las variables de flujo. Estas variables también experimentan cambios en su valor a lo largo del tiempo.
- Parámetros. Valores constantes en el sistema.
- Flujos de Información. Representan la relación física entre las distintas. Su función es la transmisión de datos.
- Nubes. Puntos de entrada o salida al sistema. Se las considera fuentes o pozos infinitos y no tienen interés como nivel.

Las interacciones producidas en un modelo entre estas variables se representan en los llamados diagramas de Forrester. Ejemplo en la figura 2.1:

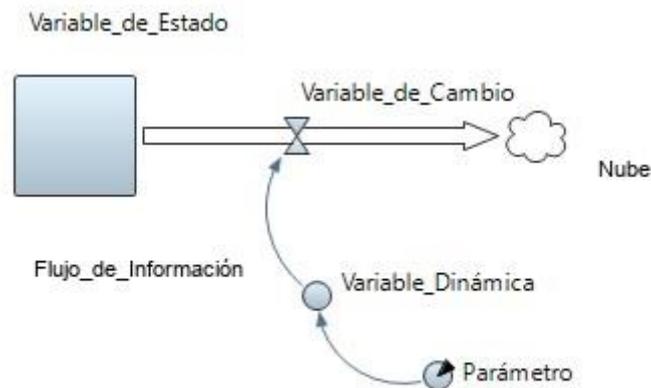


Figura 2.1. Ejemplo de Diagrama de Forrester.

2.1 Aplicación de la Dinámica de Sistemas en la Ingeniería Industrial

La Dinámica de Sistemas tiene un amplio rango de campos de aplicación. Se puede emplear en el estudio de núcleos de población y su interacción con los recursos que esta consume; la evolución de una enfermedad o la recepción por parte de un grupo determinado de un producto que se quiere lanzar.

La ventaja de mayor relevancia de la aplicación de la Dinámica de Sistemas reside en la posibilidad de estudiar la reacción de el sistema objeto al introducir cambios en el mismo. Mediante el correcto modelado de los canales de información en el modelo, se puede obtener una estimación del auténtico alcance de los cambios introducidos en el entorno.

En la Ingeniería Industrial, y más específicamente, en la rama de Organización Industrial, el mayor uso de esta herramienta es el modelado de una planta de fabricación. Estableciendo paralelismos entre los elementos del Diagrama de Forrester y los recursos de una fábrica, se puede observar con detalle la evolución de cualquier proceso productivo, y a partir de ese punto, estudiar la viabilidad de mejoras que se busque aplicar para mejorar el rendimiento de este proceso.

Por tanto, para trabajar con la Dinámica de Sistemas es necesario entender que una planta no es más que un sistema complejo. En este sistema se encuentra un flujo principal, el proceso productivo, a través del cual se va desplazando el producto. A lo largo de este recorrido, el producto va sufriendo transformaciones, desde que llega a planta como materia prima, hasta que sale en forma de producto terminado.

Refiriéndonos ahora a cada término con su correspondiente de la Dinámica de Sistemas, en cada nivel del proceso de fabricación se encontrará una variable de estado, que representa cada tipo de Stock acumulado en estos niveles: Materia prima, producto semiterminado (WIP), y producto terminado. Provocando los cambios de estado se encuentra el elemento básico de toda fábrica, las máquinas; su actividad se modela mediante las variables de flujo que comunican las variables de estado de la planta.

Finalmente, y afectando a los distintos flujos en la fábrica mediante canales de información, se encontrarán las variables dinámicas y distintos los parámetros, los cuales pueden representar el número de trabajadores, o el coste de operación de una máquina.

2.2 Herramientas para la aplicación de la Dinámica de Sistemas en la Ingeniería Industrial

Existe un gran número de programas de simulación con los que es posible trabajar a la hora de modelar una planta aplicando la Dinámica de Sistemas. Sin embargo, por brevedad, se comentarán dos programas principales: Vensim y Anylogic.

2.2.1 Vensim

Lanzado en 1993, Vensim es el simulador con mayor recorrido de los dos. Este programa está principalmente centrado en la aplicación de la dinámica de sistemas, hecho que se observa claramente en la disposición de su interfaz (Ver figura 2.2).

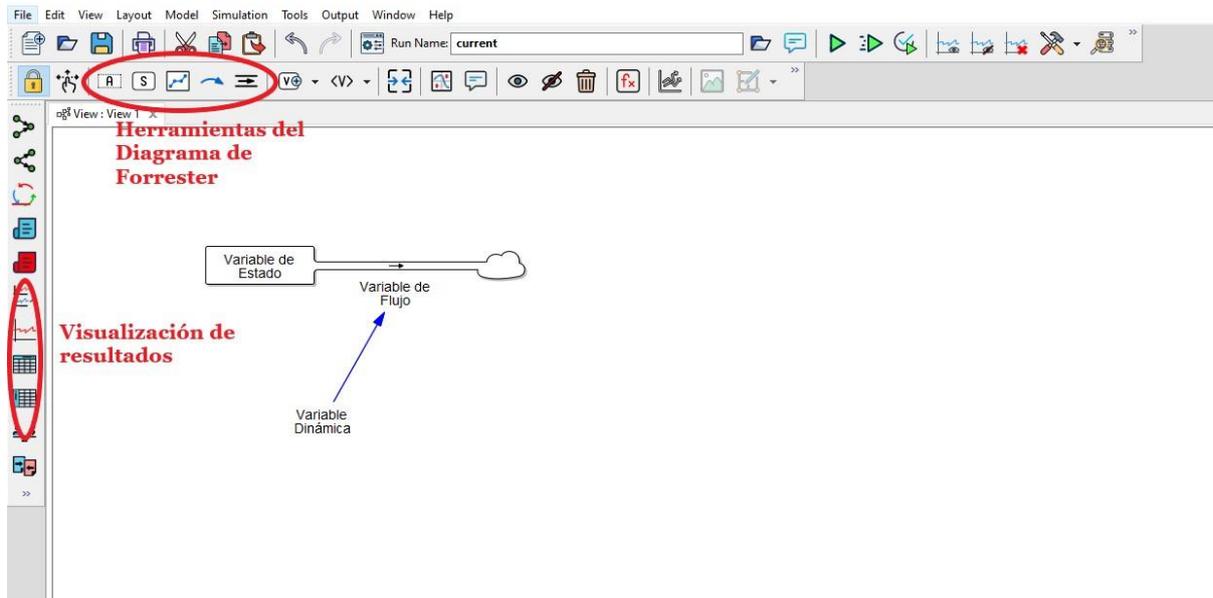


Figura 2.2. Interfaz y pantalla principal de Vensim.

Como se puede observar, este programa presenta una interfaz sencilla y accesible, en la que en un golpe de vista se pueden localizar las herramientas de construcción de modelos y las funciones de visualización de los resultados obtenidos. En Vensim, estos resultados son presentados tras haber finalizado la simulación del sistema, bien en forma de gráficas, o bien en forma de tablas. Los gráficos presentados son *timeplots* de la evolución de las variables en función del tiempo.

Por otra parte, la programación de las distintas variables es facilitada en este programa mediante una ventana desplegable, como se ve en la figura 2.3:

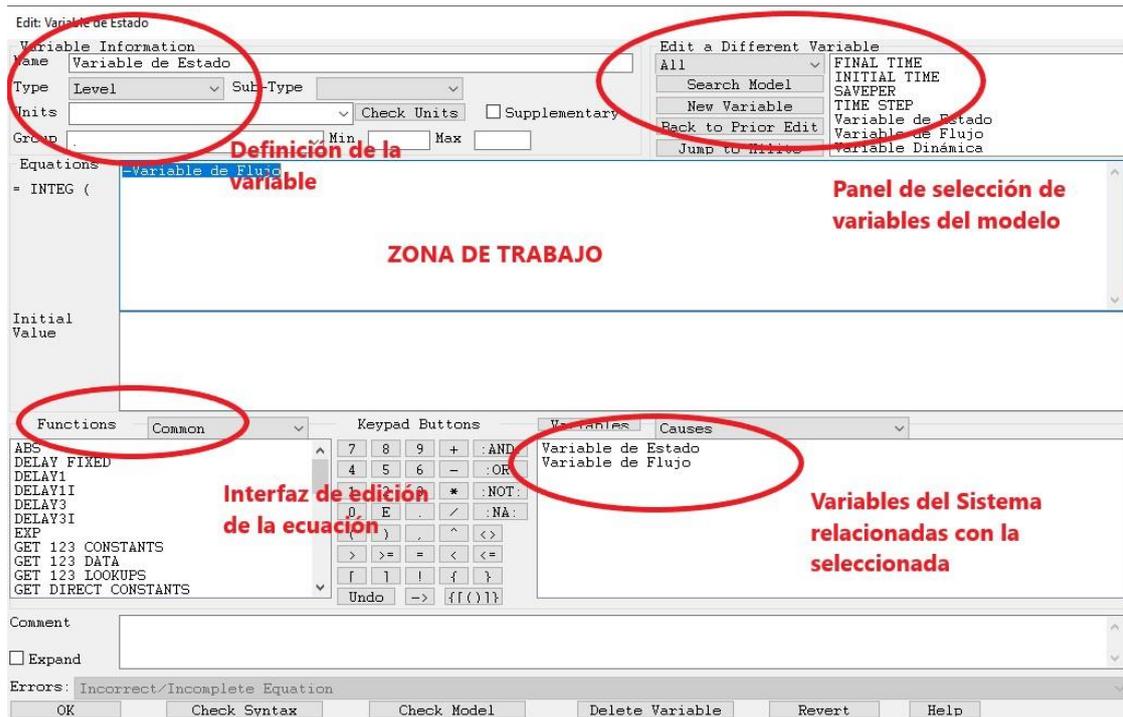


Figura 2.3. Interfaz de edición de variables de Vensim.

En la figura 2.3 se distinguen 5 zonas de trabajo diferentes. La principal es la zona de trabajo, donde se escribe la ecuación que definirá el comportamiento de la variable. La principal herramienta para desarrollar esta tarea se presenta en el área de Interfaz de edición de la ecuación, donde se pueden seleccionar distintos tipos de funciones predeterminadas, como condicionales o distribuciones de probabilidad. La última zona de interés es la que muestra al desarrollador las variables directamente vinculadas mediante canales de información al elemento sobre el que se está trabajando.

2.2.2 Anylogic

Este programa fue lanzado por primera vez en el año 2000. A diferencia de Vensim, este programa abarca los tres principales tipos de simulación de sistemas: la Dinámica de Sistemas, Eventos discretos, y modelado basado en agentes.

Puesto que para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se ha empleado este software, se comentarán brevemente algunos puntos de su funcionamiento y características.

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

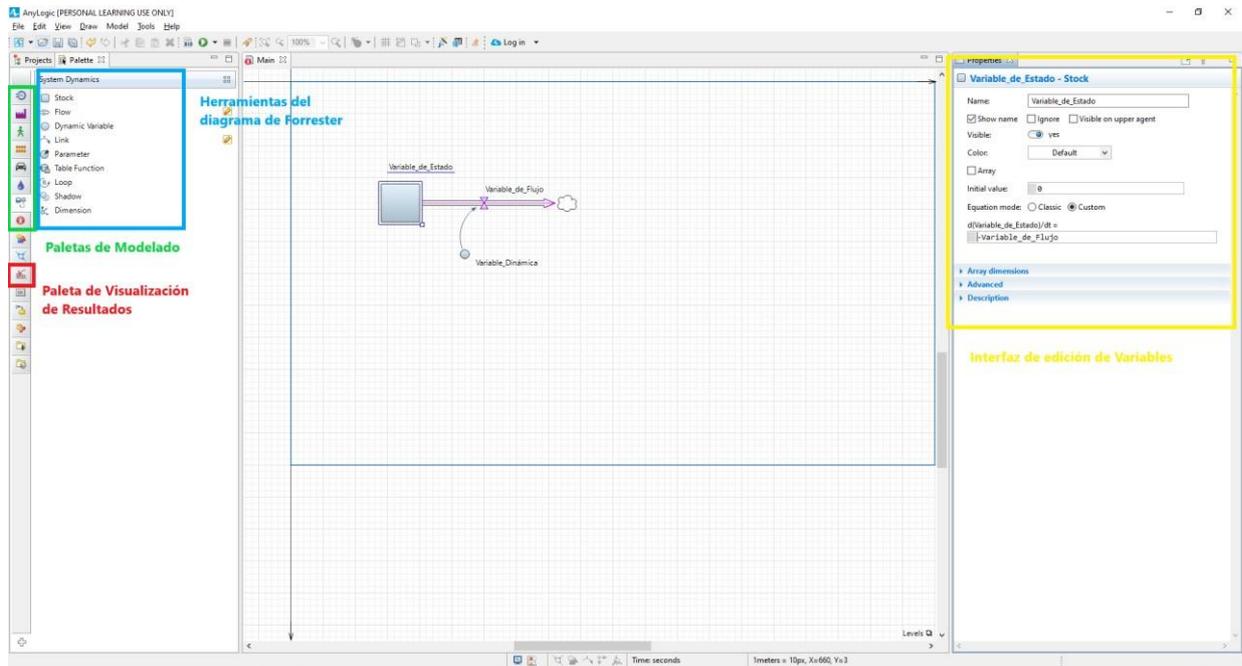


Figura 2.4. Pantalla de Trabajo de Anylogic.

Se han destacado en la figura 2.4 una serie de zonas de interés para el lector. En verde, se encuentran las distintas series de herramientas de modelado. A diferencia de Vensim, Anylogic permite el uso simultáneo de herramientas de modelado de eventos discretos y de Dinámica de Sistemas, dando gran profundidad a los modelos desarrollados. En azul, se aprecian, al igual que en Vensim, las distintas herramientas del diagrama de Forrester. En la misma línea que Vensim, Anylogic da la opción al programador de añadir gráficas para la visualización de los resultados del modelo. Sin embargo, este último programa da un paso más, aportando un mayor abanico de gráficos, como diagramas de barras y sectores; en Anylogic, además, se puede observar en vivo la evolución del sistema, tanto por medio de gráficas como en el mismo esquema del modelo.

Finalmente, la zona de definición de las ecuaciones de Anylogic (amarillo en la figura 2.4) varía sustancialmente en comparación con su homóloga de Vensim. En este software, se dispone de un servicio de autorrelleno para completar la ecuación con variables vinculadas a las que se está definiendo. El resto de las funciones se deberán escribir a mano, empleando el léxico de JavaScript.

3. Metodología

Antes de proceder con los modelos de este estudio, es necesario explicar brevemente el funcionamiento de la herramienta que se empleará: Anylogic.

La principal parte sobre la que se trabajará será la paleta de *System Dynamics*, mostrada en la figura 3.1, en la cual se pueden apreciar los distintos elementos, anteriormente comentados, que componen un sistema dinámico: variables de stock, flujos, variables dinámicas, parámetros y variables sombra.

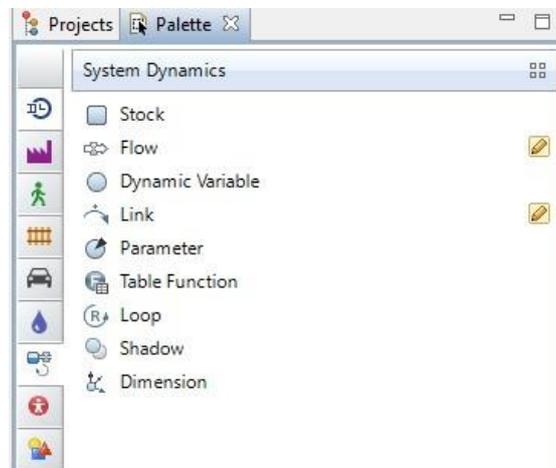


Figura 3.1. Paleta de Dinámica de sistemas de Anylogic.

Adicionalmente, para añadir las condiciones y otros flujos de información que completen los diseños de los sistemas, se recurrirá con frecuencia a las paletas *Agent* y *Statechart*. Mediante estos menús de herramientas se accede a recursos de importancia clave en el modelo de la planta de producción de envases de cartón: Los eventos y las tablas de estado.

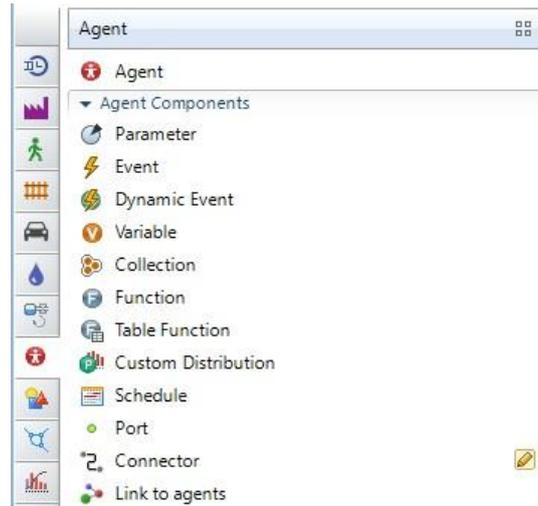


Figura 3.2. Paleta de Agente de Anylogic.

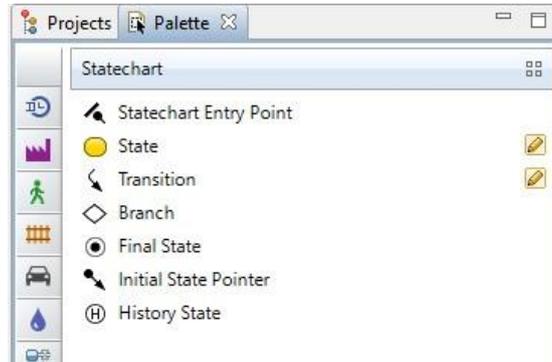


Figura 3.3. Paleta de Mapas de Estado de Anylogic.

Los eventos son acciones que en principio ocurren una vez. Dichas acciones son activadas de dos modos, principalmente. La primera forma de activarlos es mediante el cumplimiento de una condición; la segunda es exigir la iniciación del evento transcurrido un determinado tiempo. Esta última forma de activación se puede definir como cíclica, lo cual permite añadir una frecuencia de activación, la cual se mantendrá constante durante toda la simulación.

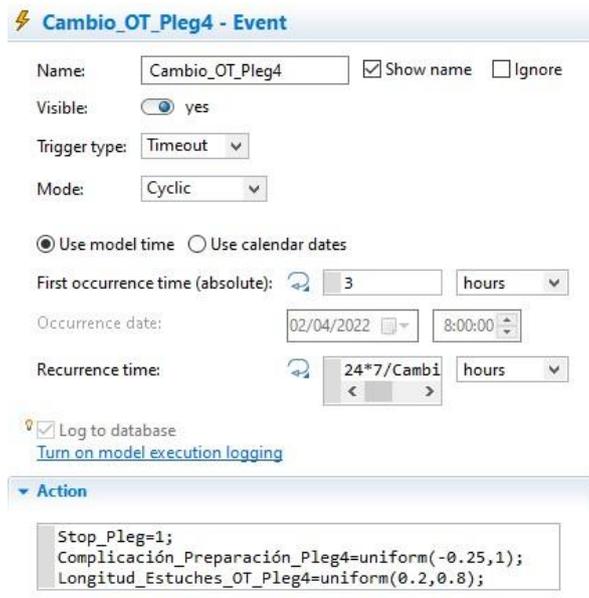


Figura 3.4. Ejemplo de programación de un evento cíclico activado a partir de 3 horas de simulación.

En la figura 3.4, se aprecia un evento activado tras un tiempo determinado (3 horas en este caso), para después repetirse cada cierto periodo de tiempo. Una vez el evento se activa, tienen lugar las acciones especificadas en el recuadro *Action*.

Los mapas de estado, o *Statecharts* en Anylogic, serán usados en este estudio de forma similar a los eventos cíclicos. La principal diferencia es que permiten trabajar con condiciones y tiempos a la vez. Además, los intervalos de tiempo no tienen por qué ser iguales. Esto permitirá, por ejemplo, definir el comportamiento de los camiones de abastecimiento en el modelo de la planta de envases. En él, los camiones llegan cada 24 horas, y emplean 1 hora para descargar los pallets de cartón.

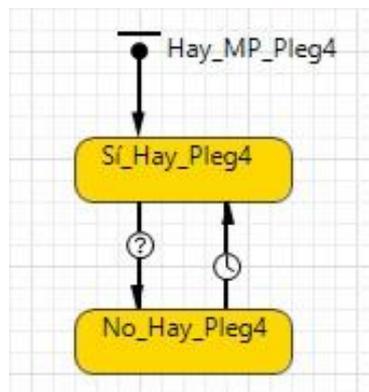


Figura 3.5. Ejemplo de un mapa de estados.

En la figura 3.5, se presenta un mapa de estados asociado a la existencia de materia prima para el abastecimiento de una máquina. Se puede observar que consta de dos estados destinitos: *Sí_Hay_Pleg4* y *No_Hay_Pleg4*. El cambio de un estado a otro se puede dar bien por una condición, indicada por un signo de interrogación, o tras un tiempo determinado, representado por un reloj. En cada estado, se asignan distintos valores a variables asignadas a la Plegadora 4, mediante las que se regula el funcionamiento de la máquina.

Finalmente, tanto los costes de operación de las plantas como los ingresos obtenidos gracias a su funcionamiento se recogerán en variables. Estas se encuentran en la paleta *Agents*. Mediante un evento cíclico, que se llamará *Fin_Hora*, la mayoría de las variables serán actualizadas.

Es cierto, por otro lado, que un determinado número de variables no se actualizarán de forma cíclica. Estas variables principalmente dependerán de condiciones especiales, como recargas de emergencia de materia prima.

Mediante todas estas herramientas se construirán los modelos de este trabajo. Una vez contruidos se simularán, y a partir de los gráficos que se obtengan con los resultados del funcionamiento de los sistemas, se procederá a la optimización.

Para la optimización de los procesos de los casos de estudio, se emplearán los experimentos de simulación de Anylogic.

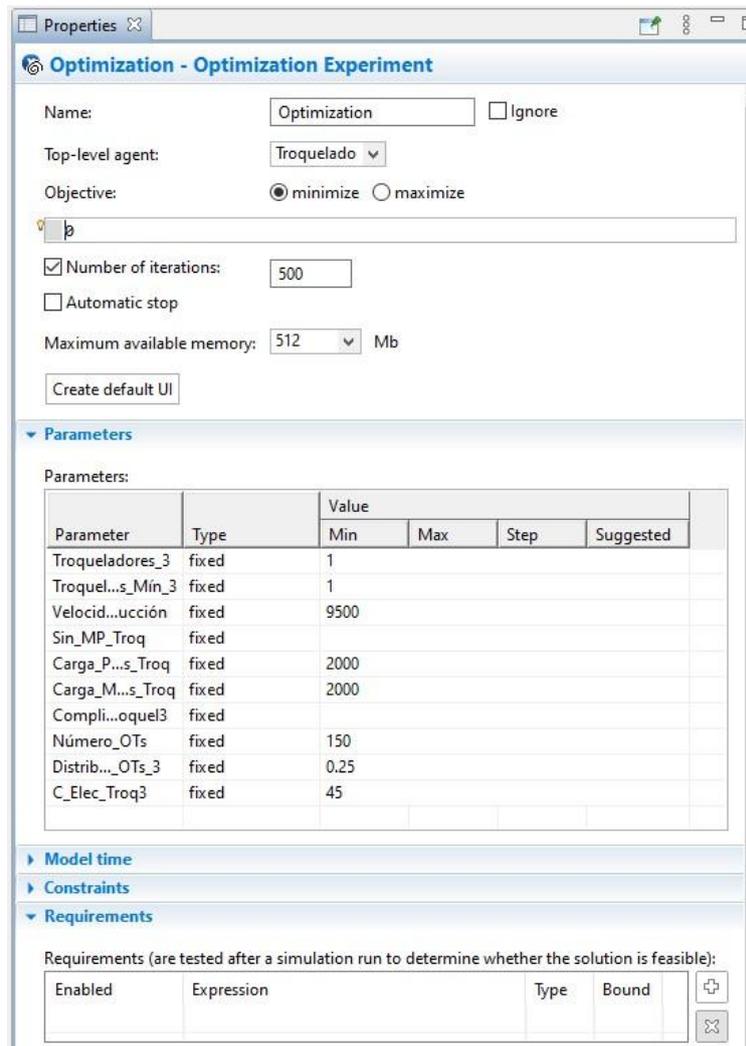


Figura 3.6. Interfaz de los experimentos de optimización de Anylogic.

Son observables en la figura 3.6 tres secciones de gran importancia. La primera, permite definir la función objetivo (*Objective*), y permite elegir si se quiere maximizar o minimizar. También permite elegir la duración del experimento de optimización y la memoria de almacenamiento disponible.

La segunda zona destacada es *Parameters*, donde se definirán los parámetros sobre los que se trabajará en la optimización, y los valores que podrán tener. Como se puede apreciar, se puede elegir el tipo de valor que tiene el parámetro (fijo, continuo o discreto), como los valores máximos y mínimos que estos pueden tomar. Además, se puede dar un valor de paso para los parámetros discretos. Finalmente, la columna *Suggested* permite seleccionar los puntos donde comenzar las iteraciones.

El último apartado de la interfaz de optimización es *Requirements*. En esta interfaz se establecen las cotas que definen la viabilidad o inviabilidad de los resultados obtenidos por el cálculo de optimización. Gracias a este campo se evita la maximización de los beneficios mediante la contratación de 15.000 nuevos trabajadores, por ejemplo.

Obtenidos unos resultados de optimización viables, se procederá finalmente, a la justificación de éstos, buscando no solo la viabilidad teórica de las medidas de mejora, sino la posibilidad real de implementación de los cambios.

4. Aplicación a un modelo básico

Para visualizar con facilidad todos los elementos mencionados en el Capítulo 2, y la forma de trabajar con Anylogic explicada en el Capítulo 3, se diseñará aquí un simple proceso lineal con una única materia prima y un solo producto, el cual se obtiene en tres procesos distintos.

4.1 Características de partida

De forma previa a la construcción de este primer modelo, es necesario definir las hipótesis sobre las que se apoyará. Varias de estas hipótesis estarán presentes tanto en el modelo básico, como en el diseño de la planta de producción de envases de cartón.

Los principios en los que se apoyará este modelo son:

- La fábrica funciona 24 horas al día, y 7 días a la semana.
- Las unidades de tiempo del sistema serán as horas.
- La materia prima entra de forma regular a la fábrica.
- No existe rechazo interno ni externo de producto.
- Todo producto terminado acaba saliendo a mercado.

4.2 Modelado

Esta planta inicial constará de una simple secuencia lineal con una materia prima y tres procesos distintos, y seguirá el diagrama de bloques presentado en la figura 4.1:

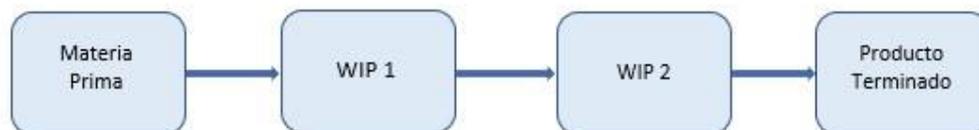


Figura 4.1. Diagrama de bloques en del modelo básico de una planta de producción.

Como se puede observar, se trata de un sistema sencillo, sin complejidad aparente. Aun así, consta de variables y parámetros que se deben comentar.

Las variables de stock definidas son las siguientes:

- Materia Prima.
- WIP 1.
- WIP 2.
- Producto terminado.

Estas variables de stock están relacionadas entre sí y con el exterior por otras variables, de flujo, en este caso. Dichos flujos son:

- Entrada de materia prima
- Proceso 1.
- Proceso 2.
- Proceso 3.
- Salida a mercado. Si bien se comentó anteriormente que todo lo producido se vende, con esta variable de flujo se define el ritmo de salida del producto terminado.

Por otro lado, existen una serie de variables dinámicas, cuya principal función será el monitoreo de la evolución de los costes del sistema durante cada hora.

- Ingresos por ventas.
- Costes de almacenamiento.
- Costes de personal.
- Costes de funcionamiento de planta. Asociados al coste eléctrico del funcionamiento de esta.
- Suma total de los costes. Será el valor agregado de todos los gastos estimados en el sistema.

Para añadir un nivel de complejidad básico a este modelo tan sencillo, se han creado dos parámetros. La relación entre ambos parámetros influirá directamente sobre la velocidad de los procesos de fabricación.

- Personal.

- Personal mínimo.

El parámetro correspondiente al personal que trabaja en la fábrica será el que se emplee para optimizar el funcionamiento del sistema.

Finalmente, todos los valores registrados en cada hora se guardan en una serie de variables acumulativas. De estas variables se obtendrán los gráficos que servirán para estudiar el comportamiento del sistema, y elegir la ruta de optimización.

- Beneficios.
- Coste total.
- Ingresos por ventas totales.
- Costes totales de almacenamiento.
- Coste total de personal.

A continuación, en la tabla 4.1, se presentan todas las variables y parámetros en el sistema, así como sus valores y ecuaciones.

Nótese que las ecuaciones variables agregadas vienen precedidas de “+=”, indicando la recursividad de estos elementos.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
Materia_Prima	Stock	100	Entrada_MP-Proceso_1
WIP_1	Stock	50	4*Proceso_1-Proceso_2
WIP_2	Stock	200	Proceso_2-1.5*Proceso_3
Producto_Terminado	Stock	150	35*Proceso_3-Salida_a_Mercado
Entrada_MP	Flujo		15
Proceso_1	Flujo		Personal/Personal_Mínimo
Proceso_2	Flujo		Personal/Personal_Mínimo
Proceso_3	Flujo		Personal/Personal_Mínimo
Salida_a_Mercado	Flujo		normal(10,40)
Coste_Personal	Var. Dinám.		20*Personal
Costes_Funcionamiento_Planta	Var. Dinám.		Proceso_1+Proceso_2+Proceso_3
Costes_Almacenamiento	Var. Dinám.		Materia_Prima*0.5+WIP_1*0.65+WIP_2*0.65 +Producto_Terminado*0.8
Suma_Coste	Var. Dinám.		Costes_Funcionamiento_Planta + Costes_Personal + Costes_Almacenamiento

Personal	Parámetro	120	
Personal_Mínimo	Parámetro	100	
Beneficios	Variable	0	$+=\text{Ingresos_Ventas}-\text{Suma_Coste}$
Ingresos_Ventas_Totales	Variable	0	$+=\text{Ingresos_Ventas}$
Coste_Total	Variable	0	$+=\text{Costes_Almacenamiento}+\text{Costes_Personal}+\text{Costes_Funcionamiento_Planta}$
Coste_Personal_Total	Variable	0	$+=\text{Costes_Personal}$
Coste_Almacenamiento_Total	Variable	0	$+=\text{Costes_Almacenamiento}$

Tabla 4.1. Variables y parámetros del modelo básico.

Finalmente, en la figura 4.3 se aprecia el sistema en su conjunto. Se pueden observar todos los elementos anteriormente descritos. Además, en la esquina inferior izquierda del esquema destaca el evento *Fin_Hora*. Como se comentó en la sección 3, esta herramienta se emplea para monitorizar el desarrollo de la simulación, facilitando la recopilación de datos.

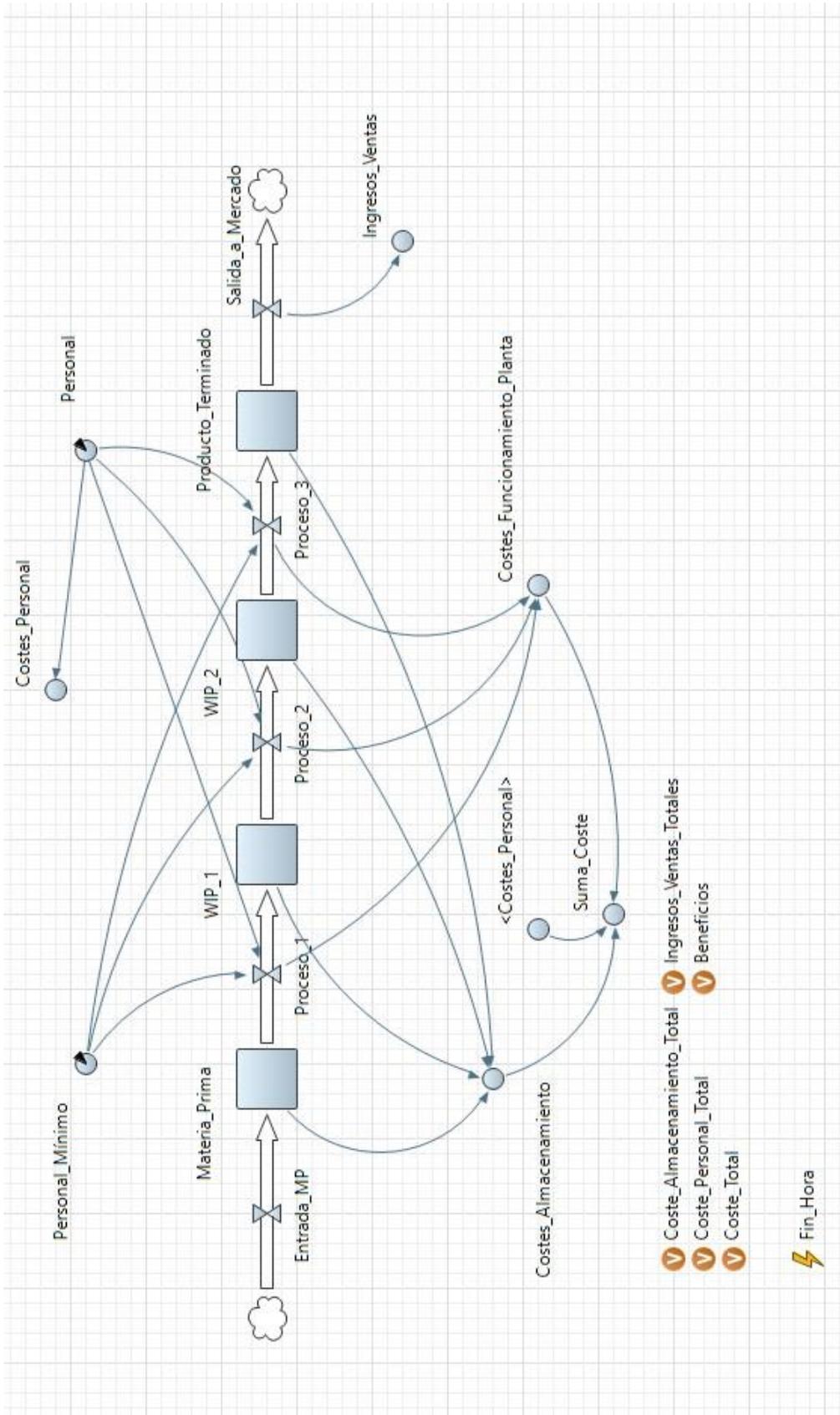


Figura 4.3. Esquema del modelo básico.

4.3 Resultados

Tras simular el sistema durante siete días, el modelo se queda en el siguiente estado final, apreciable en la figura 4.4.

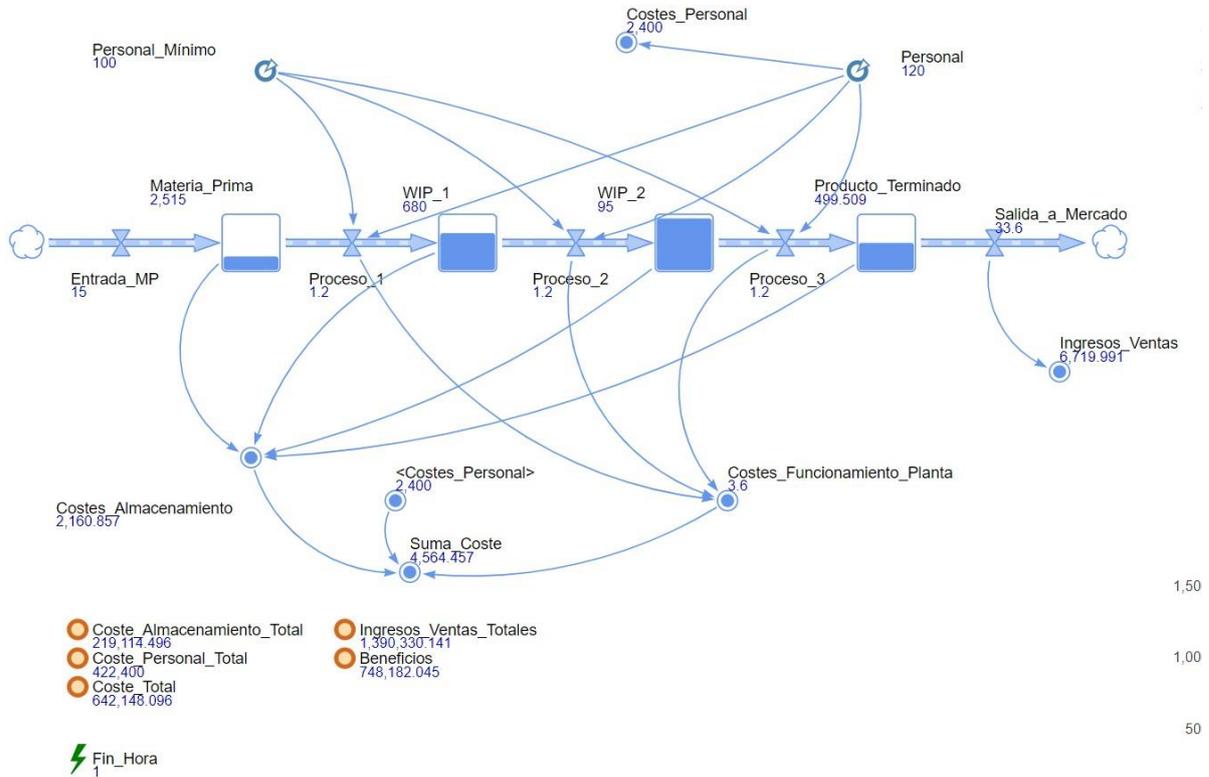


Figura 4.4. Estado final del modelo tras la simulación.

Se puede observar en la figura 4.4, que se obtuvo un beneficio de 748.182 euros durante la semana de funcionamiento. La producción total fue de 6.951 unidades de producto terminado.

4.4 Optimización

Debido a la sencillez de ese caso en particular, en la interfaz de optimización se trabajará con muy pocos elementos. En la imagen de la figura 4.5 se aprecian todos los datos necesarios para mejorar los resultados de la simulación original.

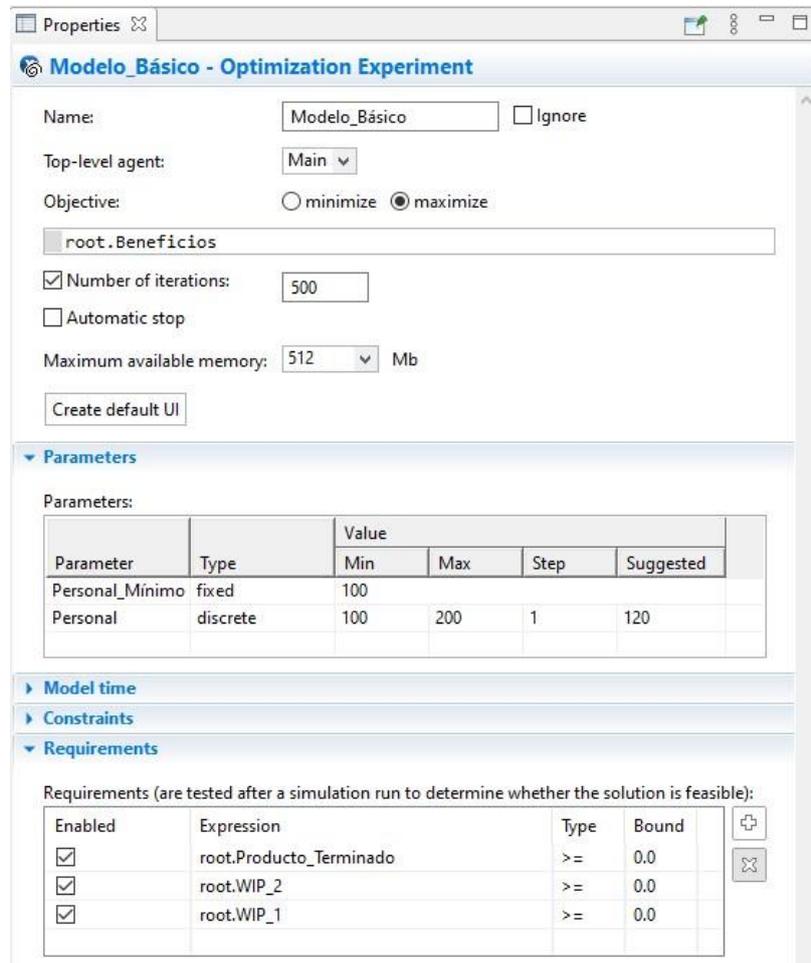


Figura 4.5. Interfaz de optimización del modelo básico.

En este caso, al existir la variable *Beneficios*, no es necesario introducir una ecuación en el campo *Objective*. Sin embargo, sí que se debe indicar que se busca maximizar la función indicada.

En la sección *Parameters*, se ha indicado *Personal* como el parámetro de entrada a la optimización. Está definido como un elemento discreto, cuyos valores pueden estar comprendidos entre 100 (*Personal_Mínimo*) y 200 trabajadores. Como punto de partida se han propuesto los 120 trabajadores que ya estaban en el sistema.

Finalmente, al ser poca la complejidad del sistema, simplemente se ha restringido la optimización, en *Requirements*, a asegurarse que en todo momento se dispone de stock.

Definida la interfaz, se inicia el experimento de optimización. En la figura 4.6 se muestran los resultados.

ModeloBasico : Modelo_Básico



Figura 4.6. Experimento de Optimización del modelo básico.

Se aprecia que el sistema pudo dar el resultado óptimo con solo 10 iteraciones. La planta obtendrá su mejor rendimiento funcionando con 112 trabajadores. Obtenido este resultado, se exportan los valores del experimento y se inicia de nuevo la simulación del modelo.

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

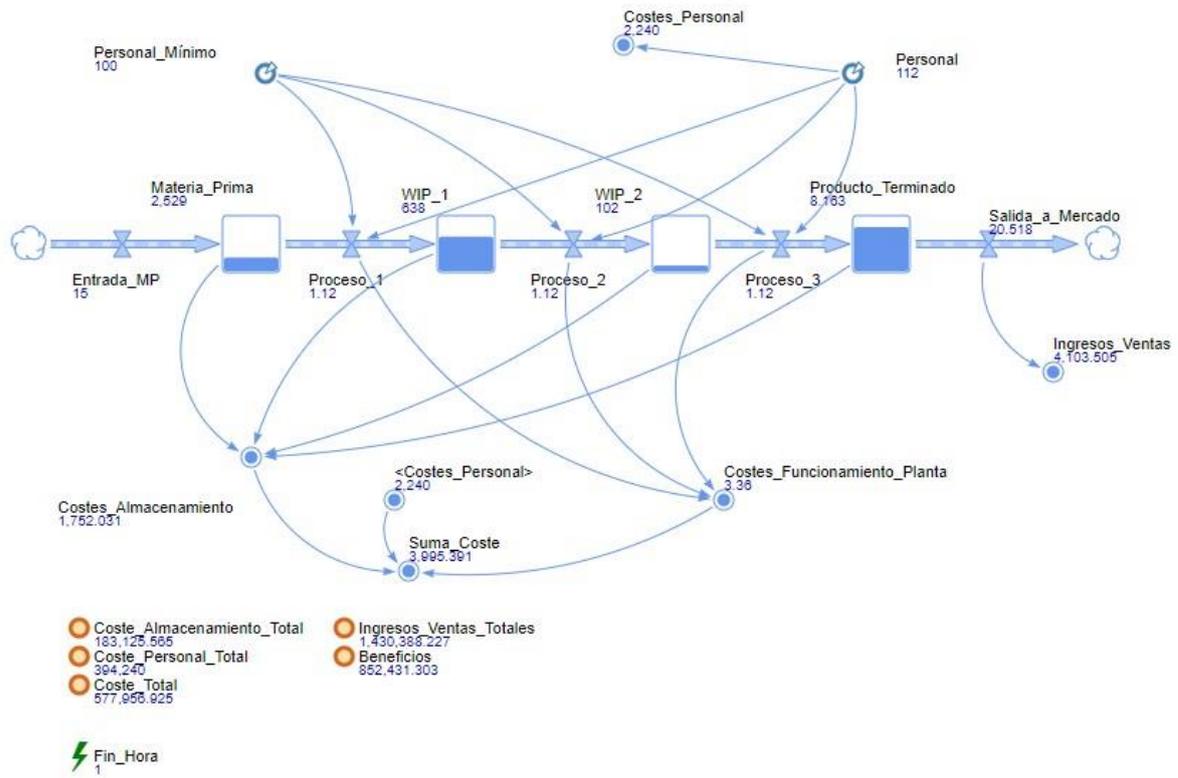


Figura 4.7. Estado final del modelo tras la optimización.

Tras la optimización, se puede apreciar que el beneficio obtenido es de 852.431 euros, lo cual supone un aumento en el rendimiento económico de la planta de un 13,93 %. Además, la producción se vio incrementada en un 2,88% con la salida en este caso de 7.151 unidades de producto.

5. Diseño de una planta de producción de envases de cartón: Graphic Packaging International Maliaño

Presentado el funcionamiento de Anylogic en un caso sencillo y genérico, ahora se pasará a estudiar un caso más concreto y complejo. En este caso, aunque se parta de una única materia prima esencial, el cartón, será necesario recurrir a otras, como tintas, cajas, etc. Del mismo modo, a la salida de fábrica se encontrarán varios tipos de productos, resultado de un proceso productivo con múltiples líneas de fabricación.

5.1 Descripción del caso

La planta de Graphic Packaging International de Maliaño se dedica a hacer envases de cartón de alimentación y farmacéutica. Si bien en principio parece un producto sencillo, la fabricación de dichos paquetes tiene cierto nivel de complejidad. Un gran número de variables influyen en la velocidad de producción en este tipo de cadenas de fabricación: la disponibilidad de cartón, de tintas, el mismo número de órdenes de trabajo, la carga de pallets, etc. son solo algunos de todos los factores que son clave en el correcto funcionamiento de este proceso, y asegurar el correcto uso de estos recursos es clave en el diseño de un programa de producción que provea con el máximo beneficio.

5.2 Características de partida

Previamente al inicio del modelado, es necesario enumerar, y explicar, las hipótesis sobre las que se apoyará el trabajo. Algunas han sido empleadas debido a la falta de acceso a información, y otras para facilitar un modelado lógico del sistema. Las hipótesis son las siguientes:

- La fábrica trabajará 24 horas al día, los 7 días de la semana.
- Las unidades de tiempo del sistema serán las horas.
- Los distintos tipos de productos siempre seguirán las mismas líneas de fabricación.

- No existen reclamaciones externas del cliente. A diferencia del modelo básico, existirá un equipo de control de calidad, que generará rechazos tanto de productos semiterminados como terminados.
- Debido al desconocimiento del comportamiento exacto de las máquinas en función del cartón empleado, se ha supuesto el uso del mismo cartón en la planta.
- Tanto la materia prima, como los semiterminados y terminados, se podrán ubicar en el almacén de la planta
- Los troqueles de cada rama de la sección de troquelado tendrán siempre el mismo número de poses, generando siempre cantidades de estuches iguales.
- Todo producto terminado sale a mercado.
- Todos los productos terminados se depositarán en el mismo tipo de cajas.
- El plan de producción será diseñado para una semana y no será alterado. De esta forma, se puede tener un ritmo de fabricación más constante y fácil de monitorizar.

5.3 Modelado

Siguiendo el mismo modo de proceder que en la sección 4.2 de este estudio, de forma previa al estudio en detalle del diseño de cada parte de la planta, se presentará, de forma sencilla, el funcionamiento de esta planta mediante una serie de diagramas de bloques.

Si bien la disposición en planta de los elementos que la componen no lo siguen, la cola de fabricación de GPI está dispuesta de forma que se asegure un flujo lineal de producto.

Es de gran importancia comentar las unidades empleadas a lo largo del diseño del sistema. Estas serán: pallets, pliegos y estuches. Cada pallet contendrá un número determinado de pliegos, que pueden ser de cartón en blanco (materia prima), o impresos; cada pliego se troquelará y dividirá en un determinado número de estuches. Finalmente, estos estuches se guardarán en cajas que se dispondrán en pallets de producto terminado, los cuales se almacenarán hasta su salida de fábrica.

La fábrica presenta cuatro secciones bien diferenciadas:

- Preimpresión. En este estudio, se ha denominado así al área que engloba dos zonas: el almacén de materia prima y la entrada a la impresora. Aquí se dispone la materia prima para su entrada a planta desde el almacén.
- Impresión. Mediante este bloque se realiza la primera transformación de la materia prima en WIP.
- Troquelado. Espacio en el cual se produce la segunda transformación de producto. En las máquinas troqueladoras, los pliegos se dividen en estuches. Esta sección se divide en dos líneas: la de troquelado normal y la premium. La única diferencia en cuanto a producción es un paso previo por dar antes del troquelado en la línea premium: será necesario estampar los pliegos.
- Finishing. Aquí se transforman los distintos productos semiterminados en terminados. Habrá tres tipos de líneas distintas: plegado, para estuches normales; manipulado, para estuches de tipo “yogur”; y conformado, para bandejas.

En la figura 5.1 se presenta el diagrama de bloques simplificado de la planta.

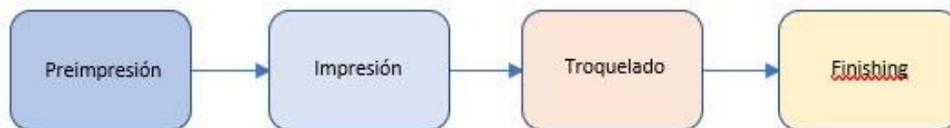


Figura 5.1. Diagrama de bloques de la planta de GPI.

Se debe también enumerar las máquinas que componen la planta. Gracias a ellas, es más fácil comprender la disposición de las distintas líneas de producción.

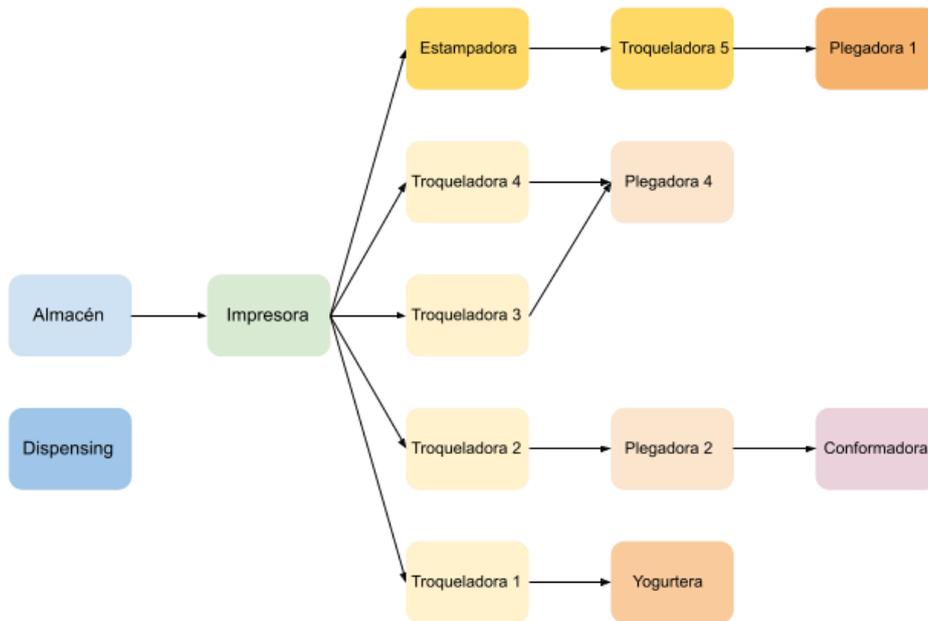


Figura 5.2. Diagrama de bloques por máquinas de la planta.

Apreciables en la figura 5.2 son las distintas líneas que componen las secciones de la secuencia de producción.

- En primer lugar, la línea premium está formada por la estampadora, la troqueladora 5 y la plegadora 1.
- La línea de plegado está integrada por la plegadora 4, alimentada por las troqueladoras 3 y 4.
- La troqueladora 2 alimenta a la plegadora 2. En esta máquina se preparan los estuches que entran a la conformadora, terminando así la línea.
- La troqueladora 1 alimenta la yogurtera. Estas dos máquinas componen la línea de manipulado.

En los próximos capítulos de este estudio se presentarán, y explicarán en detalle, los distintos subsistemas que forman el todo de esta planta de producción de envases de cartón.

5.3.1 Preimpresión

Como se ha comentado anteriormente, este subsistema del modelo engloba la recepción de materia prima en la fábrica, así como la preparación del cartón y las tintas para su entrada en impresión.

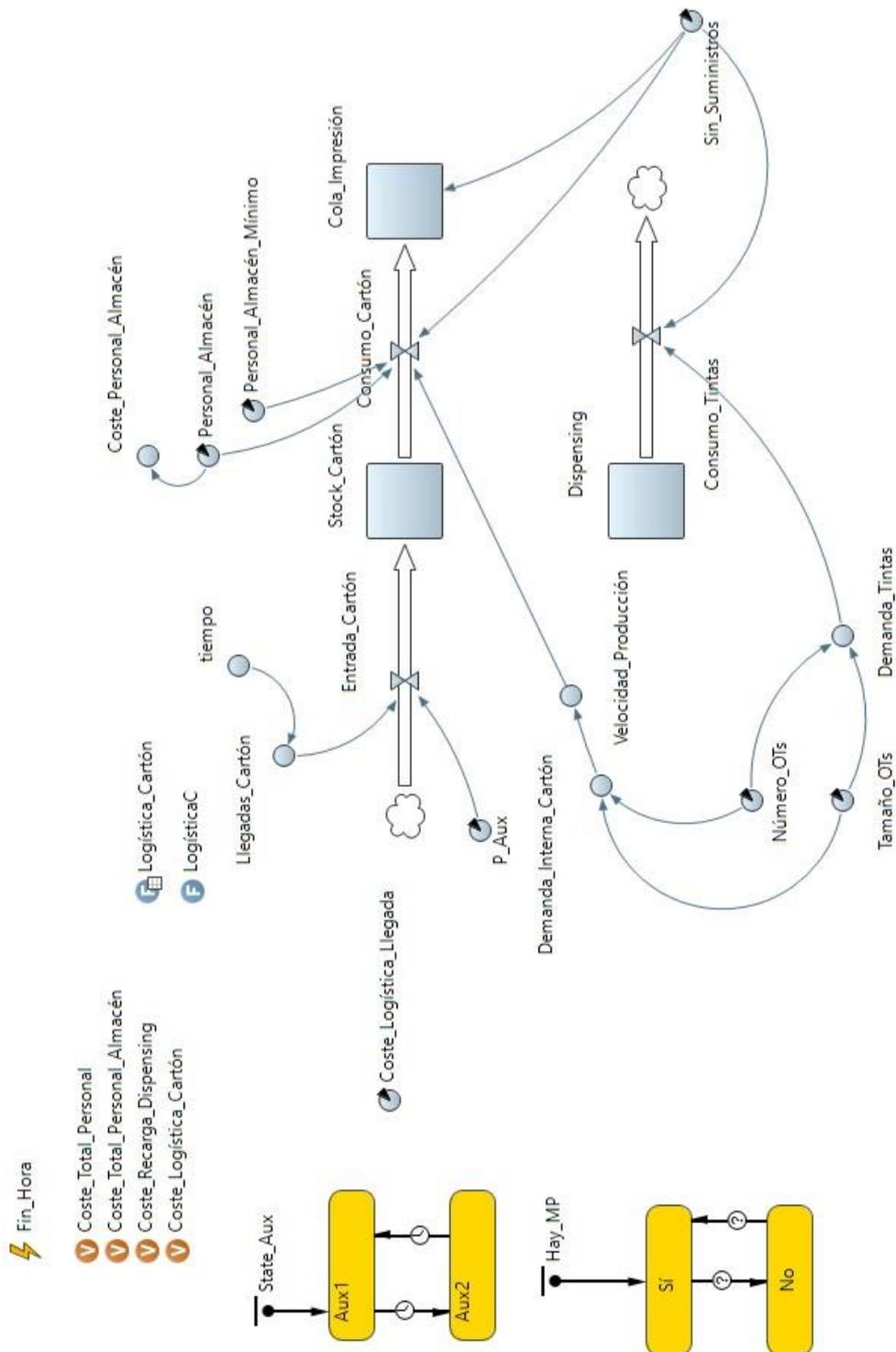


Figura 5.3. Subsistema de Preimpresión.

En la figura 5.3 se puede observar el diseño de esta sección. Son apreciables los tres distintos stocks que conforman la base de este subsistema: *Stock_Cartón*, *Cola_Impresión* y *Dispensing*.

La cantidad de materia prima almacenada cada hora en *Stock_Cartón* vendrá dada por la diferencia entre los flujos de entrada y salida de esta variable.

El flujo de entrada, *Entrada_Cartón*, representa el aumento en la materia prima disponible gracias a la llegada de camiones de abastecimiento. Dichos camiones aportarán cada 24 horas una cantidad determinada de pallets (presentada en la tabla 5.1). El total de pliegos recibidos se obtendrá multiplicando los pallets por 3500, el número de pliegos por pallet de materia prima.

Table data

Loaded from database

Argument	Value
1	120
2	120
3	110
4	105
5	105
6	100
7	80

Table controls: +, x, up, down, clipboard, print, refresh

Tabla 5.1. Número de pallets descargados en cada llegada de camiones. Función tabla *Llegadas_Cartón*.

Se debe apuntar que la cantidad total de pliegos recibidos gracias a esta tabla es de 2.590.000 pliegos de cartón. Por otro lado, la impresora es capaz de producir 3.000.000 de pliegos impresos a la semana (18.000 pliegos/hora * 168 horas).

Nótese la presencia de la función *LogísticaC*. Esta función es necesaria para extraer en cada momento los valores de la tabla *Llegadas_Cartón* y obtener así el flujo de entrada.

A la hora de modelar las llegadas de camiones a planta se presentó un problema de modelado: La paleta de *System_Dynamics* trabaja únicamente con elementos continuos, por lo que no

era posible que se produjera una única descarga a una determinada hora. La solución a esta situación pasa por el mapa de estados *State_Aux*, que controla el parámetro Auxiliar *P_Aux*.

Cada vez que un camión llega, este mapa de estados activa el parámetro auxiliar durante sólo una hora, permitiendo la descarga. Las siguientes 23 horas hasta la llegada del siguiente camión, el parámetro se desactiva y el flujo de *Entrada_Cartón* es nulo.

El flujo de salida de *Stock_Cartón* es *Consumo_Cartón*. Este movimiento representa la velocidad de preparación de materia prima para su entrada en impresión, a través del stock *Cola_Impresión*. El valor base de esta velocidad se obtendrá mediante la variable dinámica *Velocidad_Producción*.

La velocidad de producción de la fábrica se calcula aplicando el principio del *Heijunka*, o nivelado de la producción. La demanda total (en el sistema: *Demanda_Interna_Cartón*) de cartón exigida por el plan de fabricación se dividirá entre el total de horas de la semana. De este modo se obtiene el ritmo teórico a seguir tanto en preimpresión como en impresión.

La demanda interna de cartón se calcula como el producto de dos parámetros. El primero, *Número_OTs*, representa la cantidad total de órdenes de fabricación. El segundo, *Tamaño_OTs*, proporciona el tamaño medio de todas las órdenes. Estos serán los dos primeros parámetros de entrada al sistema.

Volviendo al flujo *Consumo_Cartón*, su valor base se verá influido por dos modificadores, el cociente entre *Personal_Almacén* y *Personal_Almacén_Mínimo*, y un parámetro llamado *Sin_Suministros*.

Este parámetro está ligado tanto a las existencias de cartón en el almacén como al tercer y último stock de este subsistema: *Dispensing*.

En la planta de GPI, la sala de dispensing es el lugar donde se preparan las tintas que se emplearán en la impresora para fabricar los distintos productos. En este modelo, se ha llamado así al almacén de tintas, ya que éstas se ubican en un pequeño almacén perteneciente a este departamento.

Se puede observar que el flujo de salida de este stock, *Consumo_Tintas*, no alimenta al stock *Cola_Impresión*. Esto se debe a que las distintas tintas se han interpretado como una materia prima "secundaria" que se consume durante el proceso, pero no influye en el número de

pliegos preparados para entrar en la impresora. La carga impuesta en este stock viene definida, de manera similar que el consumo de cartón, por la exigencia total de tintas que supone la relación de los parámetros de entrada *Número_OTs* y *Tamaño_OTs* (ver variable dinámica *Demanda_Tintas*).

El agotamiento de existencias en el almacén de tintas o en el almacén de cartón provocará la activación del mapa de estados *Hay_MP*, que recargará el stock *Dispensing*, suponiendo un cargo monetario.

Finalmente, es necesario comentar las variables de gastos que aparecen en este subsistema:

- *Coste_Total_Personal_Almacén*. Representa el gasto necesario por la presencia de los almaceneros.
- *Coste_Logística_Cartón*. Acumula los cargos de la llegada de camiones de suministro de materia prima.
- *Coste_Recarga_Dispensing*. Cada vez que sea necesario el reabastecimiento de tintas aumentará el coste monetario acumulado en esta variable.

Como resumen de este subsistema, se presenta la tabla 5.2, con el resumen de todas las variables que intervienen en el área de Preimpresión.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
Stock_Cartón	Stock	20000	Entrada_Cartón-Consumo_Cartón
Cola_Impresión	Stock	10000	Consumo_Cartón-Impresión
Dispensing	Stock	2000	-Consumo_Tintas
Entrada_Cartón	Flujo		3500*Llegadas_Cartón
Consumo_Cartón	Flujo		Velocidad_Producción * Sin_Suministros * (Personal_Almacén /Personal_Almacén_Mínimo)
Consumo_Tintas	Flujo		Demanda_Tintas * Sin_Suministros
Llegadas_Cartón	Var. Dinám.		LogísticaC(tiempo)
tiempo	Var. Dinám.		time()
Coste_Personal_Almacén	Var. Dinám.		Personal_Almacén*10.5
Demanda_Interna_Cartón	Var. Dinám.		Tamaño_OTs * Número_OTs
Demanda_Tintas	Var. Dinám.		(Número_OTs*Tamaño_OTs/2)/(500*7*24)
Velocidad_Producción	Var. Dinám.		Demanda_Interna_Cartón/(7*24)
Coste_Logística_Llegada	Parám.	10000	
P_Aux	Parám.	1	*Cambia según el mapa de estados State_Aux
Personal_Almacén	Parám.	2	
Personal_Almacén_Mínimo	Parám.	2	
Sin_Suministros	Parám.	1	*Cambia según el mapa de estados Hay_MP
Número_OTs	Parám.	150	
Tamaño_OTs	Parám.	10000	
Logística_Cartón	Tabla		Valores Indicados en la Tabla 5.1
LogísticaC	Función		return Logística_Cartón(time())
Coste_Total_Personal_Almacén	Variable		+=Coste_Personal_Almacén
Coste_Recarga_Dispensing	Variable		Si Hay_MP está en "No", +=5000
Coste_Logística_Cartón	Variable		Si State_Aux está en Aux2, +=Coste_Logística_Llegada

Tabla 5.2 Resumen de variables y parámetros de Preimpresión.

5.3.2 Impresión

En esta área se lleva a cabo la primera transformación de la materia prima en producto semiterminado mediante el proceso conocido como impresión offset. Este método de fabricación se apoya en el uso de secuencias de rodillos, que impregnan planchas de aluminio con distintas capas de color, dando la apariencia final al pliego. Una vez este pliego esté impreso, pasará a ser el WIP de impresora, que alimenta la sección de troquelado.

En la figura 5.4 se presenta el subsistema de Impresión. El funcionamiento de esta sección se describirá siguiendo la misma estructura que en el apartado anterior.

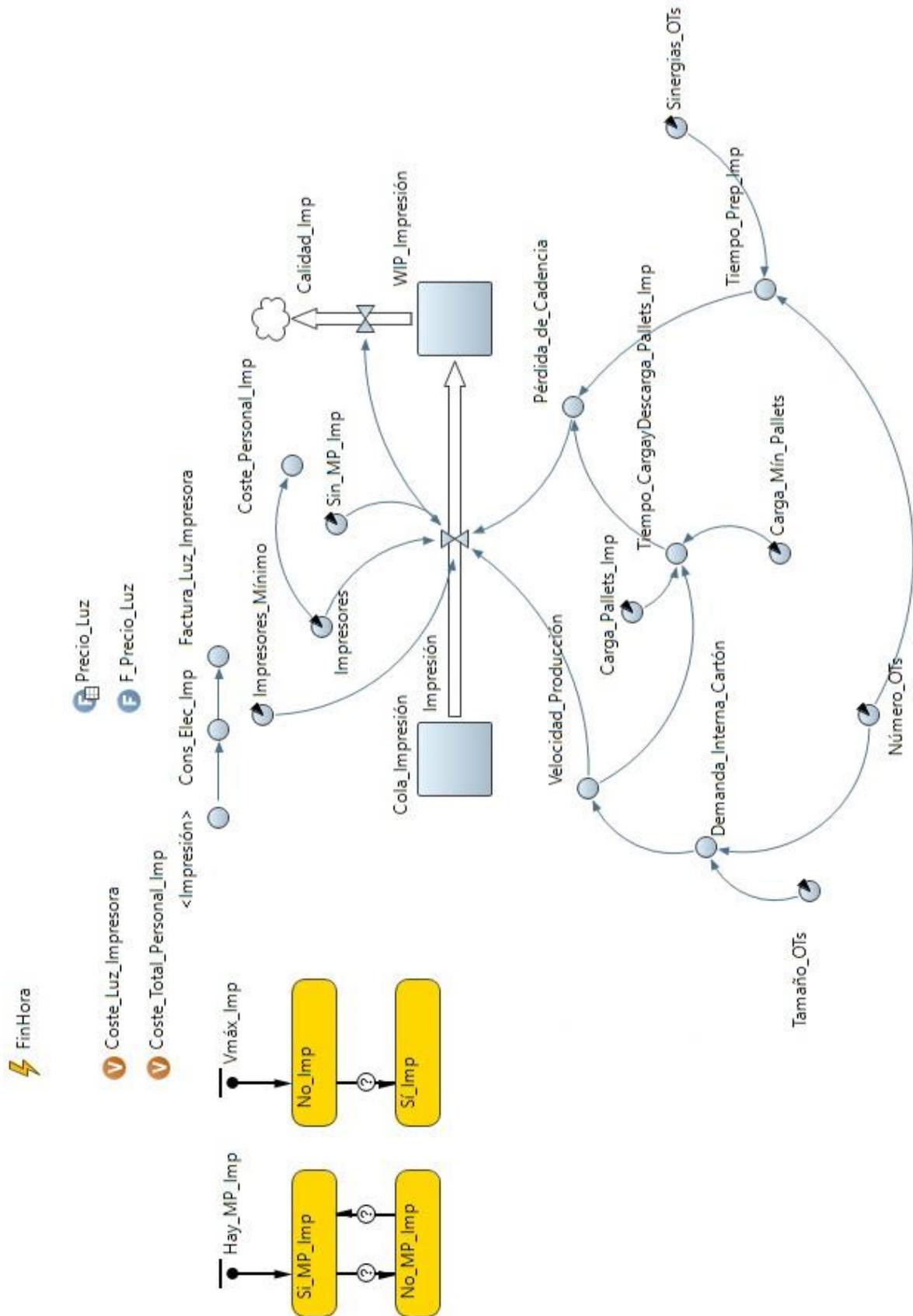


Figura 5.4. Esquema del área de Impresión.

Apreciables en la figura 5.4 son las dos variables de stock que ocupan el centro de este subsistema. De la primera variable, *Cola_Impresión*, ya conocida, la impresora extrae el material y mediante el flujo *Impresión*, lo transforma en el stock *WIP_Impresión*.

La impresora funcionará a un ritmo determinado, cuyo valor viene dado por el producto de los siguientes factores. El primero, el ritmo de producción teórico de la planta, la variable *Velocidad_Producción*, explicada en el apartado 5.3.1. El segundo será el cociente entre los trabajadores necesarios y los empleados (*Impresores* e *Impresores_Mínimo*). El tercer factor, *Sin_MP_Imp*, funciona de igual manera que *Hay_MP* (ver sección 5.3.1), y condiciona la actividad de la impresora a la existencia de materia prima preparada en la cola de impresión. El último elemento de la ecuación del flujo *Impresión* es *Pérdida_Cadencia*.

La pérdida de cadencia es un efecto que surge de forma natural en cualquier proceso productivo, como resultado de la realización de las actividades en condiciones reales. Para representar este fenómeno con la mayor exactitud posible, se ha modelado la variable dinámica *Pérdida_Cadencia*, un coeficiente adimensional que aporta el total de horas que se aprovechan realmente por día de actividad de la impresora.

Si la máquina, como se ha comentado, funcionara en condiciones perfectas, imprimiría según el ritmo marcado por *Velocidad_Producción*. Por desgracia, la máquina ha de ser preparada cada vez que entra una nueva referencia, y además es necesario alimentarla con pallets de materia prima, y retirar los pallets de WIP. Todas estas operaciones no generan beneficios, y sin embargo son necesarias. Las variables *Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Imp* y *Tiempo_Prep_Imp* han sido diseñadas para modelar estos eventos. Las unidades de ambas serán las horas.

El tiempo de carga y descarga de pallets tiene un valor base de 3 minutos tanto para la entrada como la salida de la máquina. Además, se verá afectado de forma proporcional por el cociente entre los parámetros *Carga_Pallets_Imp* y *Carga_Mín_Pallets_Imp*. Inicialmente, los pallets tendrán 3.500 pliegos, la cantidad con la que llegan a fábrica.

Una nueva referencia tarda aproximadamente 20 minutos en ser preparada en la impresora. Esta operación incluye principalmente la limpieza de los rodillos, la carga de estos con las nuevas tintas, y la colocación de planchas.

La frecuencia media de cambio de productos vendrá dada por el cociente entre *Número_OTs* (el total de cambios a realizar), y las horas en una semana. A esta variable se ha añadido un factor, denominado *Sinergias_OTs*, este valor será un input del sistema. Con este parámetro se modela la efectividad de diseño del planning de producción. Buscando secuencias de productos que empleen las mismas tintas, se reducen ampliamente los tiempos de preparación.

Ligado a la actividad de la impresora, se produce un determinado consumo eléctrico. La variable dinámica *Cons_Elec_Imp* se calcula como el producto de una potencia asignada de 400 KW, multiplicado por un consumo estimado para la máquina. Este consumo seguirá la ecuación:

$$\text{Porcentaje de consumo} = 0,3 + \text{Impresión}/18000 \quad (1)$$

Donde el primer término es un 30%, estimado como la demanda eléctrica de la máquina por estar encendida. El segundo sumando es la relación entre el ritmo de funcionamiento de la impresora y su velocidad máxima.

El valor obtenido de este consumo de energía se multiplicará por los valores extraídos de la tabla *Precio_Luz*, que contiene los valores de €/kwh del día 24 de marzo de 2022, mediante la función *F_Precio_Luz*. Estos precios se pueden apreciar en la tabla a continuación.

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

Hora	€/kWh
0	0,284
1	0,27715
2	0,25143
3	0,24571
4	0,24586
5	0,25966
6	0,2944
7	0,30141
8	0,33088
9	0,32941
10	0,39018
11	0,37011
12	0,35982
13	0,36138
14	0,2937
15	0,29193
16	0,31607
17	0,32957
18	0,39993
19	0,40347
20	0,43114
21	0,40777

22	0,32819
23	0,31938

Tabla 5.3. Precio por KWh del día 24 de marzo de 2022



Figura 5.5. Curva de precios de la luz para el día 24 de marzo de 2022, representada con Anylogic.

Las limitaciones físicas de la máquina se representan mediante el mapa de estados $V_{m\acute{a}x_Imp}$. Siempre que el flujo *Impresión* tenga un valor superior a 18.000 pliegos hora, la velocidad de impresión será capada al número anterior.

Finalmente, todo pliego impreso pasa a ser producto semiterminado, agrupado en la variable de stock $WIP_Impresión$. De este inventario de pliegos, se alimentan tanto las troqueladoras 1 a 4, como la estampadora de la línea premium.

Se puede observar un último flujo en este subsistema: $Calidad_Imp$. El personal de calidad de la planta vigila la adecuación de los productos semiterminados y terminados, y como tal, genera de cada máquina flujos de material rechazado.

Como en la sección anterior, queda explicar las variables en las que se acumularán los costes de funcionamiento de la planta. Son las siguientes:

- $Coste_Total_Personal_Imp$. Recogerá la manutención durante toda la semana de los trabajadores del área de impresión.
- $Coste_Luz_Impresora$. Factura de la luz de la impresora acumulada para toda la semana de simulación del modelo.

Antes de pasar al siguiente apartado del modelo, se presenta, en la tabla 5.6, el resumen de las variables que intervienen en el subsistema Impresión.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
Cola_Impresión	Stock	10000	Consumo_Cartón - Impresión
WIP_Impresión	Stock	0	Impresión - Calidad_Imp - Troqueladora_1 - Troqueladora_2 - Troqueladora_3 - Troqueladora_4 - Estampadora
Impresión	Flujo		Velocidad_Producción * Impresores/Impresores_Mínimo * Pérdida_de_Cadencia*Sin_MP_Imp
Calidad_Imp	Flujo		0.025*Impresión
Velocidad de Producción	Var. Dinám.		Demanda_Interna_Cartón/(7*24)
Pérdida_de_Cadencia	Var. Dinám.		(24-Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Imp-Tiempo_Prep_Imp)/24
Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Imp	Var. Dinám.		24*(2*Velocidad_Producción*3*(1+((Carga_Pallets_Imp-Carga_Mín_Pallets)/Carga_Mín_Pallets)))/(60*Carga_Pallets_Imp)
Tiempo_Prep_Imp	Var. Dinám.		24*(Número_OTs/(24*7))*(20*(1+Sinergias_OTs))/60*Sinergias_OTs
Coste_Personal_Imp	Var. Dinám.		8.62*Impresores
Cons_Elec_Imp	Var. Dinám.		400*(0.3+Impresión/18000)
Factura_Luz_Impresora	Var. Dinám.		Cons_Elec_Imp*F_Precio_Luz(time())

Impresores	Parám.	4	
Impresores_Mínimo	Parám.	3	
Carga_Pallets_Imp	Parám.	3500	
Carga_Mín_Pallets	Parám.	3000	
Sinergias_OTs	Parám.	0,5	
Tamaño_OTs	Parám.	10000	
Número_OTs	Parám.	150	
Sin_MP_Imp	Parám.	1	*Cambia según el mapa de estados Hay_MP_Imp
Precio_Luz	Tabla		Valores Indicados en la tabla 5.3
F_Precio_Luz	Función		return Precio_Luz(time());
Coste_Luz_Impresora	Variable		+=Factura_Luz_Impresora
Coste_Total_Personal_Imp	Variable		+=Coste_Personal_Imp

Tabla 5.4. Resumen de variables y parámetros de Impresión.

5.3.3 Troquelado

La cadena productiva continúa, y como se ha anticipado ya, llega al área de troquelado. Aquí, los pliegos se cortan empleando una tabla con cuchillas incrustadas, llamada troquel. En esta sección se produce la primera transformación, si bien nominal, de las unidades del modelo. El WIP de impresión entrará en el subsistema de troquelado como pliegos, y saldrá hacia el bloque de Finishing como estuches.

Ya se ha comentado que esta sección cuenta con 5 troqueladoras y una estampadora. La estampadora y la troqueladora 5 se explicarán por separado, en el siguiente apartado. Para explicar cómo se ha modelado el funcionamiento de las troqueladoras 1 a 4, se empleará la troqueladora 3.

Entonces, en la siguiente figura se aprecia el subsistema de las troqueladoras:

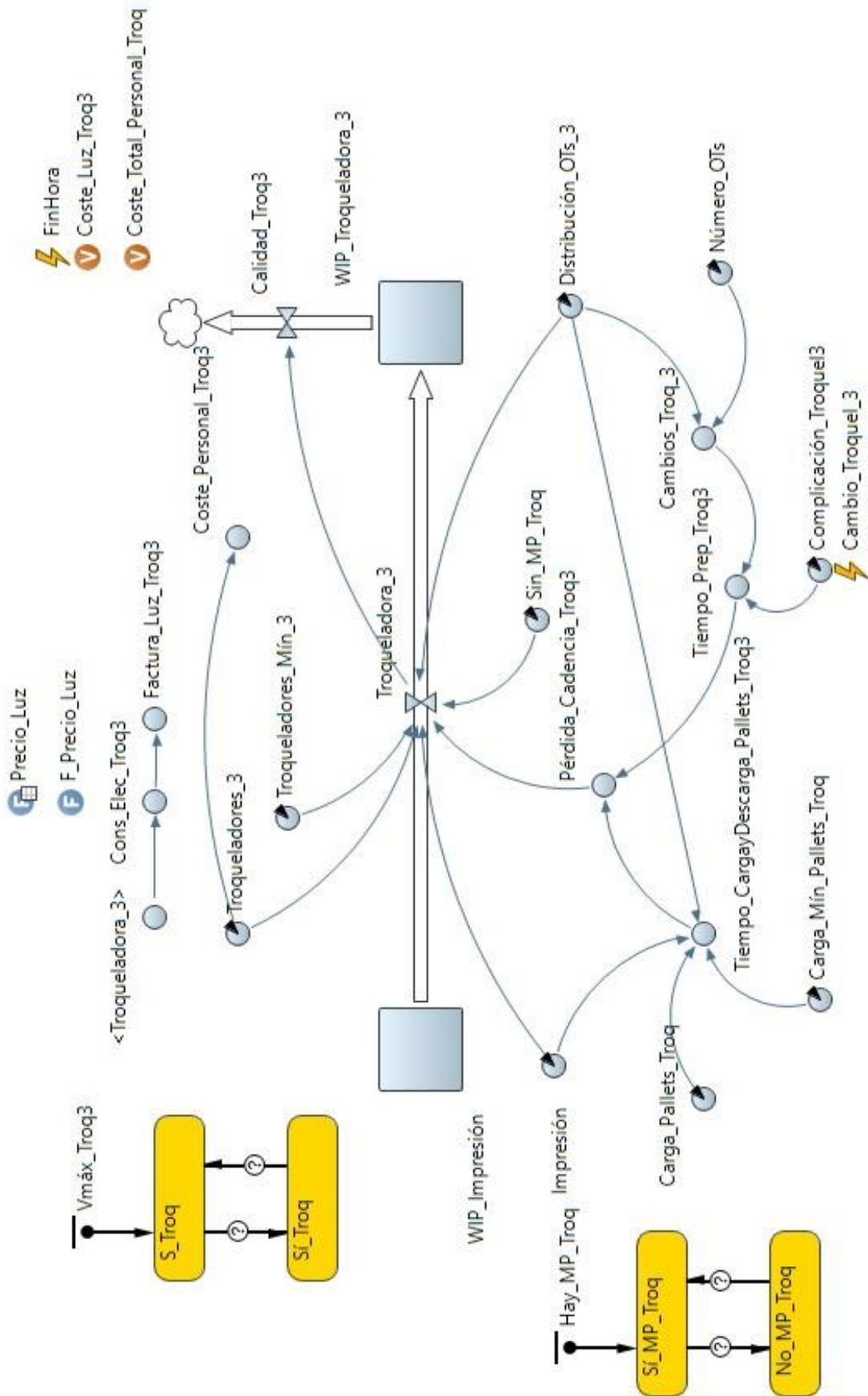


Figura 5.6. Subsistema de troquelado. Representado por la Troqueladora 3.

De nuevo, esta sección está caracterizada por la existencia de dos únicas variables de stock, *WIP_Impresión* y *WIP_Troqueladora_3*, los cuáles se comunican mediante el flujo de la troqueladora (en este caso *Troqueladora_3*).

Del mismo modo que *Impresión*, la velocidad de corte de *Troqueladora_3* será el resultado de la interacción de diversos factores. En primer lugar, y siguiendo el principio del nivelado de la producción, el ritmo base de la máquina será el mismo que el real de la impresora (*Impresión*) multiplicado por *Distribución_OTs_3*, es decir, el número de referencias asignadas a esta línea en concreto. Este parámetro es de nuevo un punto de entrada al sistema. Como en la sección anterior, la relación entre los trabajadores necesarios y los disponibles será un factor de gran importancia (*Troqueladores_3/Troqueladores_Mín_3*). La pérdida de cadencia está de nuevo presente en las máquinas de esta sección (*Pérdida_Cadencia_Troq3*). Y en último lugar, el parámetro *Sin_MP_Troq* liga el funcionamiento de la troqueladora a la existencia de reservas en *WIP_Impresión*, a través del mapa de estados *Hay_MP_Troq*. Hay que destacar que este estado, en el modelo de la planta completa, será empleado por todas las troqueladoras, excepto la 5.

La pérdida de cadencia de esta sección vendrá definida por dos elementos. El primero, *Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Troq3*, funciona del mismo modo que *Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Imp*. El segundo factor, *Tiempo_Prep_Troq3*, sigue un esquema parecido a su homólogo en la sección de impresión; sin embargo, su comportamiento es notablemente distinto.

En primer lugar, el número total de referencias que pasarán por esta máquina, y por tanto la cantidad de cambios a realizar, viene dado por el producto entre *Número_OTs* y *Distribución_OTs_3*.

En cada cambio, es necesario no solo introducir en la máquina el nuevo troquel, sino que también hay que introducir la pareja de separadores y expulsos complementarios. Estas operaciones, dependiendo del troquel y de la habilidad de los técnicos, pueden oscilar entre media hora y 8 horas. Por ello, se ha optado por representar los tiempos de preparación como el producto de un mínimo de 40 minutos, multiplicados por el parámetro

Complicación_Troquel_3. Este parámetro cambiará de valor según una distribución aleatoria uniforme, regida por el evento *Cambio_Troquel_3*, que cambiará de valor según la frecuencia de cambio de troquel de la máquina.

Por supuesto, al igual que la impresora, las troqueladoras tienen una velocidad máxima, en este caso, de 9.000 pliegos hora. Mediante los estados de velocidad máxima ($V_{m\acute{a}x_Troq3}$ en este caso), se asegura que ninguna máquina supere este último valor.

El pliego troquelado alimenta las existencias del stock *WIP_Troqueladora_3*. A diferencia de lo que se puede esperar naturalmente, una unidad de producto semiterminado de impresión no tiene por qué equivaler a una unidad de WIP de troquelado. Con el objetivo de maximizar el aprovechamiento del cartón, cada pliego puede incluir 1,2,4 o hasta 20 estuches, dependiendo del producto a fabricar. El número de estuches que se encuentra en un troquel se conoce como poses. En concreto, todas las referencias que pasen por la troqueladora 3 tendrán 4 poses.

Como en la sección anterior, todo el WIP de las troqueladoras debe pasar por el escrutinio del personal responsable de calidad, lo cual se traduce en un porcentaje de rechazo del 3%.

De nuevo, el funcionamiento de cualquier máquina eléctrica conlleva un gasto por consumo eléctrico. El producto de los valores de la función tabla *Precio_Luz* (ver tabla 5.3) por el consumo de la troqueladora durante cada hora, *Cons_Elec_Troq3* (1), compone el coste eléctrico total de la máquina.

Las variables agregadas empleadas en la monitorización de costes de este subsistema son las siguientes:

- *Coste_Personal_Troqueladora_3*. En esta variable se recoge el coste total por máquina de los operarios que en ella trabajan.
- *Coste_Luz_Troq3*. Para cada máquina, la factura de luz se guardará de forma separada.

Para acabar esta sección, en la tabla 5.5 se encuentra el resumen de las variables que modelan el funcionamiento de las cuatro primeras troqueladoras.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
--------	------	---------------	----------

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

WIP_Impresión	Stock	0	Impresión - Calidad_Imp - Troqueladora_1 - Troqueladora_2 - Troqueladora_3 - Troqueladora_4 - Estampadora
WIP_Troqueladora_3	Stock	0	4*Troqueladora_3 - Plegadora_4 - Calidad_Troq_3
Troqueladora_3	Flujo		Impresión*(Troqueladores_3/Troqueladores_Mín_3)*Distribución_OTs_3*Pérdida_Cadencia_Troq3*Sin_MP_Troq
Calidad_Troq3	Flujo		0.03*Troqueladora_3
Impresión	Flujo		Velocidad_Producción * Impresores/Impresores_Mínimo * Pérdida_de_Cadencia*Sin_MP_Imp
Pérdida_Cadencia_Troq3	Var. Dinám.		(24-Tiempo_Prep_Troq3-Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Troq3)/24
Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Troq3	Var. Dinám.		24*(2*(Troqueladora_3*Distribución_OTs_3)*5*(1+(Carga_Pallets_Troq-Carga_Mín_Pallets_Troq)/Carga_Mín_Pallets_Troq))/(60*Carga_Pallets_Troq)
Tiempo_Prep_Troq3	Var. Dinám.		24*(Cambios_Troq_3/(24*7))*(40*(1+Complicación_Troquel3))/60
Cambios_Troq_3	Var. Dinám.		round(Distribución_OTs_3 * Número_OTs)
Coste_Personal_Troq3	Var. Dinám.		8.01*Troqueladores_3
Cons_Elec_Troq3	Var. Dinám.		45*(0.3+Troqueladora_3/9000)
Factura_Luz_Troq3	Var. Dinám.		Cons_Elec_Troq3*F_Precio_Luz(time())
Carga_Pallets_Troq	Parám.	2000	
Carga_Mín_Pallets_Troq	Parám.	2000	
Complicación_Troquel3	Parám.		uniform(0,2)
Troqueladores_3	Parám.	1	
Troqueladores_Mín_3	Parám.	1	
Sin_MP_Troq	Parám.	1	*Cambia según el mapa de estados Hay_MP_Troq
Número_OTs	Parám.	150	
Distribución_OTs_3	Parám.	0,25	
Cambio_Troquel_3	Evento		Cíclico. Frecuencia=24*7/Cambios_Troq_3
Precio_Luz	Tabla		Valores Indicados en la tabla 5.3
F_Precio_Luz	Función		return Precio_Luz(time());

Coste_Luz_Troq3	Variable		+=Factura_Luz_Troq3
Coste_Personal_Troqueladora_3	Variable		+=Coste_Personal_Troq

Tabla 5.5. Resumen de variables y parámetros de Troquelado

5.3.4 Línea Premium (Estampadora y Troqueladora 5)

El funcionamiento de la troqueladora 5 sigue los mismos principios que las máquinas de la sección anterior. Su característica especial reside en que debe coordinarse con otro mecanismo, la estampadora. Esta máquina es el elemento diferenciador de la línea premium con el resto de las rutas de producción.

La operación que aquí se realiza es muy sencilla: se aplica un filme metálico, generalmente dorado o plateado, en distintas partes de los pliegos. Este proceso se lleva a cabo poniendo un molde caliente (llamado cliché), en contacto con el filme, y presionándolo contra el pliego.

El diseño de esta línea se presenta a continuación, en la figura 5.7.

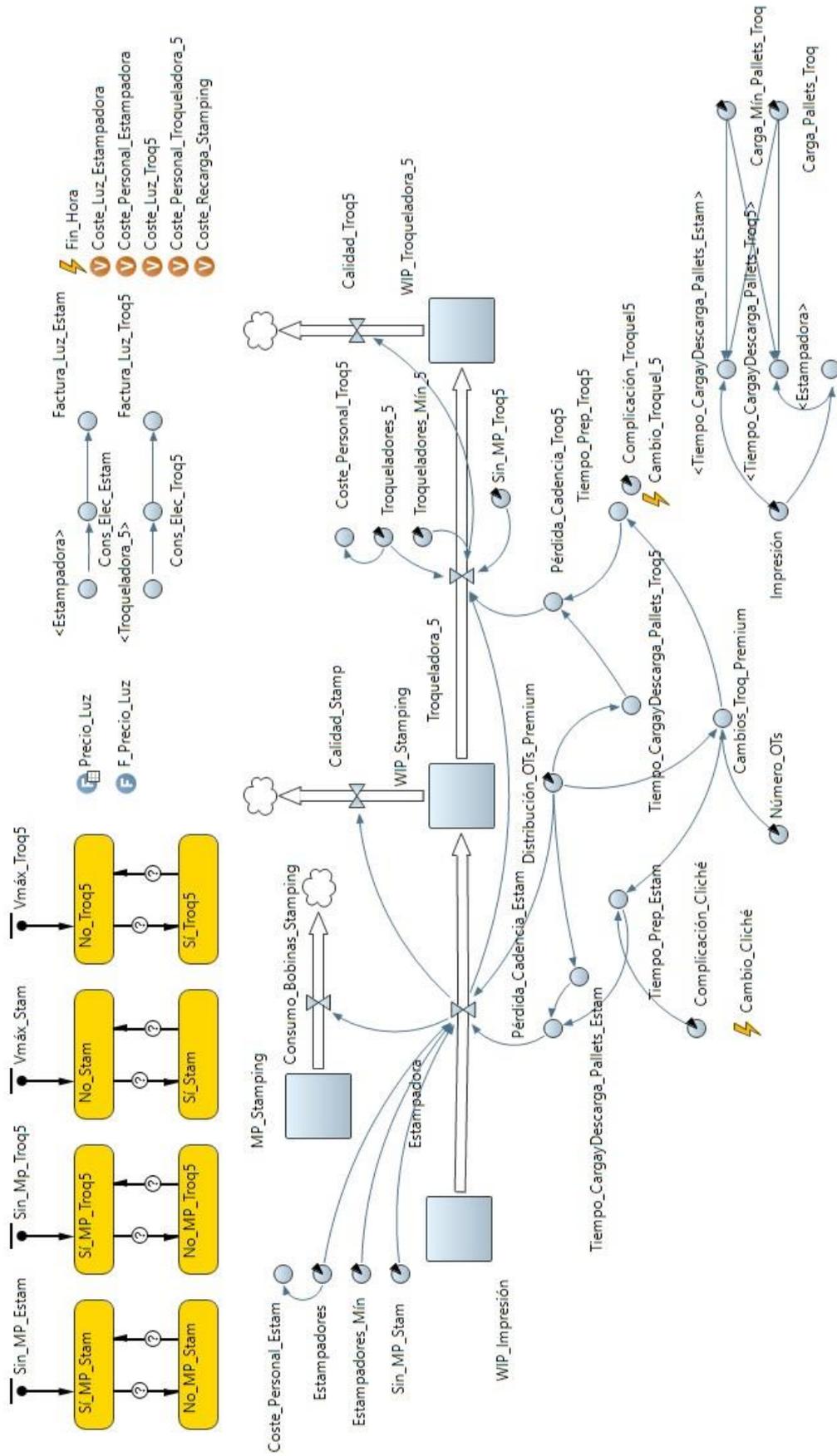


Figura 5.7. Esquema de la línea Premium.

Al igual que en el resto de las líneas de troquelado, el stock que alimenta el inicio de la línea premium será *WIP_Impresión*. Como se ha comentado en la introducción de esta sección, a través del flujo *Estampadora* se inserta la capa metalizada en los pliegos. Este proceso consume una nueva materia prima secundaria, *MP_Stamping*. El funcionamiento de este stock ha sido modelado del mismo modo que *Dispensing* (ver sección 5.3.1), de modo que la existencia de metal de stamping es necesaria para la producción de *Estampadora*, pero no incrementa el stock *WIP_Estampadora*.

El diseño del flujo *Estampadora* sigue los mismos principios que el resto de máquinas. La velocidad máxima a la que podrá trabajar vendrá dada por la velocidad de trabajo del mecanismo que la alimenta, *Impresión*, multiplicada por la carga de trabajo asignada a la línea premium, *Distribución_OTs_Premium*. De nuevo, el cociente *Estampadores/Estampadores_Mín*, aparece como un factor importante en el funcionamiento de este flujo. Es recurrente la presencia del parámetro *Sin_MP_Stam*, que habilita la estampadora para funcionar en función de la situación del mapa de estados *Sin_MP_Estam*. Es necesario apuntar que este último monitoriza las existencias tanto de *WIP_Impresión* como de *MP_Stamping*.

La pérdida de cadencia en la estampadora, *Pérdida_Cadencia_Estam*, depende de las variables dinámicas *Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Estam* y *Tiempo_Prep_Estam*.

Al igual que las troqueladoras 1 a 4, este tiempo se verá influenciado por la velocidad inicial de la máquina (producto de *Impresión* y *Distribución_OTs_Premium*), y la relación entre el tamaño de los pallets y el mínimo recomendado (*Carga_Pallets_Troq* y *Carga_Mín_Pallets_Troq*); los pallets que alimentan y salen de la estampadora tienen el mismo tamaño que los del resto de troqueladoras.

El tiempo de preparación de las referencias que entran a la estampadora, *Tiempo_Prep_Estam*, es representado de similar manera al resto de máquinas de la sección. Siguiendo una frecuencia marcada por la carga productiva de la línea, a cada preparación se le asigna una duración base de 40 minutos, influida por el modificador *Compliación_Cliché*, un parámetro que sigue una distribución aleatoria uniforme.

Los pliegos estampados pasarán a formar parte de *WIP_Stampinig*. Cada hora, parte de lo producido será retirado por calidad, en forma del flujo *Calidad_Stamp*.

Los pliegos ya estampados pasarán a través del flujo *Troqueladora_5* a ser producto semiterminado, agrupado en la variable de stock *WIP_Troqueladora_5*. El flujo mencionado sigue el mismo comportamiento que el resto de las troqueladoras de la sección, sin embargo, se deben apuntar dos particularidades:

- La velocidad base de esta troqueladora vendrá marcada por el flujo *Estampadora*, al ser la máquina anterior.
- Los cambios de referencia tanto de la estampadora como de la troqueladora 5 se producirán a la vez.

Por supuesto, ambas máquinas de la línea generan consumos eléctricos, y como se espera, sus costes se ven reflejados en las variables dinámicas *Factura_Luz_Estam* y *Factura_Luz_Troq5*. El cálculo de estas variables se ha explicado en más detalle en los apartados anteriores.

Ambas máquinas verán también sus velocidades limitadas a un valor máximo mediante sus respectivos mapas de estado: *Vmáx_Stam* y *Vmáx_Troq5*. Respectivamente, estas velocidades son 7.000 pliegos/hora y 9.000 pliegos/hora.

Finalmente, hay que mencionar las variables que, como en el resto de los subsistemas, monitorizan los costes totales del funcionamiento de las máquinas. Es este apartado se explicarán únicamente las vinculadas a la estampadora. Las asociadas a la troqueladora son iguales que las variables agregadas del apartado anterior.

- *Coste_Luz_Estampadora* recogerá el coste total para toda la semana de la energía eléctrica demandada.
- *Coste_Personal_Estampadora* monitoriza el salario semanal a pagar a la plantilla de la máquina de stamping.

Como resumen de esta línea, se presenta a continuación la tabla 5.6, que recoge las variables y parámetros presentes en la línea premium de la sección de troquelado.

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
WIP_Impresión	Stock	0	Impresión - Calidad_Imp - Troqueladora_1 - Troqueladora_2 - Troqueladora_3 - Troqueladora_4 - Estampadora
WIP_Stamping	Stock	0	Estampadora - Troqueladora_5 - Calidad_Stamp
WIP_Troqueladora_5	Stock	0	Troqueladora_5 - Plegadora_1 - Calidad_Troq5
MP_Stamping	Stock	2000	-Consumo_Bobinas_Stamping
Estampadora	Flujo		Impresión*Distribución_OTs_Premium*(Estampadores/Estampadores_Mín)*Pérdida_Cadencia_Estam*Sin_MP_Stam
Troqueladora_5	Flujo		Estampadora*(Troqueladores_5/Troqueladores_Mín_5)*Pérdida_Cadencia_Troq5*Sin_MP_Troq5
Consumo_Bobinas_Stamping	Flujo		0.015*Estampadora
Calidad_Stamp	Flujo		0.075*Estampadora
Calidad_Troq5	Flujo		0.05*Troqueladora_5
Coste_Personal_Estam	Var. Dinám.		8.01*Estampadores
Coste_Personal_Troq5	Var. Dinám.		8.01*Troqueladores_5
Pérdida_Cadencia_Estam	Var. Dinám.		(24-Tiempo_Prep_Estam-Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Estam)/24
Pérdida_Cadencia_Troq5	Var. Dinám.		(24-Tiempo_Prep_Troq5-Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Troq5)/24
Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Estam	Var. Dinám.		24*2*(Impresión*Distribución_OTs_Premium*5*(1+(Carga_Pallets_Troq-Carga_Mín_Pallets_Troq)/Carga_Mín_Pallets_Troq))/(60*Carga_Pallets_Troq)
Tiempo_CargayDescarga_Pallets_Troq5	Var. Dinám.		24*2*(Estampadora*Distribución_OTs_Premium*5*(1+(Carga_Pallets_Troq-Carga_Mín_Pallets_Troq)/Carga_Mín_Pallets_Troq))/(60*Carga_Pallets_Troq)
Cambios_Troq_Premium	Var. Dinám.		round(Distribución_OTs_Premium * Número_OTs)
Tiempo_Prep_Estam	Var. Dinám.		24*(Cambios_Troq_Premium/(24*7))*(40*(1+Complicación_Cliché))/60
Tiempo_Prep_Troq5	Var. Dinám.		24*(Cambios_Troq_Premium/(24*7))*(40*(1+Complicación_Troquel5))/60
Cons_Elec_Estam	Var. Dinám.		40*(0.3+Estampadora/7000)
Cons_Elec_Troq5	Var. Dinám.		45*(0.3+Troqueladora_5/9000)
Factura_Luz_Estam	Var. Dinám.		Cons_Elec_Estam*F_Precio_Luz(time())

Factura_Luz_Troq5	Var. Dinám.		Cons_Elec_Troq5*F_Precio_Luz(time())
Estampadores	Parám.	1	
Estampadores_Mín	Parám.	1	
Troqueladores_5	Parám.	1	
Troqueladores_Mín_5	Parám.	1	
Sin_MP_Stam	Parám.	1	*Cambia según el mapa de estados Sin_MP_Stam
Sin_MP_Troq5	Parám.	1	*Cambia según el mapa de estados Sin_MP_Troq5
Número_OTs	Parám.	150	
Distribución_OTs_Premium	Parám.	0,2	
Carga_Pallets_Troq	Parám.	2000	
Carga_Mín_Pallets_Troq	Parám.	2000	
Complicación_Cliché	Parám.		uniform(0,0.15)
Complicación_Troquel5	Parám.		uniform(0,2)
Cambio_Cliché	Evento		Cíclico. Frecuencia=24*7/Cambios_Troq_Premium
Cambio_Troquel_5	Evento		Cíclico. Frecuencia=24*7/Cambios_Troq_Premium
Precio_Luz	Tabla		Valores Indicados en la tabla 5.3
F_Precio_Luz	Función		return Precio_Luz(time());
Coste_Luz_Estampadora	Variable		+Factura_Luz_Estam
Coste_Luz_Troq5	Variable		+Factura_Luz_Troq5
Coste_Personal_Estampadora	Variable		+Coste_Personal_Estam
Coste_Personal_Troqueladora_5	Variable		+Coste_Personal_Troq5
Coste_Recarga_Stamping	Variable		+2000

Tabla 5.6. Resumen de variables y parámetros de la línea premium en la sección de troquelado.

5.3.5 Finishing: Plegado, conformado y manipulado

La última transformación de los productos semiterminados tiene lugar en el área de finishing.

En las cuatro líneas que componen esta área se obtienen los tres tipos de productos finales:

cajas, bandejas y paquetes. Para lograr este abanico de productos, se dispondrá de tres tipos de máquinas: tres plegadoras, una conformadora y una yogurtera.

A la entrada de esta zona de la planta, se tienen como unidades los estuches; por el contrario, a la salida de este bloque habrá únicamente pallets de los distintos productos terminados.

A continuación, se procederá a describir el funcionamiento de cada tipo de máquina que hay en el área de finishing.

5.3.5.1 Plegado

En las máquinas plegadoras los distintos estuches son transformados en cajas. En la figura 5.8 se puede apreciar el esquema de funcionamiento de la plegadora 4, que en el sistema se encargará de producir cajas de la línea de calidad no premium. En la línea premium se ubica la plegadora 1.

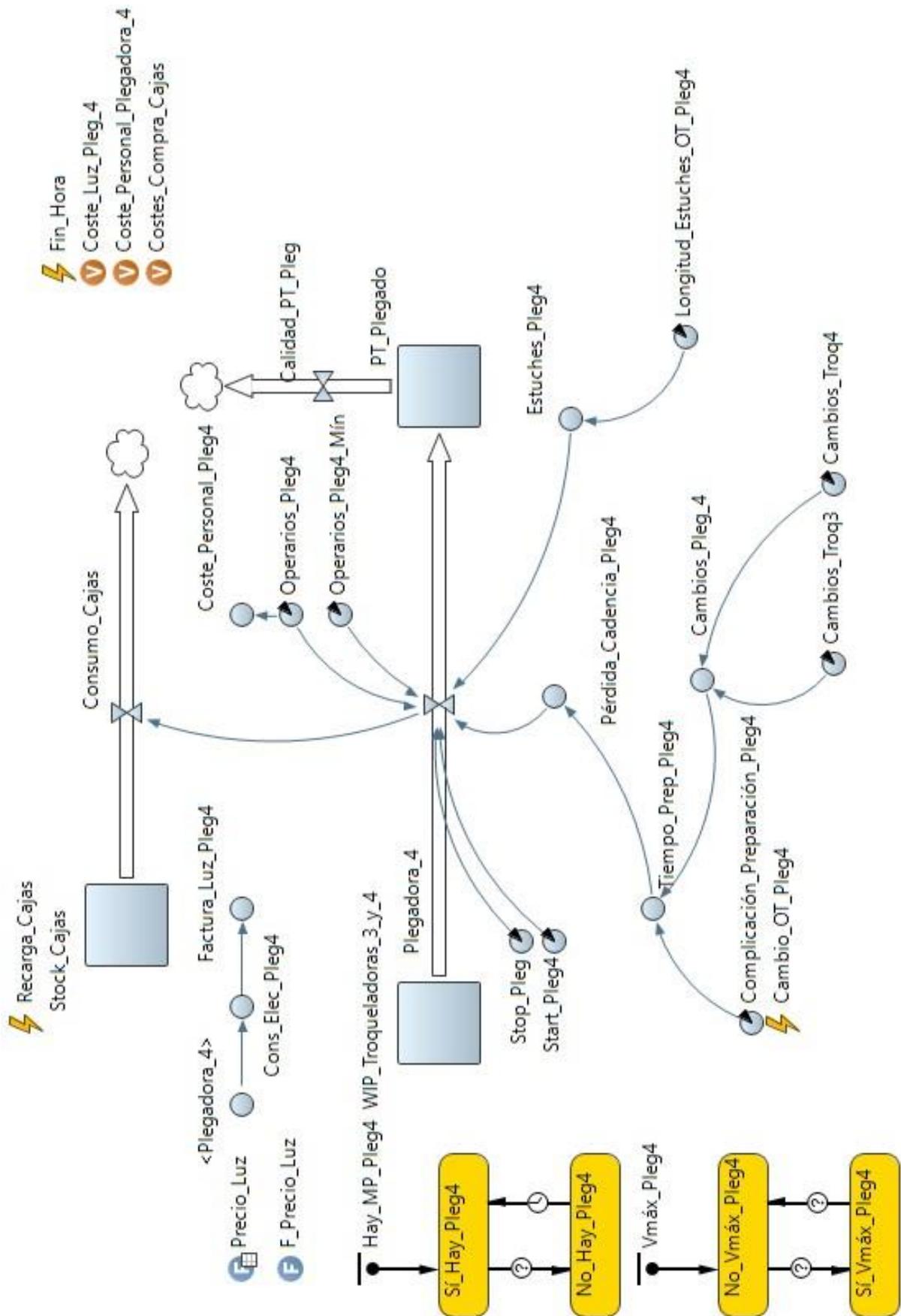


Figura 5.8. Esquema de funcionamiento de la Plegadora 4. Línea de plegado, sección de finishing.

De nuevo, en esta línea en particular, se extraen los estuches ya troquelados de las troqueladoras 3 y 4, *WIP_Troqueladoras_3_y_4*, se pliegan y se sitúan en pallets de producto terminado: *PT_Plegado*. La rapidez de este proceso es representada por el flujo *Plegadora_4*. La velocidad base de la plegadora será de 150 m/min, lo cual se traduce en 9.000 m/h. La cantidad de cajas fabricadas en una hora se obtiene añadiendo al flujo la variable *Estuches_Pleg4*. Esta variable, junto con el parámetro *Longitud_Estuches_OT_Pleg4*, aporta la cifra buscada.

El siguiente término necesario para el cálculo de la velocidad de plegado es, de nuevo, el cociente entre el personal necesario y el existente (*Operarios_Pleg4/Operarios_Pleg4_Mín*).

La pérdida de cadencia (*Pérdida_Cadencia_Pleg4*) vuelve a aparecer. Sin embargo, el ritmo más regular de este tipo de máquinas hace que tenga menos influencia. Además, solo se factoriza en ella los tiempos de preparación de las distintas referencias, representados por la variable dinámica *Tiempo_Prep_Pleg4*.

El número de cambios de referencia a realizar en cada plegadora dependerá de la cantidad de órdenes asignada a cada línea de fabricación de la planta. En el caso del esquema presentado, *Cambios_Pleg_4* equivaldrá a la suma de los cambios en las líneas de las troqueladoras 3 y 4 (*Cambios_Troq3* y *Cambios_Troq4*).

En las plegadoras de la planta de GPI se preparan principalmente tres tipos de cajas: 4 puntos, 6 puntos y fondo automático. Las preparaciones de 4 puntos son las más sencillas, y las de 6 puntos las más complicadas. De forma similar a como se ha modelado en las troqueladoras, el tiempo de preparación de cada referencia será el producto de un valor base de 35 minutos y un factor aleatorio uniforme, llamado *Complicación_Preparación_Pleg4*. En este caso, este valor puede tener valores negativos, debido a que las preparaciones entre el mismo tipo de cajas se acortan en gran medida.

Finalmente hay que mencionar los parámetros *Start_Pleg4* y *Stop_Pleg*. El primer término se emplea para arrancar toda la sección de finishing en el segundo día de funcionamiento de la fábrica. El segundo parámetro rige la operatividad de las máquinas, en función de la existencia de los materiales necesarios. La activación del último parámetro se rige según el mapa de estados *Hay_MP_Pleg*.

En último lugar con respecto al proceso de plegado, es importante explicar el funcionamiento de la tercera y última materia prima secundaria empleada en planta: las cajas de producto terminado. En estos elementos se almacenan los productos. Las unidades de producto terminado por caja dependerán del tipo de producto. Cada vez que *Stock_Cajas* se agote, se comprarán más cajas, suponiendo esto un cargo de logística.

El consumo eléctrico de la plegadora 4 vendrá dado por la variable dinámica *Cons_Elec_Pleg4* y el coste de esta demanda, por *Factura_Luz_Pleg4*.

La velocidad de cada máquina es monitorizada mediante un mapa de estados. En el caso particular de la plegadora 4: *Vmáx_Pleg4*. La velocidad máxima en este caso en concreto es de 95.000 pliegos/hora.

En último lugar, se presentan las variables de control de gastos de esta línea:

- *Coste_Luz_Pleg4*. Recoge el gasto energético total de la máquina
- *Coste_Personal_Plegadora_4*. Control de la manutención del personal de la plegadora.
- *Costes_Compra_Cajas*. Registro de los gastos totales por reabastecimiento del stock de cajas para producto terminado.

En la tabla 5.7 puede encontrarse el resumen de las variables y parámetros que componen la línea de plegado.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
WIP_Troqueladoras_3_y_4	Stock	0	$4 * \text{Troqueladora}_3 + 8 * \text{Troqueladora}_4 - \text{Calidad_Troq3y4} - \text{Plegadora}_4$
PT_Plegado	Stock	0	$\text{Plegadora}_4 / 4000 - \text{Salida_PT_Plegado} - \text{Calidad_PT_Pleg}$
Stock_Cajas	Stock	8000	$-\text{Consumo_Cajas}$
Plegadora_4	Flujo		$9000 * \text{Pérdida_Cadencia_Pleg4} * (\text{Operarios_Pleg4} / \text{Operarios_Pleg4_Mín}) * \text{Estuches_Pleg4} * \text{Stop_Pleg4} * \text{Start_Pleg4}$
Calidad_PT_Pleg	Flujo		$0.025 * \text{Plegadora}_4 / 4000$
Consumo_Cajas	Flujo		$\text{round}(\text{Plegadora}_4 / 250) + \text{round}(\text{Plegadora}_1 / 200) + \text{round}(\text{Conformadora} / 175)$
Pérdida_Cadencia_Pleg4	Var. Dinám.		$(24 - \text{Tiempo_Prep_Pleg4}) / 24$

Tiempo_Prep_Pleg4	Var. Dinám.		$24 * (\text{Cambios_Pleg_4} / (24 * 7)) * (35 * (1 + \text{Complicación_Preparación_Pleg4}) / 60)$
Cambios_Pleg_4	Var. Dinám.		$\text{Cambios_Troq_3} + \text{Cambios_Troq_4}$
Estuches_Pleg4	Var. Dinám.		$1 / \text{Longitud_Estuches_OT_Pleg4}$
Coste_Personal_Pleg4	Var. Dinám.		$8.01 * \text{Operarios_Pleg4}$
Cons_Elec_Pleg4	Var. Dinám.		$30 * (0.3 + \text{Plegadora_4} / 95000)$
Factura_Luz_Pleg4	Var. Dinám.		$\text{Cons_Elec_Pleg4} * \text{F_Precio_Luz}(\text{time}())$
Cambios_Troq3	Var. Dinám.		$\text{round}(\text{Distribución_OTs_3} * \text{Número_OTs})$
Cambios_Troq4	Var. Dinám.		$\text{round}(\text{Distribución_OTs_4} * \text{Número_OTs})$
Operarios_Pleg4	Parám.	2	
Operarios_Pleg4_Mín	Parám.	2	
Complicación_Preparación_Pleg4	Parám.		$\text{uniform}(-0.25, 1)$
Longitud_Estuches_OT_Pleg4	Parám.		$\text{uniform}(0.2, 0.8)$
Stop_Pleg	Parám.	0	Valores Indicados en la tabla 5.3
Start_Pleg4	Parám.	0	$\text{return Precio_Luz}(\text{time}());$
Recarga_Cajas	Evento		Condición: $\text{Stock_Cajas} \leq 0$
Cambio_OT_Pleg4	Evento		Cíclico. Frecuencia = $24 * 7 / \text{Cambios_Pleg_4}$
Precio_Luz	Tabla		Valores Indicados en la tabla 5.3
F_Precio_Luz	Función		$\text{return Precio_Luz}(\text{time}());$
Coste_Luz_Pleg_4	Variable		$+= \text{Factura_Luz_Pleg4}$
Coste_Personal_Plegadora_4	Variable		$+= \text{Coste_Personal_Pleg4}$
Costes_Compra_Cajas	Variable		$+= 4000$

Tabla 5.7. Resumen de variables y parámetros de la línea de plegado en el área de finishing.

5.3.5.2 Conformado

En esta operación se transforma los estuches, previamente plegados en la plegadora 2, en bandejas desechables de comida. Las conformadoras son máquinas muy regulares en su ritmo de trabajo, y se han modelado como se muestra en la figura 5.9.

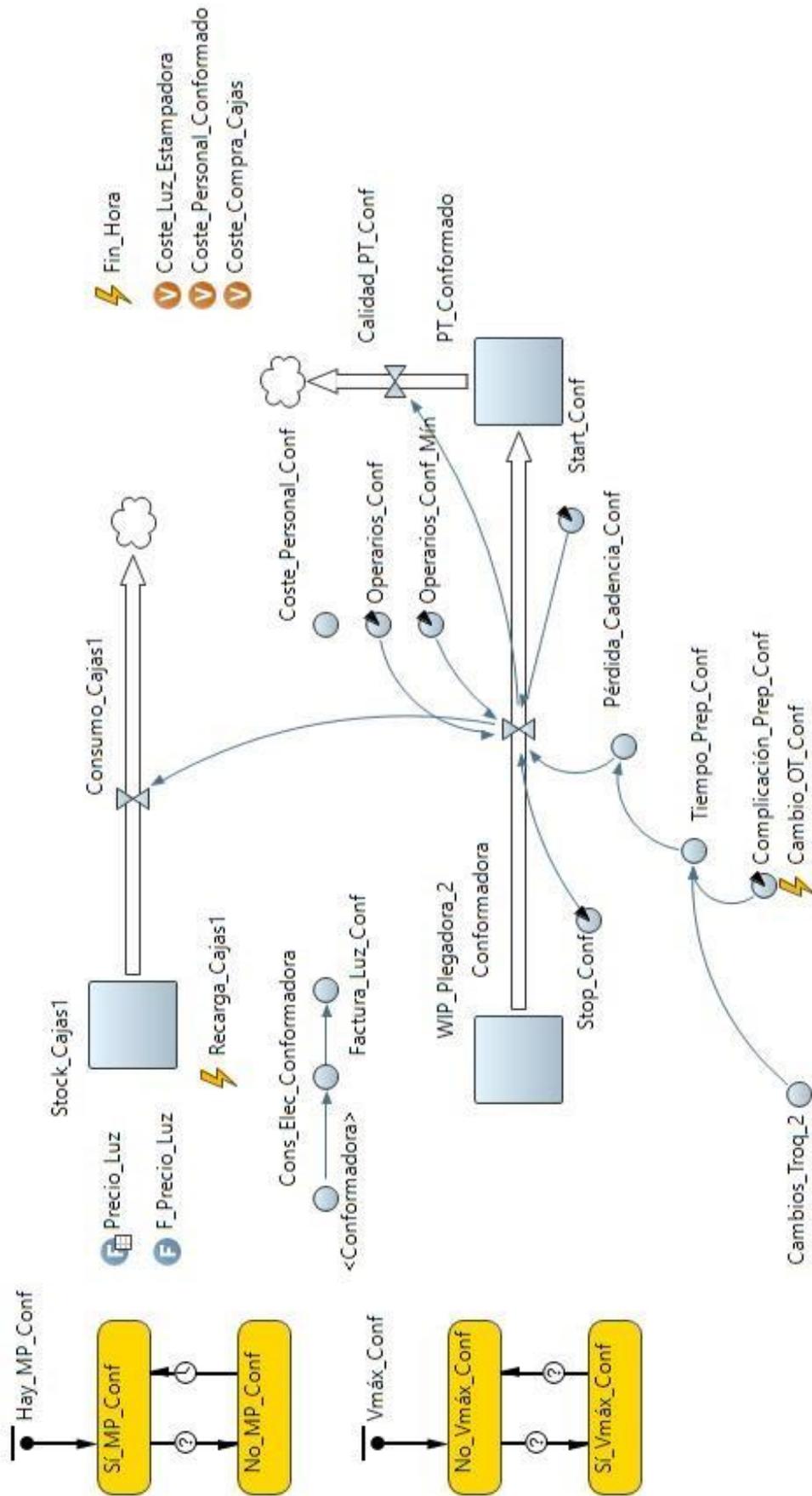


Figura 5.9. Línea de conformado del subsistema de finishing.

Es apreciable la presencia, una vez más, de tres stocks en este subsistema. Como ya se ha explicado el funcionamiento de la variable *Stock_Cajas* en el apartado anterior, aquí, las explicaciones se centrarán en el flujo principal de la línea. Los estuches pegados pasan a la conformadora desde *WIP_Plegadora_2*. Una vez han llegado a la máquina, son transformados en producto terminado (bandejas) a una velocidad marcada por la variable de flujo *Conformadora*. Las bandejas son apiladas en cajas y almacenadas en pallets de producto terminado, en *Stock_PT_Conformado*. De la cantidad de producto que llega cada hora, se retira parte por inconformidades respecto a calidad, a través del flujo *Calidad_PT_Conf*.

La conformadora tiene una velocidad base de 5000 bandejas/hora. Esta velocidad se ve influenciada ligeramente por el cociente entre *Operarios_Conf* y *Operarios_Conf_Mín* y por *Pérdida_Cadencia_Conf*.

Al igual que en las plegadoras, esta variable dinámica sólo se ve afectada por los tiempos de preparación de la máquina, *Tiempo_Prep_Conf*, lo cuales no son muy dilatados. El valor base de este factor temporal será de 20 minutos, dilatado por el parámetro aleatorio uniforme *Complicación_Prep_Conf*.

El mapa de estados *Hay_MP_Conf* habilita el funcionamiento de la conformadora, a través del parámetro *Stop_Conf*, dependiendo de la existencia de reservas en *Stock_Cajas* y en *WIP_Plegadora2*.

El parámetro *Start_Conf* se ha empleado, al igual que su homólogo *Start_Pleg*, para iniciar la actividad en la conformadora el segundo día de la simulación.

El consumo eléctrico de la máquina, así como su correspondiente factura para cada hora, se controla mediante las variables dinámicas *Cons_Elec_Conf* y *Factura_Luz_Conf*.

Finalmente, a través del mapa de estados *Vmáx_Conf*, se limita la velocidad máxima de la máquina a 7.000 bandejas por hora.

Las variables que aparecen en esta sección para recoger los costes de operación totales son las siguientes:

- *Coste_Luz_Estampadora*. Control del coste total de la factura eléctrica.

- *Coste_Personal_Conformado*. Esta variable agregada recoge los gastos por los pagos a realizar al personal de la conformadora.

Como resumen, se presenta la tabla 5.8, que contiene las variables y parámetros que definen el funcionamiento de la conformadora.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
WIP_Plegadora_2	Stock	0	Plegadora_2 - Conformadora - Calidad_Pleg_2
PT_Conformado	Stock	0	Conformadora/3500 - Calidad_PT_Conf - Salida_PT_Conformado
Stock_Cajas	Stock	8000	-Consumo_Cajas
Conformadora	Flujo		$5000 * \text{Pérdida_Cadencia_Conf} * (0.75 + (\text{Operarios_Conf}) / (2 * \text{Operarios_Conf_Mín})) * \text{Stop_Conf} * \text{Start_Conf}$
Consumo_Cajas	Flujo		$\text{round}(\text{Plegadora_4}/250) + \text{round}(\text{Plegadora_1}/200) + \text{round}(\text{Conformadora}/175)$
Calidad_PT_Conformado	Flujo		$0.03 * \text{Conformadora}/3500$
Pérdida_Cadencia_Conf	Var. Dinám.		$(24 - \text{Tiempo_Prep_Conf})/24$
Tiempo_Prep_Conf	Var. Dinám.		$24 * (\text{Cambios_Troq_2}/(24 * 7)) * (20 * (1 + \text{Complicación_Prep_Conf})/60)$
Cambios_Troq2	Var. Dinám.		$\text{round}(\text{Distribución_OTs_2} * \text{Número_OTs})$
Coste_Personal_Conf	Var. Dinám.		$8.01 * \text{Operarios_Conf}$
Cons_Elec_Conformadora	Var. Dinám.		$25 * (0.3 + \text{Conformadora}/9000)$
Factura_Luz_Conf	Var. Dinám.		$\text{Cons_Elec_Conformadora} * \text{F_Precio_Luz}(\text{time}())$
Operarios_Conf	Parám.	2	
Operarios_Conf_mín	Parám.	1	
Complicación_Prep_Conf	Parám.		$\text{uniform}(0.6, 0.8)$
Start_Conf	Parám.	0	
Stop_Conf	Parám.	0	
Cambio_OT_Conf	Evento		Cíclico. Frecuencia = $(24 * 7 - 24) / \text{Cambios_Pleg_2}$
Recarga_Cajas	Evento		Condición: $\text{Stock_Cajas} \leq 0$

Precio_Luz	Tabla		Valores Indicados en la tabla 5.3
F_Precio_Luz	Función		return Precio_Luz(time());
Coste_Luz_Estampadora	Variable		+=Factura_Luz_Conf
Coste_Personal_Conformado	Variable		+=Coste_Personal_Conf

Tabla 5.8. Resumen de variables y parámetros de la línea de conformado en el área de finishing.

5.3.5.3 Manipulado

Esta última línea de producción se dedica al empaquetado y disposición en pallets de “yogures”. Este nombre se la a los estuches de cartón que sirven para estos y otros productos lácteos. Los estuches serán preparados en una máquina conocida como “yogurtera”.

Los estuches troquelados se introducen en pilas de alrededor de 200 unidades en la máquina. Esta los rodea con un filme de plástico y aplica calor para sellar los paquetes. Estos paquetes se apilan para conseguir el pallet completo de producto terminado.

En la figura 5.10 se observa el diseño del funcionamiento de la yogurtera.

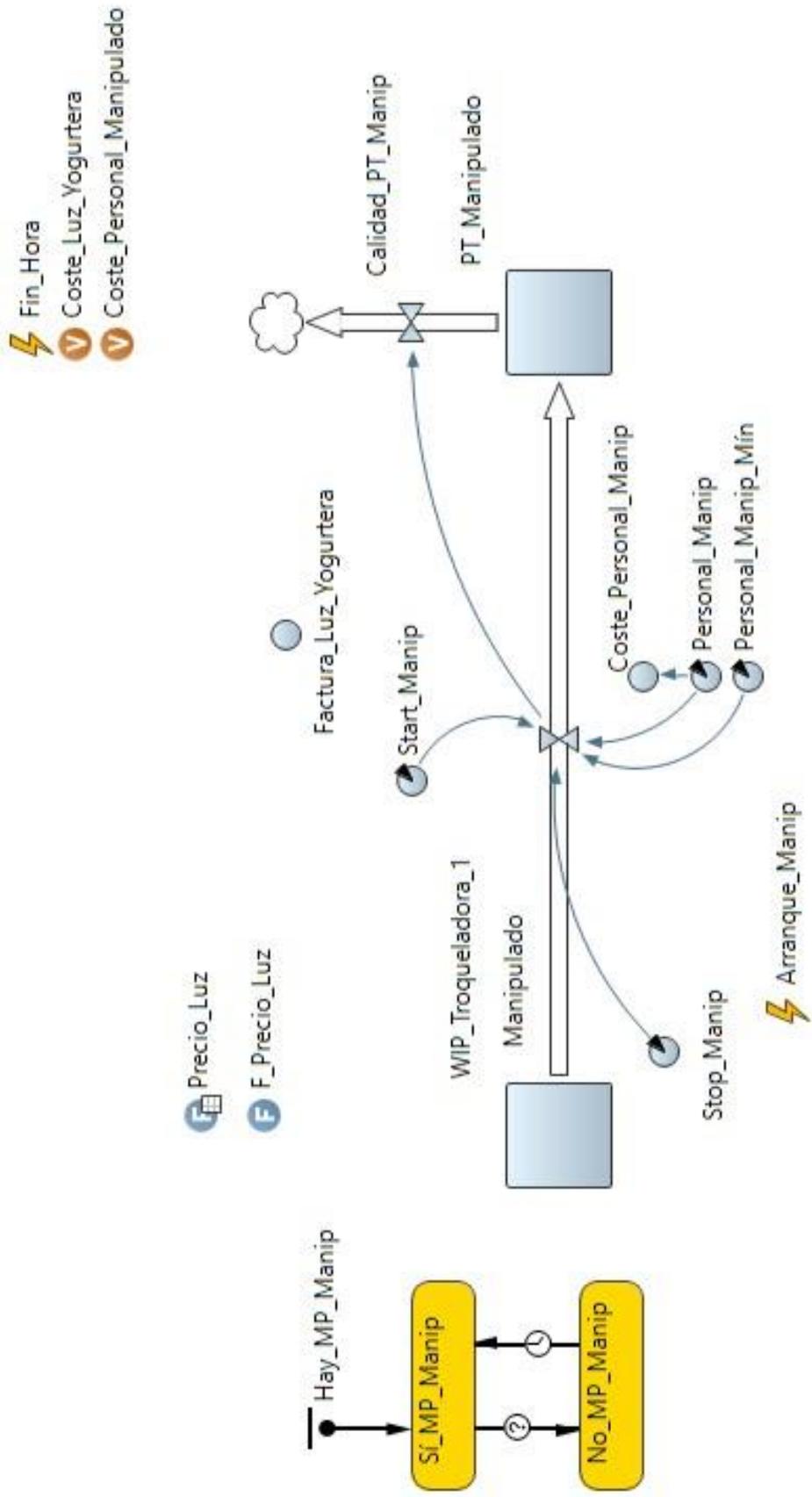


Figura 5.10. Esquema del modelado del funcionamiento de la yogurtera. Sección de finishing.

Esta máquina consume las reservas del stock *WIP_Troqueladora_1* y mediante el flujo *Manipulado* alimenta la variable stock final de la línea: *PT_Manipulado*. Parte de las existencias de este producto terminado serán retiradas por calidad, al no cumplir con los estándares, a través del flujo *Calidad_PT_Manip*.

La velocidad *Manipulado* únicamente depende del número de operarios trabajando en la yogurtera con respecto del mínimo necesario (*Personal_Manip* y *Personal_Manip_Mín*). Esto se debe a la sencillez de su mecanismo: se trata de una cinta sobre la que se apoyan estuches apilados.

Al igual que en otras máquinas, si el mapa de estados *Hay_MP_Manip* detecta que no existe material en *WIP_Troqueladora_1*, se disparará el parámetro *Stop_Manip*, bloqueando el funcionamiento de la yogurtera.

La factura de la luz para esta máquina se calculará como el producto de una potencia consumida estimada y los valores del precio de la luz para cada hora.

Los costes para esta máquina se recogerán de forma idéntica que en el resto de las líneas:

- *Coste_Luz_Yogurtera* acumula el total de la factura por la energía consumida en la yogurtera.
- *Coste_Personal_Manipulado*. Al igual que sus homólogas para otras líneas y secciones, esta variable monitoriza el coste de mantener el personal empleado en la yogurtera.

Como resumen de esta sección, la tabla 5.9 recoge todas las variables y parámetros incluidos en la línea de manipulado.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
WIP_Troqueladora_1	Stock	0	$20 * \text{Troqueladora_1} - \text{Calidad_Troq1} - \text{Manipulado}$
PT_Manipulado	Stock	0	$\text{Manipulado} / 30000 - \text{Calidad_PT_Manip} - \text{Salida_PT_Manipulado}$
Manipulado	Flujo		$40000 * (1 + (\text{Personal_Manip} - \text{Personal_Manip_Mín}) / \text{Personal_Manip_Mín}) * \text{Stop_Manip} * \text{Start_Manip}$
Calidad_PT_Manip	Flujo		$\text{Manipulado} * 0.03 / 30000$

Coste_Personal_Manip	Var. Dinám.		7.74*Personal_Manip
Factura_Luz_Yogurtera	Var. Dinám.		10*F_Precio_Luz(time())
Personal_Manip	Parám.	1	
Personal_Manip_Mín	Parám.	1	
Start_Manip	Parám.	0	
Stop_Manip	Parám.	0	
Arranque_Manip	Evento		Ocurre una vez. Activado a las 24 h
Precio_Luz	Tabla		Valores Indicados en la tabla 5.3
F_Precio_Luz	Función		return Precio_Luz(time());
Coste_Luz_Yogurtera	Variable		+=Factura_Luz_Yogurtera
Coste_Personal_Manipulado	Variable		+=Coste_Personal_Manip

Tabla 5.9. Resumen de variables y parámetros de la línea de manipulado en el área de finishing.

5.3.6 Salida de Fábrica

Una vez todos los productos terminados se han dispuesto en pallets y se almacenan, es necesario diseñar un programa de extracción de estos productos para su venta. Este programa constará de dos elementos que lo definirán: el número de camiones disponibles, y la prioridad asignada a la salida de cada tipo de producto terminado.

Para facilitar la comprensión de las explicaciones a continuación, se presenta en la figura 5.12 el subsistema de salida de producto.

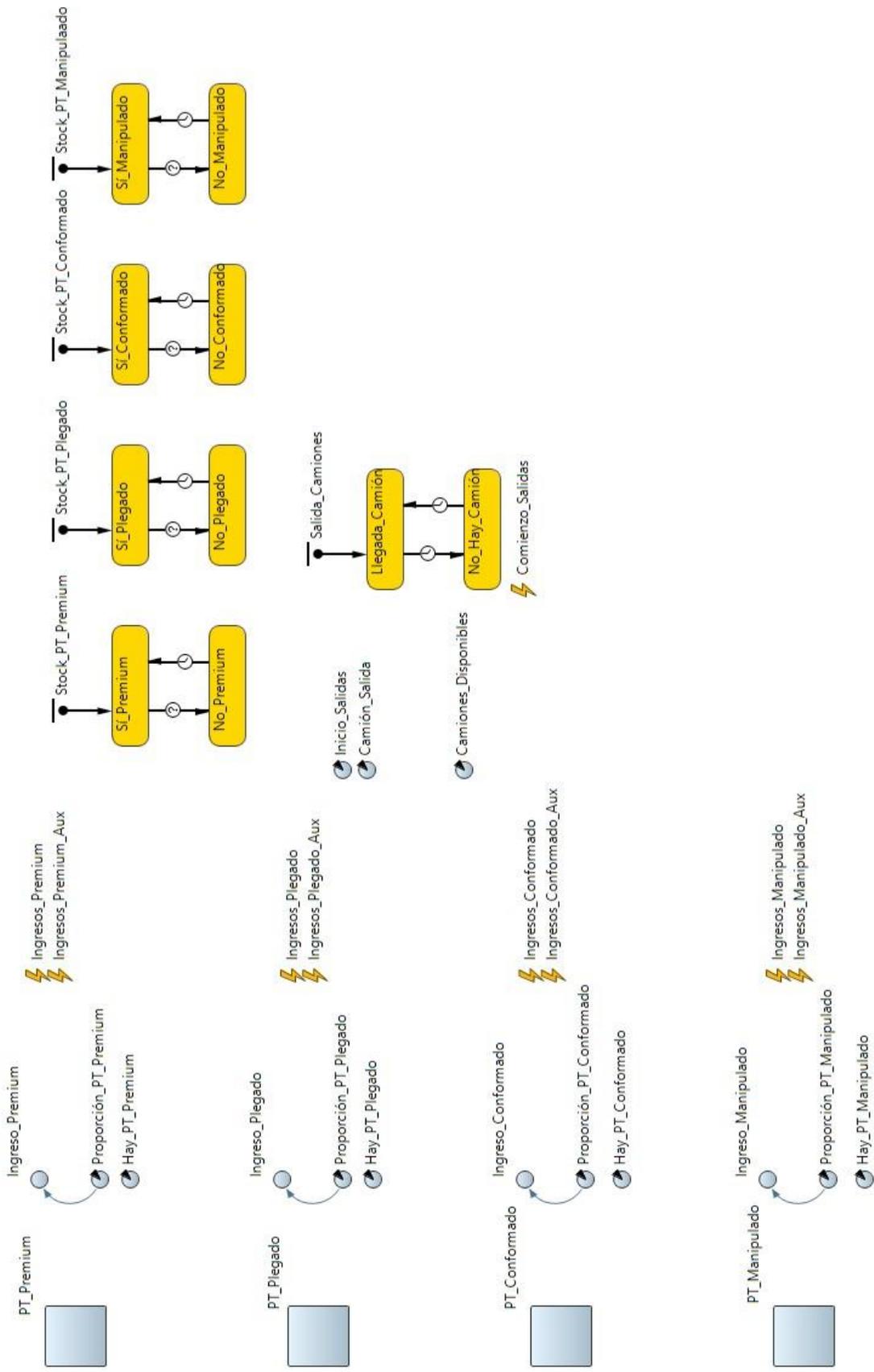


Figura 5.12. Esquema del subsistema de extracción de producto terminado.

Para dar tiempo a la planta a producir un número suficiente de pallets, los camiones empezarán a llegar a partir del tercer día de la simulación. En cada camión, con capacidad para 40 pallets, se cargarán los productos según los valores de los parámetros *Proporción_PT(...)*.

Los ingresos generados por cada tipo de producto en cada salida se calculan mediante las variables dinámicas de ingresos (*Ingreso_premium*, *Ingreso_Plegado*, etc.) y se añaden a las variables agregadas de ingresos por ventas.

Mediante el mapa de estados *Salida_Camiones* se regula el tráfico de los vehículos de transporte, una vez el evento *Comienzo_Salidas* habilita estos movimientos. Los camiones llegarán a una frecuencia marcada por el cociente entre las horas restantes y el número de camiones disponibles.

Una vez el camión está disponible para carga, los mapas de estados *Hay_PT(...)* servirán, junto con los eventos *Ingresos(...)* para comprobar en cada momento la disponibilidad de producto terminado para cargar. Siempre que, cuando llegue un camión, el estado correspondiente indique que hay producto disponible, los eventos *Ingresos(...)* sustraerán a sus correspondientes stocks las cantidades de pallets indicadas mediante el producto $40 * \text{Proporción_PT}(\dots)$. Una vez el camión abandone la fábrica, los eventos auxiliares *Ingresos(...)_Aux* rehabilitan la operación.

Finalmente, en la siguiente tabla se recogen las variables y parámetros que intervienen en el modelado de las salidas de producto.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
PT_Premium	Stock	0	Plegadora_1/2000 - Calidad_PT_Prem
PT_Plegado	Stock	0	Plegadora_4/4000 - Calidad_PT_Pleg
PT_Conformado	Stock	0	Conformadora/3500 - Calidad_PT_Conf
PT_Manipulado	Stock	0	Manipulado/30000 - Calidad_PT_Manip
Ingreso_Premium	Var. Dinám.		$350 * 40 * \text{Proporción_PT_Premium}$
Ingreso_Plegado	Var. Dinám.		$180 * 40 * \text{Proporción_PT_Plegado}$
Ingreso_Conformado	Var. Dinám.		$200 * 40 * \text{Proporción_PT_Conformado}$

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

Ingreso_Manipulado	Var. Dinám.		120*40*Proporción_PT_Manipulado
Proporción_PT_Premium	Parám.	0,3	
Proporción_PT_Plegado	Parám.	0,2	
Proporción_PT_Conformado	Parám.	0,1	
Proporción_PT_Manipulado	Parám.	0,4	
Camiones_Disponibles	Parám.	20	
Camión_Salida	Parám.	0	Valor regido por el mapa Salida_Camiones
Inicio_Salidas	Parám.	0	Valor regido por el evento Comienzo_Salidas
Hay_PT_Premium	Parám.	0	Valor regido por el mapa Stock_PT_Premium
Hay_PT_Plegado	Parám.	0	Valor regido por el mapa Stock_PT_Plegado
Hay_PT_Conformado	Parám.	0	Valor regido por el mapa Stock_PT_Conformado
Hay_PT_Manipulado	Parám.	0	Valor regido por el mapa Stock_PT_Manipulado
Comienzo_Salidas	Evento		Ocurre una vez. Activado a las 48 h
Ingresos_Premium	Evento		Condición.PT_Premium>=40*Proporción_PT_Premium && Hay_PT_Premium>=1 && Inicio_Salidas>=1 && Camión_Salida>=1
Ingresos_Premium_Aux	Evento		Condición.Camión_Salida<=0;
Ingresos_Plegado	Evento		Condición.PT_Plegado>=40*Proporción_PT_Plegado && Hay_PT_Plegado>=1 && Inicio_Salidas>=1 && Camión_Salida>=1
Ingresos_Plegado_Aux	Evento		Condición.Camión_Salida<=0;
Ingresos_Conformado	Evento		Condición.PT_Conformado>=40*Proporción_PT_Plegado && Hay_PT_Plegado>=1 && Inicio_Salidas>=1 && Camión_Salida>=1
Ingresos_Conformado_Aux	Evento		Condición.Camión_Salida<=0;
Ingresos_Manipulado	Evento		Condición.PT_Manipulado>=40*Proporción_PT_Plegado && Hay_PT_Plegado>=1 && Inicio_Salidas>=1 && Camión_Salida>=1
Ingresos_Manipulado_Aux	Evento		Condición.Camión_Salida<=0;
Ingreso_Ventas_Premium	Variable		+Ingreso_Premium
Ingreso_Ventas_Plegado	Variable		+Ingreso_Plegado
Ingreso_Ventas_Conformado	Variable		+Ingreso_Conformado
Ingreso_Ventas_Manipulado	Variable		+Ingreso_Manipulado

Coste_Camiones_Salida	Variable		$+1500 * \text{Inicio_Salidas}$
-----------------------	----------	--	----------------------------------

Tabla 5.10. Resumen de variables y parámetro del subsistema de salida de producto.

5.3.7 Gestión de Residuos

Como en todo proceso de fabricación, en la planta se generan residuos. En la fábrica de GPI se generan dos tipos principalmente: máculas y restos. Las máculas son el resultado de la impresión de los primeros pliegos después de un cambio de referencia, al llenarse el contenedor de este tipo de residuos una vez al mes, se ha decidido no incluir en el modelo. El segundo tipo de desperdicios, los restos, son el resultado de la expulsión a través del sistema de extracción de las partes del pliego que no conforman ningún estuche. Además, el material desechado por no conformidad en finishing se retira por este sistema de extracción.

Todos estos residuos de cartón llegan al contenedor de la compactadora, donde son almacenados hasta su retirada.

En la figura 5.13 se aprecia el esquema de funcionamiento del subsistema de residuos.

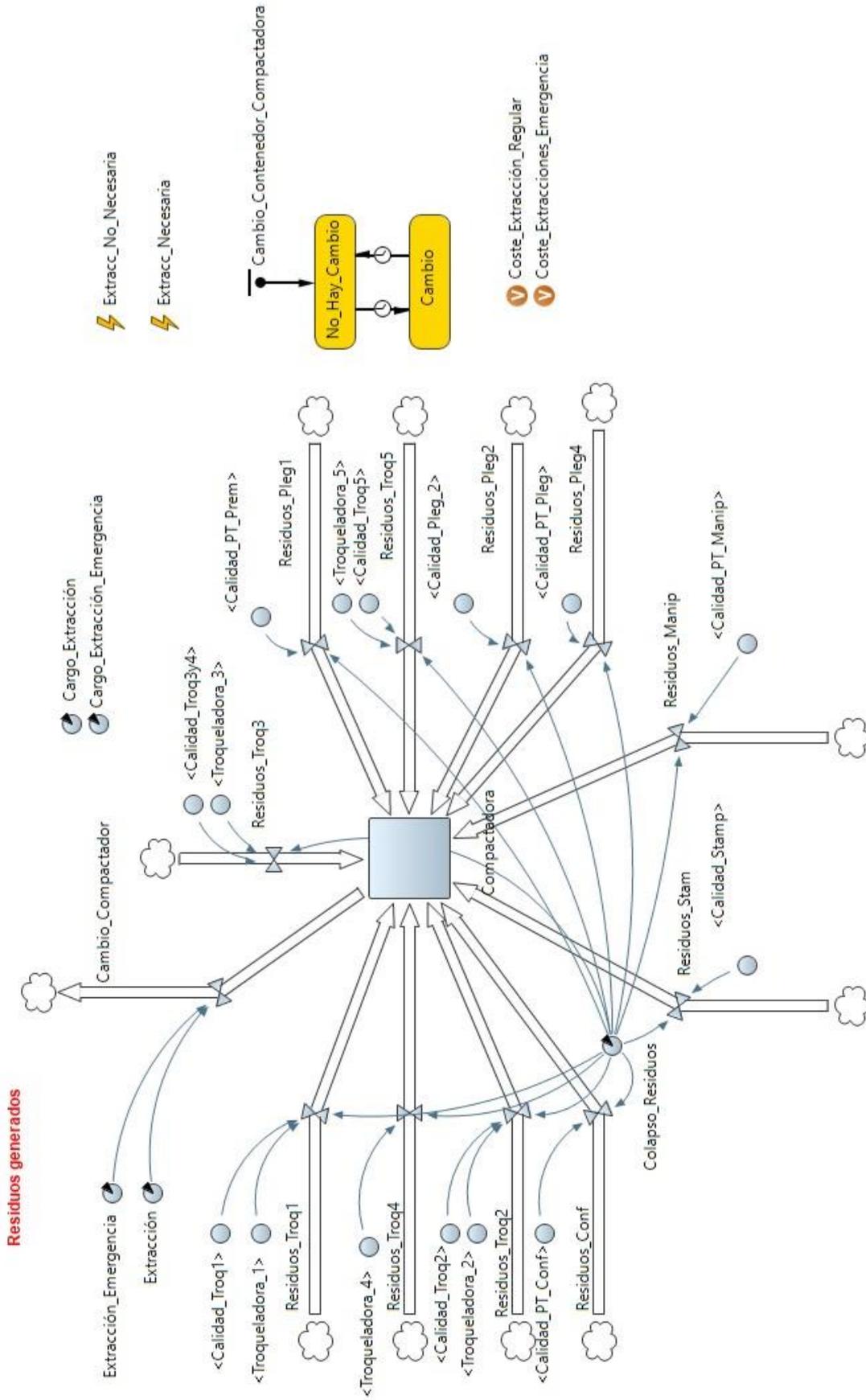


Figura 5.13. Esquema del subsistema de residuos.

Como se puede observar en la figura 5.13, tanto las troqueladoras, como las plegadoras, la conformadora y la yogurtera, aportan residuos al contenedor de la compactadora (*Compactadora*) a través de los flujos correspondientes (*Residuos_...*). Estos últimos flujos pueden incluir únicamente los rechazos de calidad, como es el caso de las máquinas del área de finishing, o el rechazo de calidad y los restos de cartón, como se ve en los flujos de residuo de troquelado.

A través del mapa de estados *Cambio_Contenedor_Compactadora* se ha programado el cambio del contenedor para ocurrir una vez cada 24 horas. Cada recambio supondrá un cargo regular por la extracción, *Cargo_Extracción*, añadido a la variable agregada *Coste_Extracción_Regular*.

Sin embargo, es posible que, debido a una avería, o a un ritmo de producción demasiado elevado, sea necesario cambiar en condiciones de emergencia este contenedor, ya que si se llena la actividad en la fábrica se detiene. Cada vez que el evento *Extracc_Necesaria* se dispare, el contenedor se cambiará, pero esto supondrá un cargo extra en el recambio del contenedor, añadiendo esta vez el valor del parámetro *Cargo_extracción_Emergencia* a la variable *Coste_Extracciones_Emergencia*.

A continuación, como resumen de este apartado, se encuentra la tabla 5.11.

Nombre	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
Compactadora	Stock	0	Residuos_Pleg4 + Residuos_Troq1 + Residuos_Troq2 + Residuos_Manip + Residuos_Troq3 + Residuos_Troq4 + Residuos_Troq5 + Residuos_Conf + Residuos_Pleg2 + Residuos_Stam + Residuos_Pleg1 - Cambio_Compactador
Cambio_Compactador	Flujo		1000000*(Extracción_Emergencia+Extracción)
Residuos_Troq1	Flujo		(90*Troqueladora_1 + Calidad_Troq1)*Colapso_Residuos
Residuos_Troq2	Flujo		(30*Troqueladora_2+Calidad_Troq2)* Colapso_Residuos
Residuos_Troq3	Flujo		(60*Troqueladora_3 + Calidad_Troq3y4)* Colapso_Residuos
Residuos_Troq4	Flujo		60*Troqueladora_4*Colapso_Residuos
Residuos_Troq5	Flujo		(Calidad_Troq5 + 4*Troqueladora_5)* Colapso_Residuos

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

Residuos_Pleg1	Flujo		$2000 * \text{Calidad_PT_Prem} * \text{Colapso_Residuos}$
Residuos_Pleg2	Flujo		$\text{Calidad_Pleg_2} * \text{Colapso_Residuos}$
Residuos_Pleg4	Flujo		$4000 * \text{Calidad_PT_Pleg} * \text{Colapso_Residuos}$
Residuos_Conf	Flujo		$3500 * \text{Calidad_PT_Conf} * \text{Colapso_Residuos}$
Residuos_Manip	Flujo		$30000 * \text{Calidad_PT_Manip} * \text{Colapso_Residuos}$
Residuos_Stam	Flujo		$\text{Calidad_Stamp} * \text{Colapso_Residuos}$
Calidad_Troq1	Flujo		Ver tabla 5.5
Calidad_Troq2	Flujo		Ver tabla 5.5
Calidad_Troq3	Flujo		Ver tabla 5.5
Calidad_Troq4	Flujo		Ver tabla 5.5
Calidad_Troq5	Flujo		Ver tabla 5.6
Calidad_Stam	Flujo		Ver tabla 5.6
Calidad_Pleg2	Flujo		$0.015 * \text{Plegadora_2}$
Calidad_PT_Premium	Flujo		Ver tabla 5.7
Calidad_PT_Plegado	Flujo		Ver tabla 5.7
Calidad_PT_Conformado	Flujo		Ver Tabla 5.8
Calidad_PT_Manipulado	Flujo		Ver tabla 5.9
Troqueladora_1	Flujo		Ver tabla 5.5
Troqueladora_2	Flujo		Ver tabla 5.5
Troqueladora_3	Flujo		Ver tabla 5.5
Troqueladora_4	Flujo		Ver tabla 5.5
Troqueladora_5	Flujo		Ver tabla 5.6
Colapso_Residuos	Parám.	1	Cambia según el mapa de estados Cambio_Contenedor_Compactadora
Extracción	Parám.	0	Cambia según el mapa de estados Cambio_Contenedor_Compactadora
Extracción_Emergencia	Parám.	0	Cambia según los eventos de Extracc_Necesaria

Cargo_Extracción	Parám.	2000	
Cargo_Extracción_Emergencia	Parám.	6000	
Extracc_Necesaria	Evento		Compactadora >= 2000000
Extracc_No_Necesaria	Evento		Condición. Compactadora <= 5000
Coste_Extracción_Regular	Variable		+ = Cargo_Extracción;
Coste_Extracción_Emergencia	Variable		+ = Cargo_Extracción_Emergencia;

Tabla 5.11. Resumen de variables y parámetros del subsistema de residuos.

5.3.8 Costes de Almacenamiento

Por supuesto, toda materia prima, producto semiterminado y terminado almacenados suponen un coste. En el caso de este estudio, se ha decidido valorar los pallets de los distintos materiales en función del espacio que ocupan. Al ser de medidas similares, los costes de almacenamiento no presentan grandes diferencias entre ellos.

En este trabajo, se han asignado los siguientes precios, dependiendo de qué elemento sea el almacenado:

- Materias primas. Su coste de almacenamiento será de 2 céntimos la hora por unidad.
- Productos semiterminados. Almacenados por 1 céntimo la hora.
- Producto Premium. Su coste de almacenamiento se ha supuesto en 7 céntimos la hora.
- Producto terminado de gama media (Plegado, conformado y manipulado). Se ha asignado un precio de 5 céntimos/unidad por hora almacenada.

En la figura 5.14 se puede observar el esquema de funcionamiento de los costes de almacén.

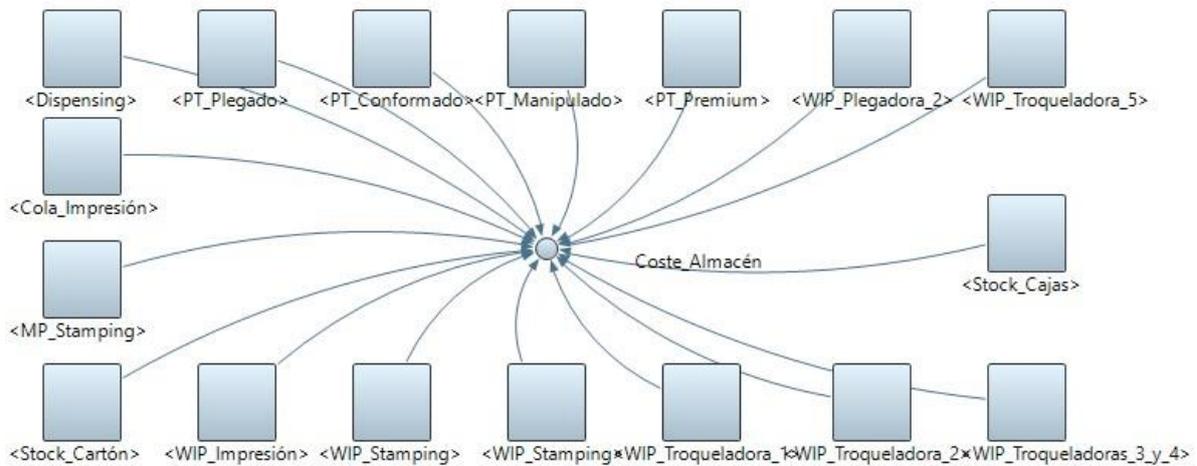


Figura 5.14. Representación del cálculo de costes de almacén.

5.3.8 Aclaración sobre el registro de los costes e ingresos

Como se ha podido observar a lo largo de los apartados de este capítulo, se han presentado los costes como parte de cada subsistema, y su valor cambia según el evento *Fin_Hora*. Aunque hasta cierto punto es así, para poder controlar con mayor facilidad y hacer más accesible el acceso a la información, los costes se dividieron en tres grandes grupos, existiendo una clasificación extra para la agrupación de todos los valores. Cada tipo de gastos es actualizado según su propio evento *Fin_Hora*. La clasificación es la siguiente:

- Costes logísticos. Agrupan tanto los gastos por el mantenimiento del almacén, como las entradas y salidas de camiones y las compras de abastecimiento. Se actualizan según el evento *Fin_Hora_Logística*.
- Costes de personal. Registro del coste por la manutención del personal de cada sección y máquina. El valor de cada variable se registra gracias a *Fin_Hora_Personal*.
- Costes de consumo eléctrico. Para cada máquina y sección, se controla el consumo eléctrico total durante el tiempo de simulación. El evento *Fin_Hora_Luz* mantiene estos datos al día.

- Costes generales. En este apartado, se observan los valores totales para cada tipo de gasto. Se encuentran en esta sección también los ingresos por ventas y el beneficio conseguido por la planta. El evento asignado es *Fin_Hora_General*.

Finalmente, a la suma total de ingresos se le sustraerá el agregado de todos los distintos costes, obteniendo así el valor de la variable *Beneficios*.

En la figura 5.15 se encuentran todos los costes e ingresos asociados al funcionamiento de la planta.

Costes Generales	Costes Logísticos	Costes Personal	Costes Consumo Eléctrico	Ingresos
 Fin_Hora_General  Fin_Hora_Logística	 Fin_Hora_Logística	 Fin_Hora_Personal	 Fin_Hora_Luz	
<input checked="" type="checkbox"/> Factura_Luz <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Total_Personal <input checked="" type="checkbox"/> Costes_Logísticos_Totales <input checked="" type="checkbox"/> Costes_Totales <input checked="" type="checkbox"/> Ingresos_Totales <input checked="" type="checkbox"/> Beneficios	<input checked="" type="checkbox"/> Coste_Recarga_Dispensing <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Logística_Cartón <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Recarga_Stamping <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Compra_Cajas <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Camiones_Salida <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Total_Almacén <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Total_Extracción <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Extracción_Regular <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Extracciones_Emergencia	<input checked="" type="checkbox"/> Coste_Total_Personal_Almacén <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Total_Personal_Imp <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Total_Personal_Troq <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Troqueladora_1 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Troqueladora_2 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Troqueladora_3 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Troqueladora_4 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Troqueladora_5 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Estampadora <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Total_Pleg <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Plegadora_1 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Plegadora_2 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Plegadora_4 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Manipulado <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Personal_Conformado	<input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Impresora <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Troquelado <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Troq1 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Troq2 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Troq3 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Troq4 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Troq5 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Estampadora <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Plegado <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Pleg_1 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Pleg_2 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Pleg_4 <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Conformado <input checked="" type="checkbox"/> Coste_Luz_Yogurtera	<input checked="" type="checkbox"/> Ingresos_Ventas <input checked="" type="checkbox"/> Ingresos_Ventas_Premium <input checked="" type="checkbox"/> Ingresos_Ventas_Plegado <input checked="" type="checkbox"/> Ingresos_Ventas_Conformado <input checked="" type="checkbox"/> Ingresos_Ventas_Manipulado

Figura 5.15. Costes e ingresos del modelo de la planta de producción de envases de cartón.

5.4 Funcionamiento esperado

El proceso parte de la definición de la carga de trabajo a desarrollar durante la semana. A través del establecimiento de un número de órdenes de trabajo (En el esquema: Número_OTs), y un tamaño medio para cada pedido (Tamaño_OTs), se obtiene el total de cartón que se consumirá durante la semana del estudio.

Definida la demanda total de materia prima, se aplica el Principio del Heijunka, o nivelado de la producción. Así se consigue un ritmo de producción uniforme, mediante el cual se buscan minimizar los stocks de productos intermedios (WIPs).

Como consecuencia de la distribución del WIP generado por la impresora (WIP_Impresión) entre las distintas líneas de troquelado, se esperan velocidades bajas en estas máquinas, las cuáles contribuirán, de nuevo, a generar stocks de WIP en troquelado pequeños.

La segunda implicación de los reducidos ritmos de producción en las máquinas es el bajo coste en las facturas eléctricas por el funcionamiento de las éstas.

Como se ha podido observar, las velocidades base de las máquinas de la sección de finishing; plegadoras, conformadora, y yogurtera, no están vinculadas a la velocidad de las secciones anteriores. Consiguientemente, los paros en la producción por desabastecimiento de estuches son de esperar.

Para paliar este efecto, se ha optado por programar un arranque escalonado de la actividad productiva de la planta. En el primer día de la simulación iniciarán la producción tanto la impresora como la sección de troquelado. Pasadas las primeras 24 horas, la sección de finishing comenzará sus operaciones de fabricación. Finalmente, las salidas han sido programadas para empezar a partir del tercer día de simulación.

En una primera simulación, es probable que el ritmo de producción haga que el contenedor de la compactadora se llene una vez, o dos, por semana. No se prevén cambios de emergencia en el contenedor de los residuos.

En lo relativo a las materias primas secundarias, es estimada la necesidad de al menos una recarga de tintas (Dispensing), película para los productos premium (MP_Stamping). En cuanto a las cajas para la disposición de los productos terminados (Stock_Cajas) serán necesarios más reabastecimientos, ya que tanto los productos de la línea premium (PT_Premium), como los de plegado y conformado (PT_Plegado y PT_Conformado), van en cajas.

En la figura 5.16 se puede observar el sistema de la línea de producción al completo, a excepción del modelado de la gestión de los residuos (figura 5.13).

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.

Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

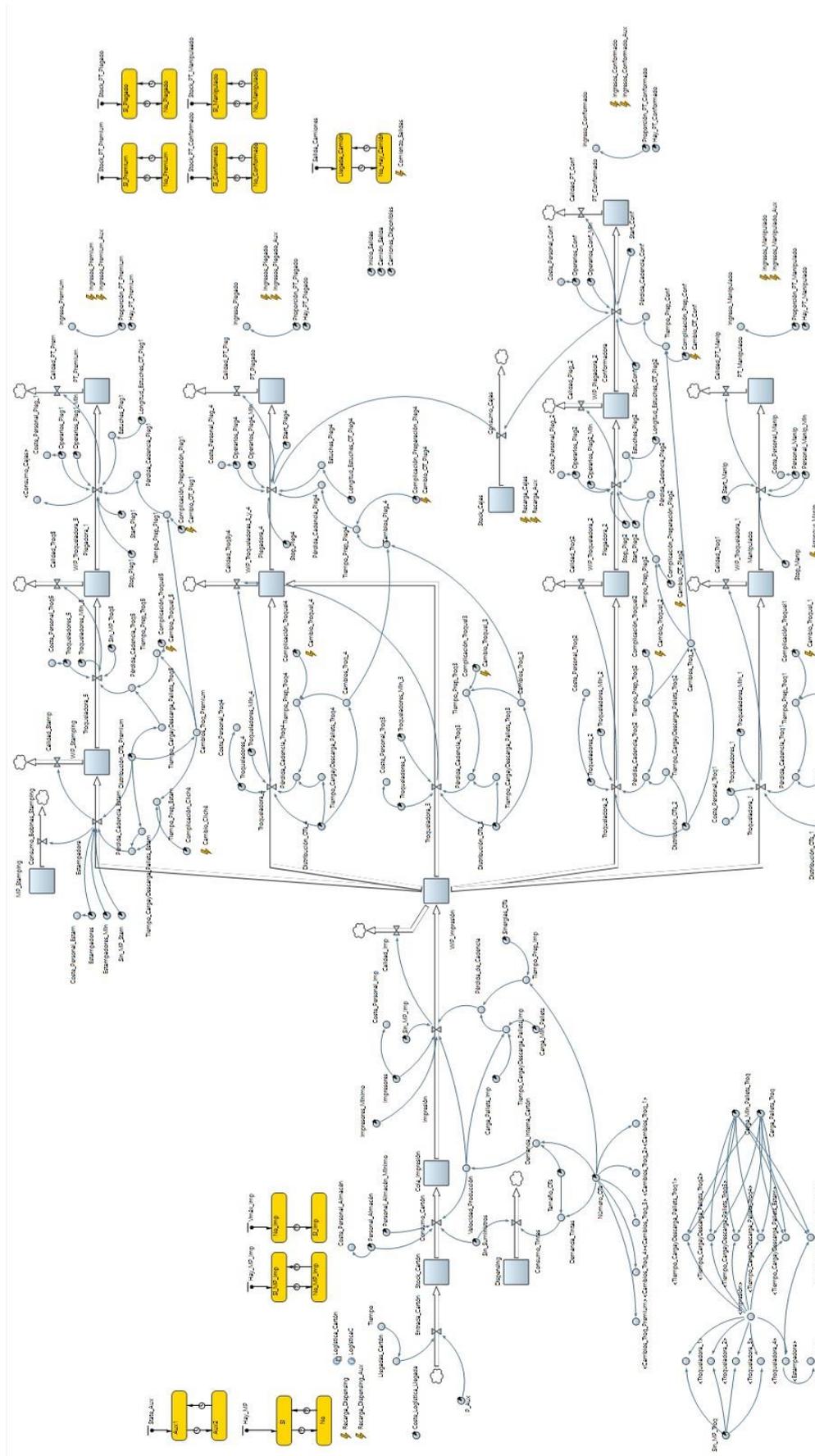


Figura 5.16. Modelo completo de la planta de GPI Maliaño.

5.5 Resultados

Tras la primera simulación del modelo completo se han observado muchos detalles, algunos previstos y otros no. A partir de los datos obtenidos, se estudiará tanto la plausibilidad de estos resultados, como la dirección a seguir en la optimización del proceso.

La ruta que se seguirá en este apartado del estudio será la siguiente:

- En primer lugar, se comenzará analizando los resultados numéricos recogidos en las variables agregadas (ver sección 5.3.8).
- Seguidamente, se estudiará la evolución de los distintos stocks en planta, y las interacciones entre ellos que generan las máquinas (flujos).
- Finalmente, se comentarán brevemente los resultados obtenidos en la sección de ingresos por ventas.

Antes de empezar el análisis en mayor profundidad, en la figura 5.17 se ofrece una captura del estado final del modelo.

Optimización de la organización y gestión de procesos industriales mediante la aplicación de la Dinámica de Sistemas.
Aplicación a una cadena de producción de envases de cartón.

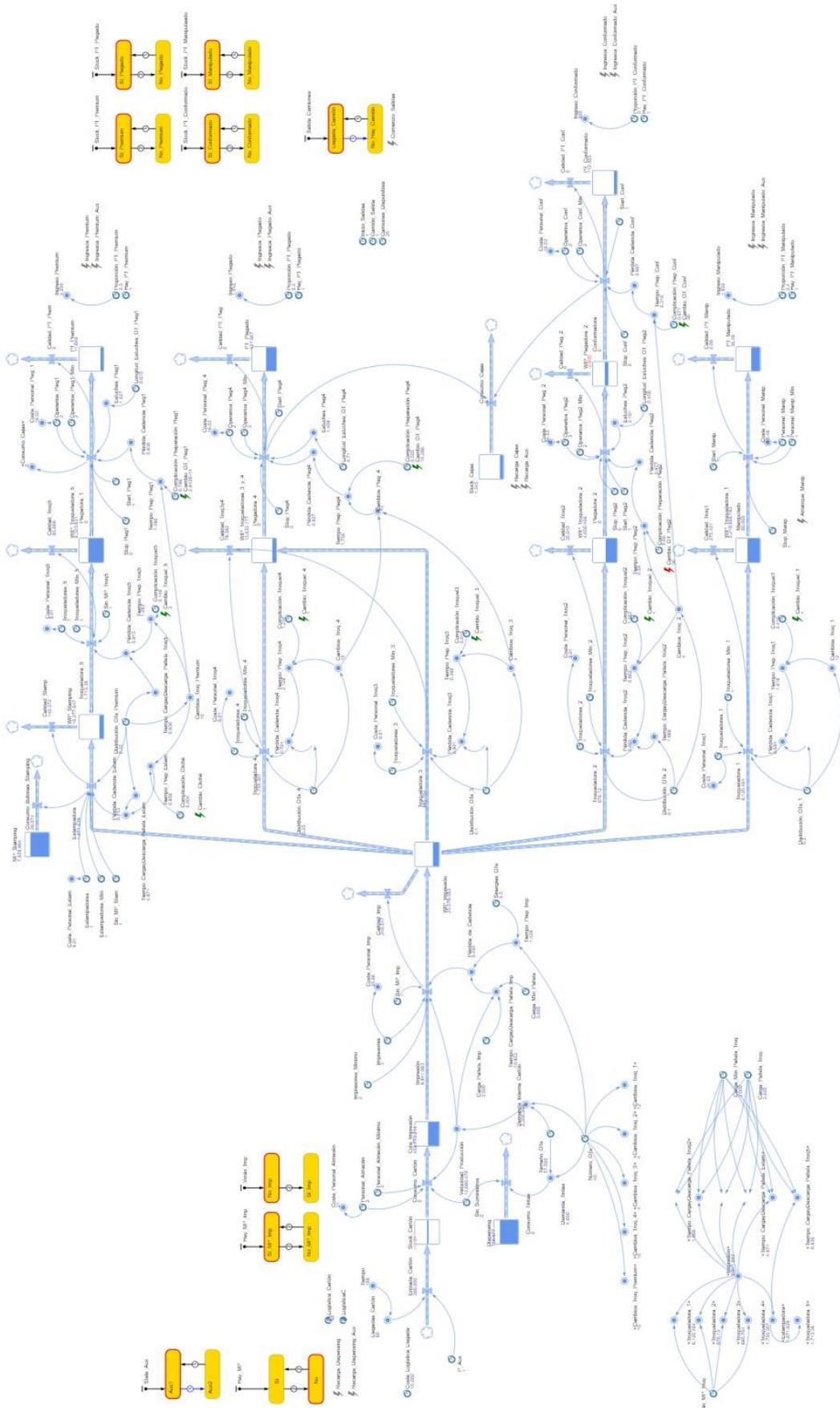


Figura 5.17. Estado final de la planta.

En la figura a continuación se pueden ver los valores finales de todas las variables agregadas que monitorizan los gastos e ingresos del sistema



Figura 5.18. Variables de control de gastos e ingresos del sistema

Es apreciable que en la primera iteración del sistema no se ha conseguido obtener un beneficio, situándose el rendimiento de la planta en unas pérdidas de 89.800 euros. Este hecho, sin embargo, no resulta alarmante, ya que no se esperan logros positivos en primer lugar. En segundo lugar, es importante enfatizar que, en última instancia, este estudio consiste en un ejercicio teórico, en el que hay factores a los que se les ha asignado un valor arbitrario, hecho que puede dar lugar a resultados menos ajustados a la realidad.

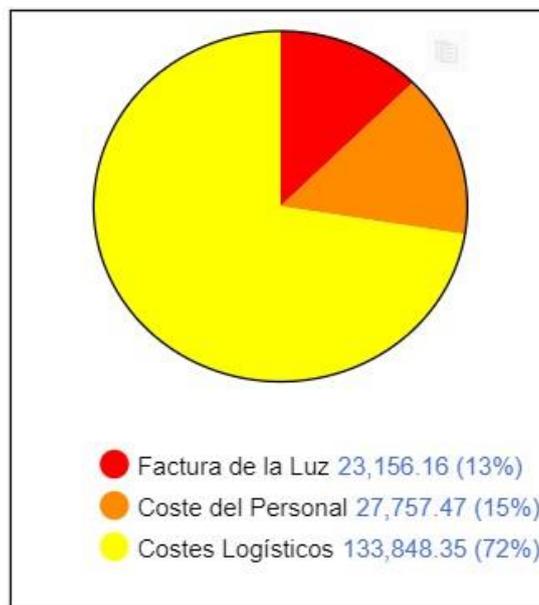


Figura 5.19. Diagrama de sectores de los costes totales.

La suma total de los costes de funcionamiento de la planta asciende a 184.000 euros. Dichos costes siguen la distribución indicada en el diagrama de la figura 5.19. Aquí se puede apreciar que los costes de Logística suponen la gran mayoría de los gastos asumidos por la planta.

Según lo explicado en el apartado 5.3.8, los gastos en logística agrupan tanto el abastecimiento de materias primas, como el mantenimiento de las existencias en el almacén, y las gestiones de los servicios de transporte. En el modelo, estos gastos han sido los más voluminosos, suponiendo el 72% del total, con 133.800 euros.

Como es de suponer, la compra de la materia prima principal ha sido la compra que mayores recursos económicos ha consumido, con un valor de 70.000 euros (alrededor de un 36,7% del total de costes).

En la gráfica 5.20 también son observables los costes por los cambios regulares de os contenedores de la compactadora. Sumando 14.000 euros, no suponen ninguna sorpresa, ya que se realizan durante la semana 7 cambios.



Figura 5.20. Gráfico de la distribución de costes logísticos.

Es necesario apuntar, antes de continuar con el análisis de los otros grupos de costes, que se han producido dos recargas de tintas, una compra de material para stamping y una compra de cajas. Estos resultados concuerdan con las estimaciones del apartado 5.4.

Por último, los costes del envío con camiones con producto terminado también tienen un peso importante en el total de costes logísticos, y si se espera mejorar el rendimiento de la fábrica, estos no podrán más que aumentar. Por supuesto, constituyen un “mal” a asumir.

El segundo grupo de costes en cuanto a volumen son los costes del personal. Estos suponen un 15% del total (27.700 euros). Su desglose es apreciable en la figura 5.21:

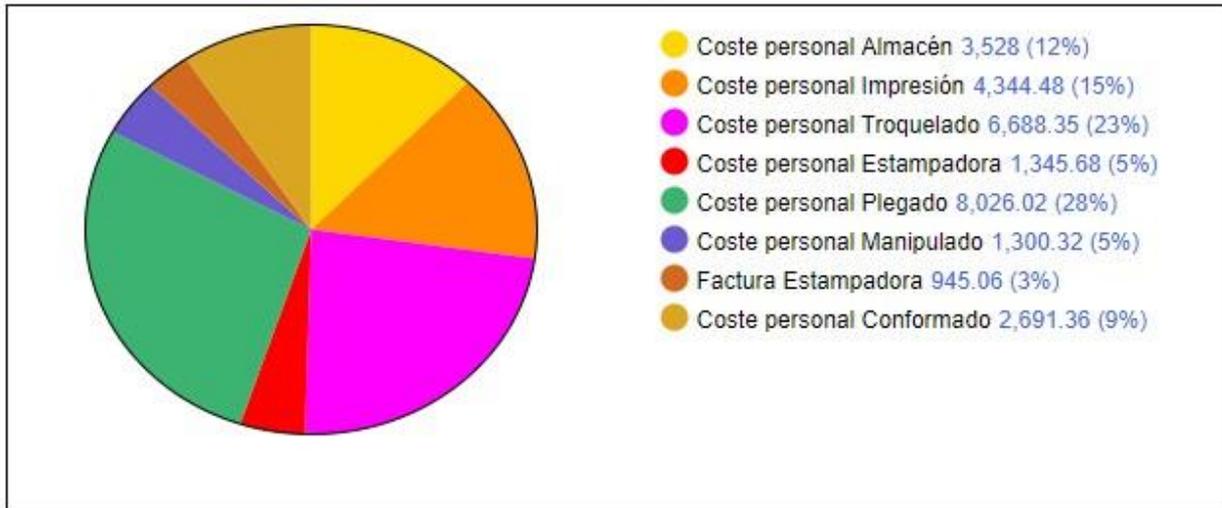


Figura 5.21. Diagrama de sectores del desglose de gastos por sección de producción.

Si bien es cierto que la planta posee cinco troqueladoras, frente a tan solo 3 plegadoras, la necesidad de máquina de plegado de un maquinista y un apoyo hace que sean más grandes los costes en estas líneas de finishing frente a las de troquelado (28% frente a 23%). Tras la optimización, por el contrario, se espera que sean más significativos los últimos.

Finalmente, la factura por el consumo energético ha supuesto, con 23.100 euros, el 13% de los costes absorbidos por la fábrica. Como se puede observar, la factura se ha repartido de la siguiente forma:

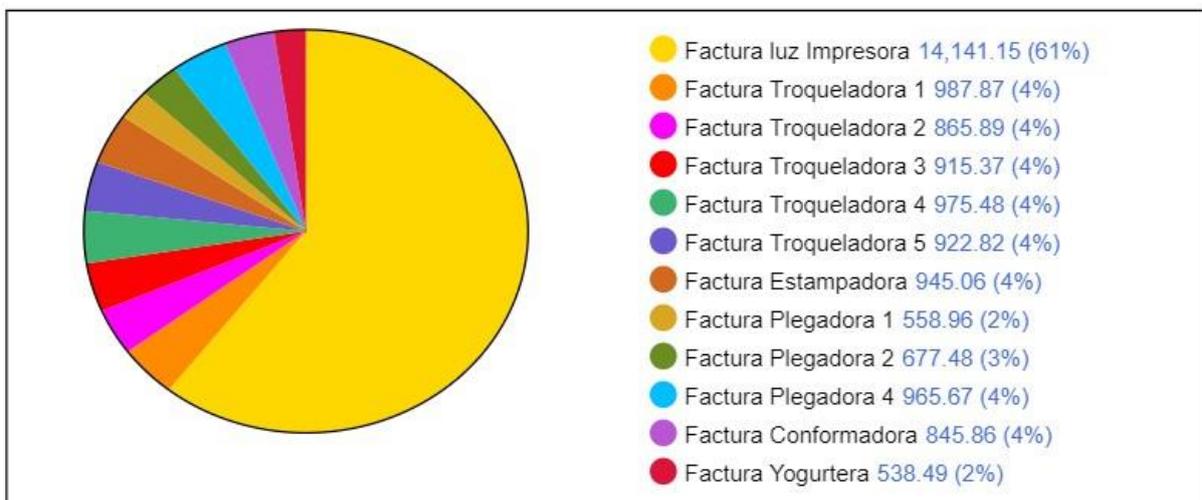


Figura 5.22. Desglose por máquinas de la factura de la luz de la planta.

Era de esperar, debido a su potencia asignada, que la impresora fuera el término con mayor peso en la factura eléctrica, con 14.100 euros (61%). Sin embargo, en próximas iteraciones se esperan aumentos de velocidad en el resto de las máquinas, así que es posible que el porcentaje correspondiente a la impresora se reduzca.

A continuación, se procederá a analizar la evolución de los distintos stocks, y cuando sea necesario, la velocidad de las máquinas que interactúan con estos.

Comenzando desde la entrada a la fábrica, se aprecia en la figura 5.23 tanto las existencias de cartón en el almacén, como el estado de la cola de impresión a lo largo de la simulación.

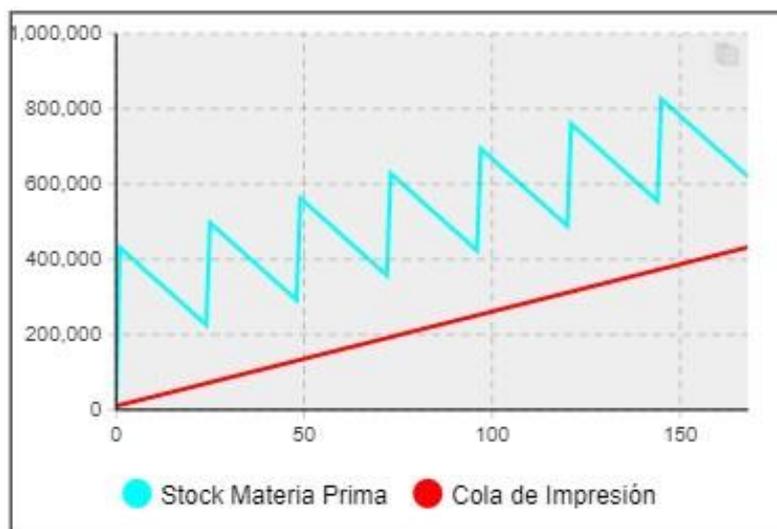


Figura 5.23. Evolución de la materia prima en almacén y de la cola de impresión.

En primer lugar, fijándose uno en la recta de *Cola de Impresión*, se puede concluir que, aunque en esta iteración suponga un gasto extra, el crecimiento constante de stock en esta variable sería capaz de soportar un moderado incremento en la velocidad de producción. Del mismo modo, aunque el stock de cartón en el almacén tenga una evolución visiblemente irregular, la distancia entre ambas gráficas lleva a la conclusión de que las existencias en el almacén durante la simulación son capaces de cubrir la hipotética demanda de un ritmo de producción aumentado.



Figura 5.24. Evolución del material impreso y preparado para troquelar (WIP de Impresión).

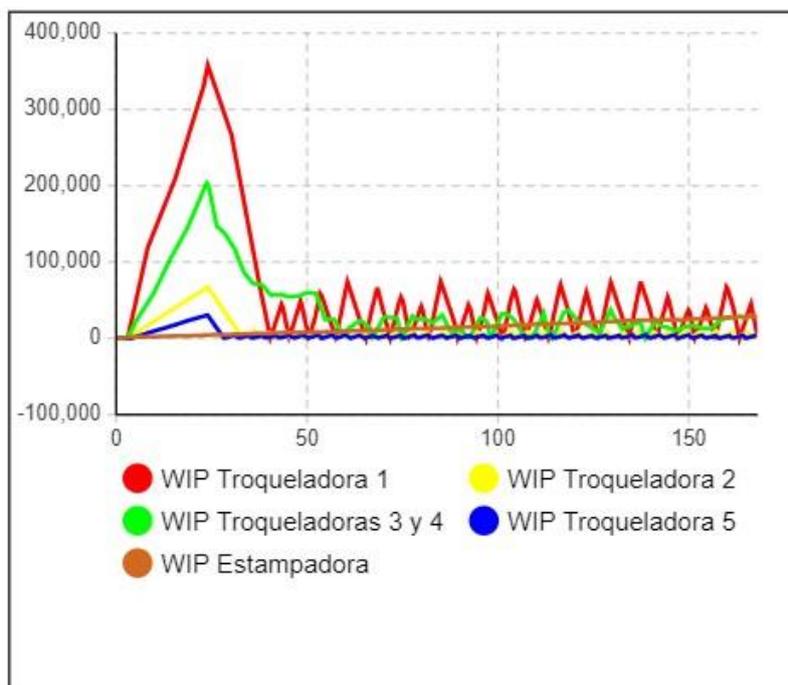


Figura 5.25. Evolución a lo largo del tiempo del WIP de las máquinas de la sección de Troquelado.

A continuación, se comentarán los datos recogidos en las figuras 5.24 y 5.25 de forma conjunta. En ambas gráficas se aprecian el desarrollo de los stocks de productos semiterminados al inicio y final de la sección de Troquelado.

Por un lado, se puede apreciar el crecimiento constante de los pliegos impresos (figura 5.24). Por otro (figura 5.25), está claro que una vez la fase de finishing arranca, el colchón generado

por las troqueladoras durante el primer día de simulación no es suficiente para asegurar un abastecimiento regular. Estas dos observaciones llevan a una única conclusión: en la zona de troquelado se ha constituido, en las condiciones iniciales, un cuello de botella. En consecuencia, sobre esta zona se trabajará con especial atención en el apartado de optimización.

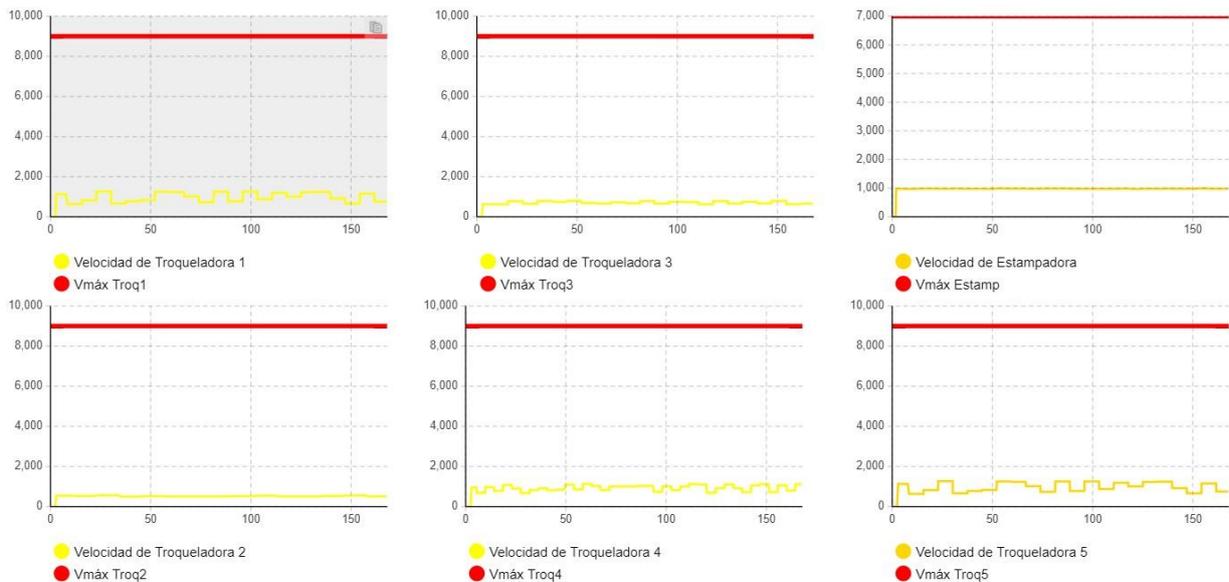


Figura 5.26. Velocidades de producción de las máquinas de la sección de Troquelado.

En la imagen anterior se encuentran las evoluciones de las velocidades medias de las troqueladoras y la estampadora. Como se explicó en el apartado 5.3.3. Los ritmos de producción de partida de estas máquinas ya son bajos. Esta limitación en el rendimiento de fabricación se acentúa gracias a los dilatados tiempos de preparación de las diferentes órdenes, que produce fluctuaciones importantes en las máquinas.

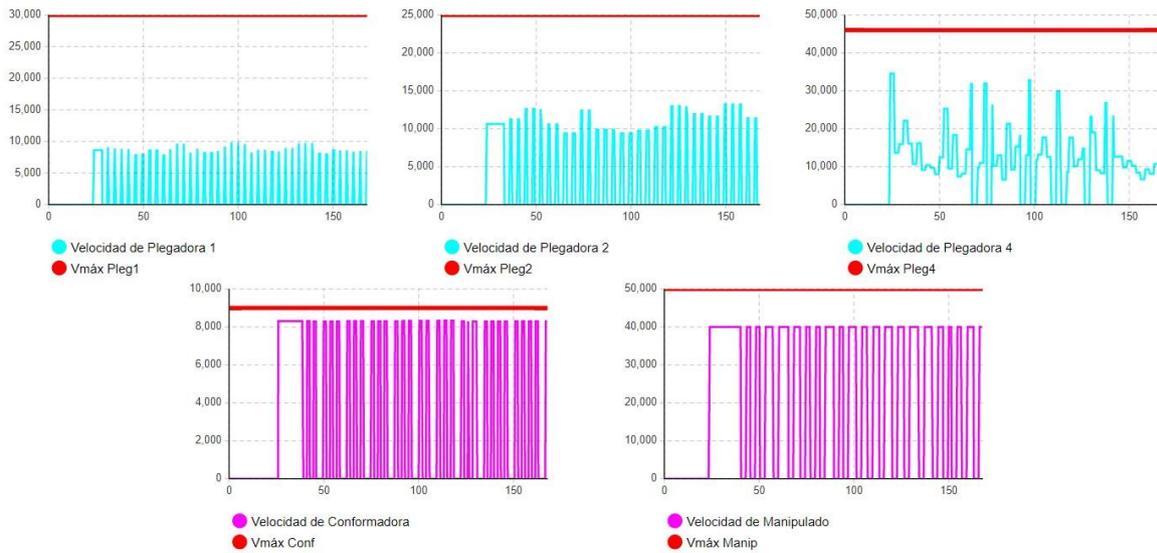


Figura 5.27. Velocidad de las diferentes máquinas de la sección de Finishing.

La consecuencia directa de la existencia de este cuello de botella es la anteriormente mencionada. De forma regular las máquinas de finishing se quedan sin materia prima para trabajar, produciéndose múltiples paradas, con una duración mínima de 3 horas. La excepción de este comportamiento la constituye la plegadora 4, que es alimentada por las troqueladoras 3 y 4. Todos estos hechos se observan con claridad en la figura 5.27.

En último lugar, se debe comentar la salida de producto de la fábrica, ya que en este punto es donde se han producido las mayores pérdidas. En la tabla 5.10 del apartado 5.3.6 se introdujeron los valores de los parámetros *Proporción_PT(...)*, que regulan la distribución del camión que carga producto terminado. La secuencia elegida resulta en que de los 40 pallets que se pueden cargar en un camión 12 serán de producto premium, 8 de plegado normal, 4 de conformado, y los 16 resultantes de manipulado. El resultado de esta elección se presenta en la figura 5.28:

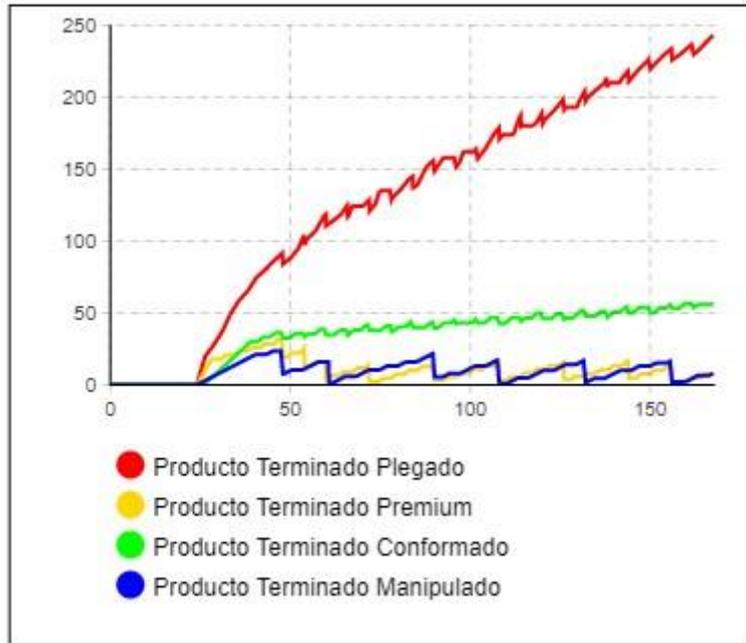


Figura 5.28. Evolución durante la simulación del modelo de la planta.

En primer lugar, destaca el incremento constante de existencias del stock de plegado, como consecuencia de una planificación incorrecta de las prioridades de salida. El comportamiento del stock de conformado sigue una línea similar, aunque el excedente se produce en menor medida.

Por el contrario, la producción de producto premium y de manipulado no es capaz de abastecer el camión de salida de forma regular, puesto que carga mayores cantidades de pallets de estos productos (12 y 16 respectivamente). Como consecuencia, varios camiones abandonan la planta sin aprovechar el total de su capacidad. Por lo tanto, no sólo se pierde dinero debido al producto que no se ha podido enviar, sino también por el stock generado que se acumula en fábrica.

Estos eventos en la salida generan una distribución de los ingresos por ventas respecto al tipo de producto, presentada a continuación:

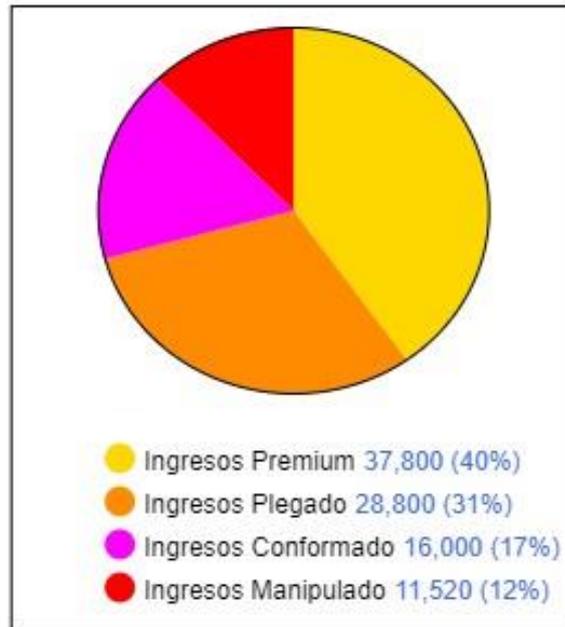


Figura 5.29. Ingresos por tipo de producto.

En la gráfica 5.30 se resume el rendimiento económico de la planta. Como se ha comentado, y se puede apreciar, los ingresos generados no son suficientes para cubrir los gastos acumulados a lo largo de toda la semana.



Figura 5.30. Costes frente a ingresos.

De la figura 5.29 hay que destacar los ingresos provenientes de la venta de producto premium, y de la venta de producto de plegado. Los primeros constituyen un punto de interés debido al alto porcentaje de ingresos que suponen (40%), pese a suponer un pequeño volumen de carga, ya que únicamente se produjeron 9 salidas, con un total de 108 pallets. En segundo lugar, aportando el 31% de los ingresos totales, se encuentra el producto plegado.

Aquí, la planta tiene un margen de mejora muy grande, puesto que pese a haberse producido 20 cargas, con un recuento total de 160 pallets enviados, aun se presenta un superávit importante de este producto final.

Para cerrar este apartado, se muestra en la figura 5.31 la evolución del depósito de la compactadora de residuos. No se ha producido ningún cambio de emergencia de los contenedores, aunque es claramente apreciable una tendencia al alza, que se traducirá en la necesidad de introducir recambios de estos contenedores no programados, en el caso de aumentar la producción.



Figura 5.31. Evolución del llenado del contenedor de la compactadora a lo largo del tiempo.

6. Optimización de una planta de producción de envases de cartón: Graphic Packaging International Maliaño

En el apartado final del capítulo anterior se ha comentado el funcionamiento de la planta en las condiciones de partida. En base a lo comentado, se han elegido las siguientes rutas de optimización, mediante las cuales se buscará mejorar el rendimiento económico de la planta.

Las líneas de optimización que se estudiarán, ordenadas de menor a mayor complejidad, se presentan a continuación:

1. En base a la disposición actual de los recursos en fábrica, se buscará elegir la mejor secuencia de prioridades de salida de producto, que permita maximizar los ingresos. Para este apartado, se empleará la herramienta de optimización proporcionada por Anylogic, presentada en el capítulo 3.
2. Partiendo de las prioridades de salida de producto elegidas en la simulación inicial, se intentará abastecer a los camiones, mediante la expansión de los recursos disponibles en planta.
3. Como ruta final de optimización, se evaluará el rendimiento de la producción buscando llevar el ritmo de fabricación de la planta al máximo posible, teniendo como tope la cantidad de materia prima que puede recibir la fábrica (2.590.000 pliegos de cartón, ver apartado 5.3.1).

Es necesario apuntar que en las rutas de optimización 2 y 3 no ha sido posible emplear la herramienta de Anylogic. La versión de aprendizaje personal limita el funcionamiento de esta a un máximo de 7 parámetros, mientras que en este modelo se trabaja con 28 puntos de entrada al sistema.

Por este motivo, en los programas de optimización 2 y 3 se intentará alcanzar el mejor resultado posible, aplicando el menor número de cambios.

6.1 Optimización de las Prioridades de salida de fábrica

Como se ha comentado en la introducción del capítulo, la primera estrategia a seguir en el proceso de mejora consiste en seleccionar una secuencia para los parámetros *Proporción_PT(...)* que maximice los beneficios generados por la planta.

Para comenzar, es necesario recordar las proporciones de salida de producto que se habían tomado como punto de partida en la simulación inicial:

- Producto Premium. 30% del total, 12 pallets.
- Producto de Plegado. 20% del total, 8 pallets.
- Producto de conformado (bandejas). 4 pallets, que suponen un 10% de la carga.
- Producto de manipulado. 16 pallets, el 40% restante del total.

Desde aquí, se inicia un nuevo experimento de optimización en Anylogic. El objetivo de esta herramienta será la maximización de la variable *Beneficios* (ver apartado 5.3.8). En las figuras 6.1. y 6.2 se aprecian los pasos a seguir en Anylogic para preparar el experimento de optimización.

Optimización_GPI - Optimization Experiment

Name: Ignore

Top-level agent:

Objective: minimize maximize

Number of iterations:

Automatic stop

Maximum available memory: Mb

Figura 6.1. Declaración de la función objetivo en el experimento de optimización.

Propor...remium	discrete	0	1	0.025	0.3
Propor...legado	discrete	0	1	0.025	0.2
Propor...rmado	discrete	0	1	0.025	0.1
Proporc...pulado	discrete	0	1	0.025	0.4

Figura 6.2. Disposición de los parámetros de entrada al sistema para la optimización.

En la figura 6.2 son presentados los 4 parámetros con los que se trabajará en este apartado: *Proporción_PT_Premium*, *Proporción_PT_Plegado*, *Proporción_PT_Conformado*, y *Proporción_PT_Manipulado*. En la segunda columna se encuentra la clasificación de estas variables, como discretas en este caso. La tercera y cuarta columnas aportan los valores máximo y mínimo que pueden tomar cada uno de estos parámetros en las distintas iteraciones. La quinta columna presenta el paso de estas variables; equivale a un pallet de los 40 disponibles (el 2,5% del total). En la última columna se encuentra el punto de partida en las iteraciones de las variables. En este caso se ha tomado los valores del modelo inicial, aunque podría haber sido cualquier otra secuencia.

▼ **Constraints**

Constraints on simulation parameters (are tested before a simulation run):

Enabled	Expression	Type	Bound
<input checked="" type="checkbox"/>	Proporción_PT_Premium+ Proporción_PT_...	<=	1.0
<input type="checkbox"/>	1	<=	0.0

▼ **Requirements**

Requirements (are tested after a simulation run to determine whether the solution is feasible):

Enabled	Expression	Type	Bound
<input checked="" type="checkbox"/>	Proporción_PT_Premium+Proporción_PT_...	<=	1.0
<input type="checkbox"/>	1	<=	0.0

Figura 6.3. Definición de las restricciones y requerimientos del proceso de optimización.

El paso final antes de iniciar la simulación del experimento viene ilustrado en la figura 6.3. Consiste en definir los requerimientos para evaluar la plausibilidad de los resultados de las iteraciones, y las condiciones que tienen que cumplir los parámetros en estas mismas.

En el caso de este estudio, el contenido de estos apartados coincide, por lo que no sería necesario rellenar el cuadro de requerimientos. Sin embargo, y por ilustrar con mejor precisión el procedimiento general a seguir, se han completado ambos campos.

La ecuación indicada en estos dos apartados transmite limita la suma porcentual de todos los parámetros al 100%, ya que el camión únicamente puede cargar 40 pallets como máximo.

Definidos todos los campos necesarios, se procede a la simulación. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.4. La figura 6.5 ilustra el proceso seguido por el experimento a lo largo de las iteraciones.

Proporción_PT_Premium	0.15	0.175
Proporción_PT_Plegado	0	0.5
Proporción_PT_Conformado	0	0.175
Proporción_PT_Manipulado	0.85	0.15

Figura 6.4. A la izquierda: valores de la última iteración. A la derecha: valores que mejor resultado han obtenido.

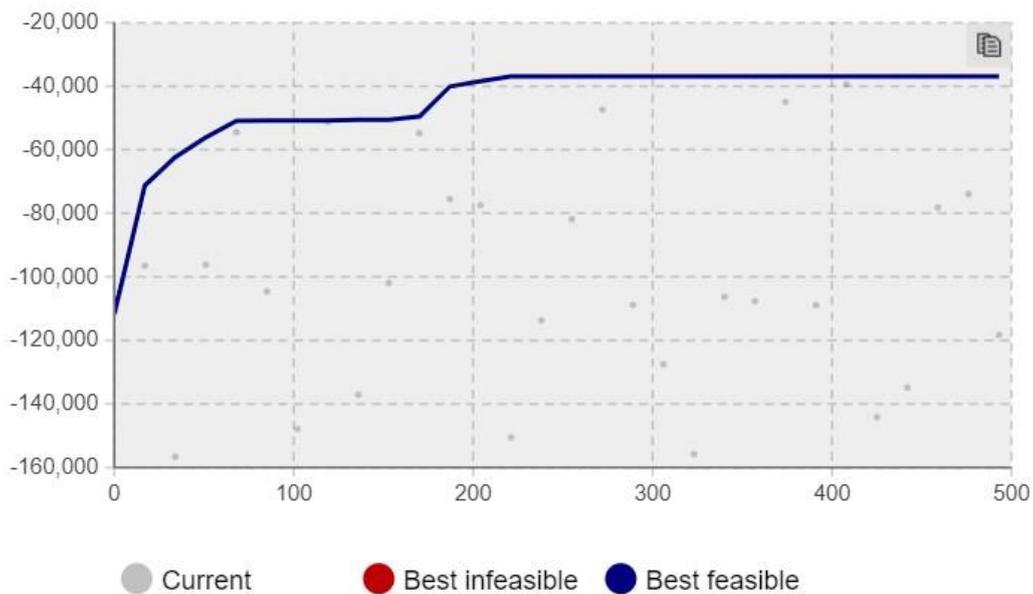


Figura 6.5. Diagrama de la evolución del experimento de optimización. (En azul: valor de *Beneficios*).

Finalmente, en la figura 6.6 se encuentra el mejor valor obtenido en las iteraciones de optimización.

	Current	Best
Iterations completed:	510	214
Objective: ↓	-134,414.973	-36,971.586
Parameters		Copy best

Figura 6.6. Derecha: Mejor valor obtenido durante a optimización.

Como se puede apreciar, cambiando la disposición de la salida de producto, se ha conseguido reducir las pérdidas a 36.970 euros, lo que supone una mejora del 58,85 % en el rendimiento económico de la planta.

Para observar cómo ha afectado esta distribución de los valores de los parámetros a la planta, principalmente a los stocks de producto terminado, se ejecutará una simulación del sistema con los valores proporcionados por el experimento.

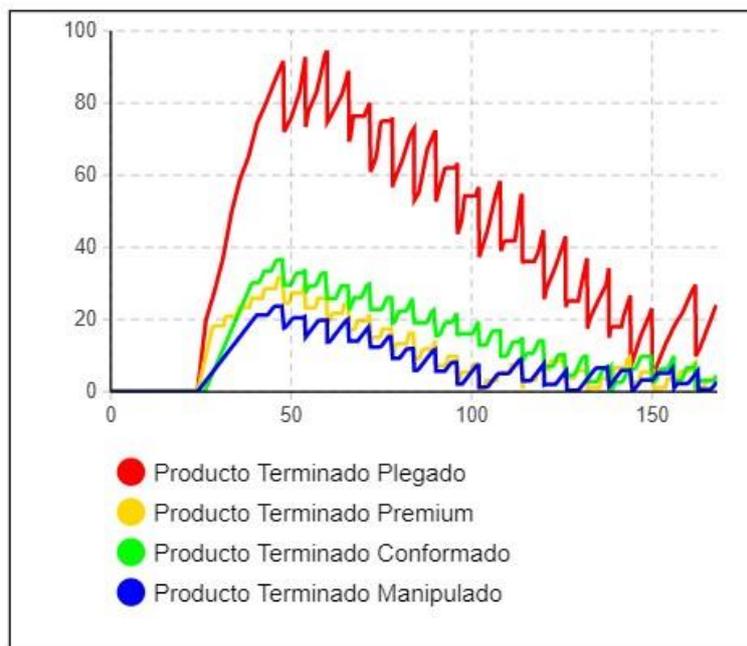


Figura 6.7. Stocks de Producto terminado tras la optimización.

A primera vista en la figura anterior, se puede observar el drástico cambio en la evolución del stock de producto terminado con respecto al del modelo inicial (ver figura 5.28). Es apreciable

como en este caso, se ha conseguido cargar la mayoría de las veces todos los productos, a excepción de dos cargas de manipulado, cuatro de premium y una de conformado. En total, se han cargado 752 pallets de producto terminado. Esta cantidad es muy superior a la inicial del estudio (444 pallets), en un 69,33 %.

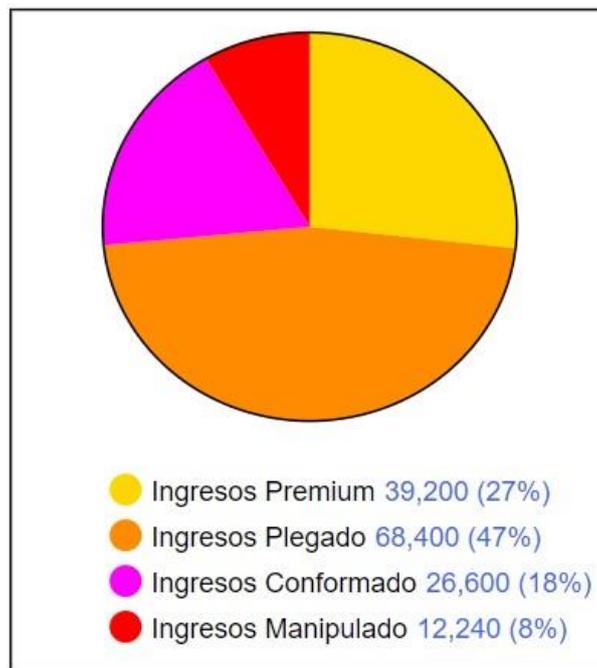


Figura 6.8. Diagrama por sectores de los ingresos de la planta tras la optimización.

Mediante la imagen 6.8, se compararán los dos tipos de ingresos más significativos, de nuevo Premium y Plegado, con los resultados obtenidos en la simulación inicial.

Pese al cargar en menos volumen por camión (17,5 % ahora, frente a 20% antes), se distingue un incremento de unos 1.400 euros (3,78 %) en la facturación de producto premium. Esto se debe a que ha sido posible cargar más camiones con este producto a una mayor frecuencia.

Por otro lado, el exceso de stock de producto Plegado en la simulación inicial se ha traducido, a través del aumento de la carga de este producto del 20% al 50%, en un importante ingreso, pasando de facturar 28.800 euros a aportar 68.400 euros (incremento del 137,5%)

Finalmente, gracias a la mejor adaptación del ritmo de salidas a la velocidad de producción de la planta, se han conseguido disminuir los costes de la gestión de las existencias en el almacén de la planta, pasando de ser necesaria una inversión de 19.410,45 euros a destinar 18.800,97 euros.

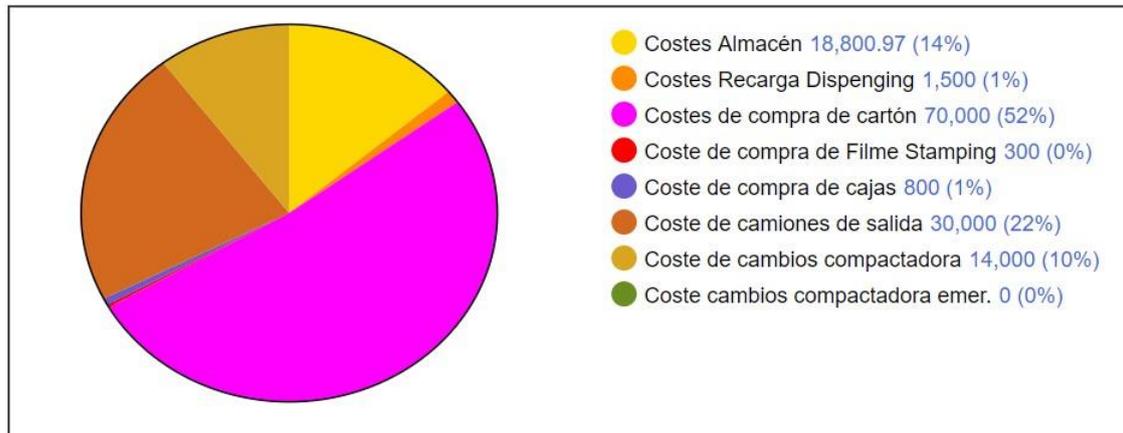


Figura 6.9. Costes logísticos tras aplicar la optimización.

6.2 Optimización de la producción en planta para cumplir con el programa de salidas de producto inicial

El objetivo de esta estrategia será la distribución de los recursos de la planta para cumplir con el programa planteado en el modelo inicial. Para ello, se recorrerá el proceso productivo, de atrás hacia adelante, buscando adaptar la fábrica lo mejor posible a esta distribución de salida de producto.

Como se apuntó anteriormente en la figura 5.28, el ritmo de producción en planta no era capaz de abastecer con suficiente rapidez las salidas de producto de conformado y manipulado. Por este motivo, comenzaremos este proceso de optimización trabajando en estas dos líneas.

Observando en primer lugar las constantes interrupciones por falta de suministros en la plegadora 1 y en la yogurtera (ver figura 5.27) y en segundo lugar las bajas velocidades de las troqueladoras que las alimentan, siendo estas la troqueladora 5 y 1 respectivamente, se concluye que es necesario aumentar la mano de obra de la sección de troquelado.

Siguiendo la línea planteada en el párrafo anterior, se ha decidido aumentar a 2 el número de operarios en las troqueladoras 1 y 5, así como en la estampadora (máquina que alimenta la troqueladora 5, aplicando el filme metálico a los pliegos).

Se debe anotar que tras realizar algunas simulaciones con el número de troqueladores de la troqueladora 1 aumentado, el sistema seguía teniendo problemas para abastecer las salidas de producto terminado de manipulado. Por este motivo, se aumentó también en 1 el personal de manipulado, para mejorar el ritmo de producción de pallets de este producto.

Tras aplicar este cambio, se simula el sistema. El resultado obtenido es positivo, pasando a generar unas pérdidas de “solo” 39.663,62 euros. Esta cantidad representa un incremento del 55,85 % en la facturación por ventas de la planta.

Si bien el resultado es parecido al obtenido en el apartado 6.1. Se ha llegado por caminos diferentes, hecho que se nota en las gráficas a continuación.

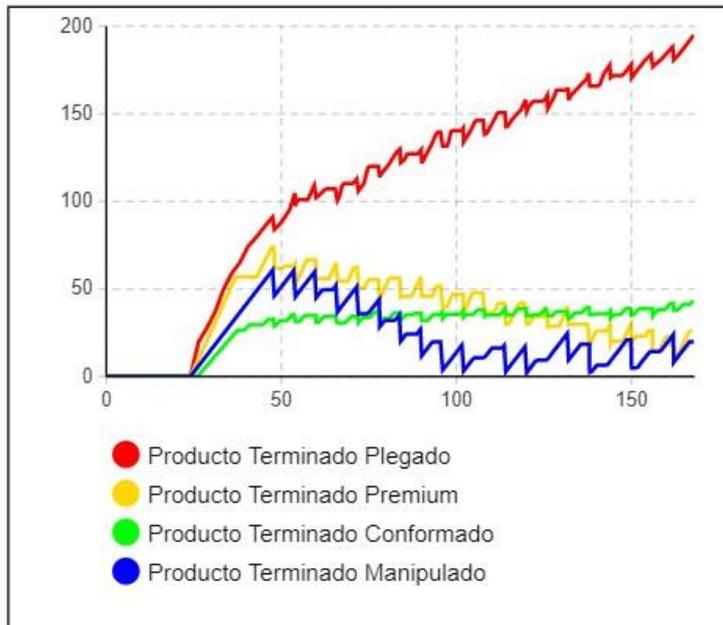


Figura 6.10. Stocks de Producto terminado tras la optimización.

Se puede observar un importante cambio de la figura 5.28 a la 6.10. En esta nueva situación, la planta abastece sin problema los stocks de producto para poder cargar en la mayoría de las ocasiones. Mediante la implementación de la segunda estrategia de optimización, se eleva el número de pallets salidos de fábrica a 736. Así, se consigue un incremento en el rendimiento de la producción del 65,78% respecto del número de pallets enviados en la simulación inicial (444).

Esta cantidad de pallets enviados a los clientes siguió la distribución de producto del modelo inicial: Premium 30%, Plegado 20%, Conformado 10% y Manipulado 40%. Consiguiendo suministrar los camiones de salida en casi todo momento, se obtiene el siguiente gráfico de la partición de los beneficios por producto:

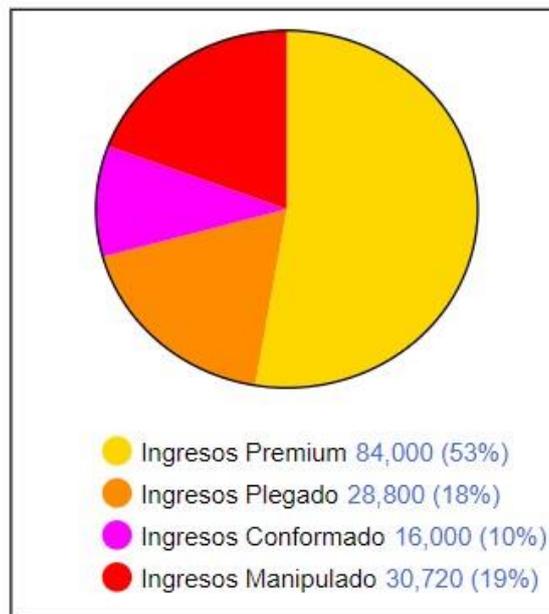


Figura 6.11. Diagrama por sectores de los ingresos de la planta tras la optimización.

Los resultados de esta estrategia de optimización se compararán los productos objetivo en este caso: Premium y manipulado, con sus contrapartes de la simulación inicial.

En primer lugar, los ingresos por la facturación de producto premium aumentan significativamente, pasando del 40% de los ingresos con 37.800 euros, a 84.000 generados en ingresos, es decir, el 53%. Esta amplia diferencia se debe a la disparidad entre las cantidades de pallets enviadas en los dos casos: de 108 a 24 pallets en el segundo caso.

De forma similar, aunque en menores volúmenes, los ingresos por la salida de producto manipulado aumentan de 11.520 euros (12%) a 30.7220 euros (19%). El número de pallets enviados se ve incrementado en un 166,67 %, pasando de 96 a 256 pallets.

Contra intuitivamente, pese al aumento de existencias de producto terminado, los costes de almacenamiento en planta disminuyen, aunque de forma ligeramente apreciable (se pasa de

19.410,45 a 19.274,66 euros). Esto se debe a la forma de valorizar los distintos pallets de materia prima, producto semiterminado y producto terminado, de forma proporcional al espacio que ocupan, no su precio de mercado.

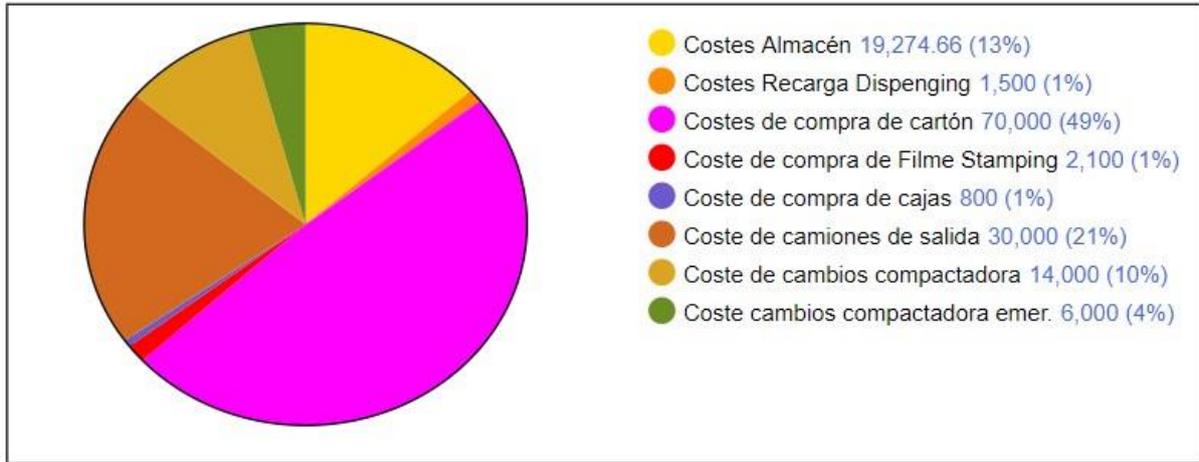


Figura 6.12. Costes logísticos tras la optimización.

Se puede suponer que la aplicación de esta estrategia implica el crecimiento de los gastos en la manutención del personal. Concretamente, la planta pasa de desviar 27.757,47 euros a cubrir los salarios de los empleados 34.376,7 euros. Un aumento del 23,85% del valor inicial.

En la figura 6.13 se aprecia la distribución de estos costes de personal. Como es de esperar, en el gráfico se refleja qué secciones han percibido el aumento en el personal que las compone.

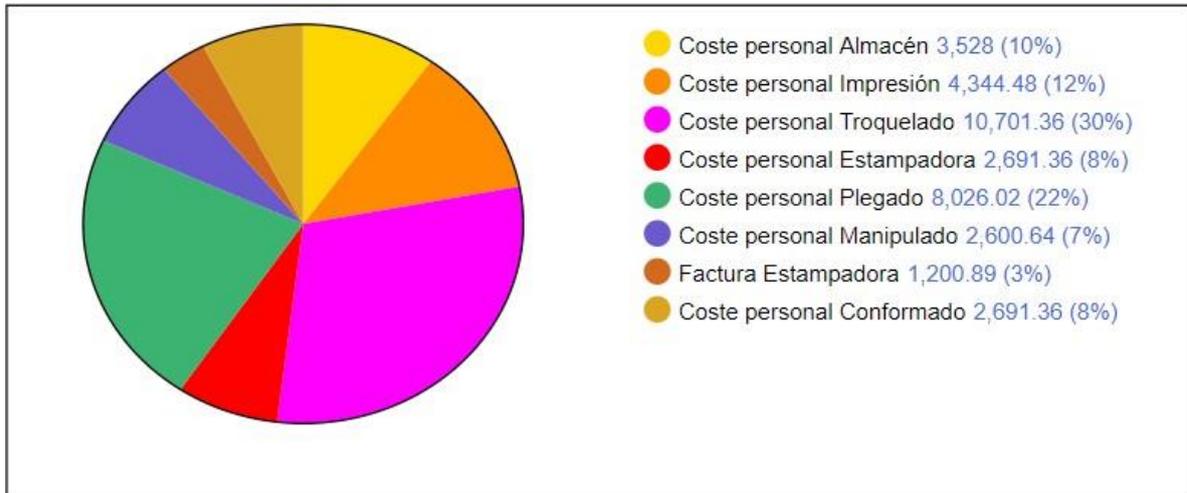


Figura 6.13. Costes de personal tras la optimización.

Finalmente, y como se comentó a lo largo del capítulo 5, el coste en energía eléctrica de las máquinas es directamente proporcional a la velocidad de funcionamiento de éstas. En consecuencia, en la figura 6.14 se refleja un aumento en los costes eléctricos de funcionamiento en las troqueladoras 1 y 5, así como en la estampadora.

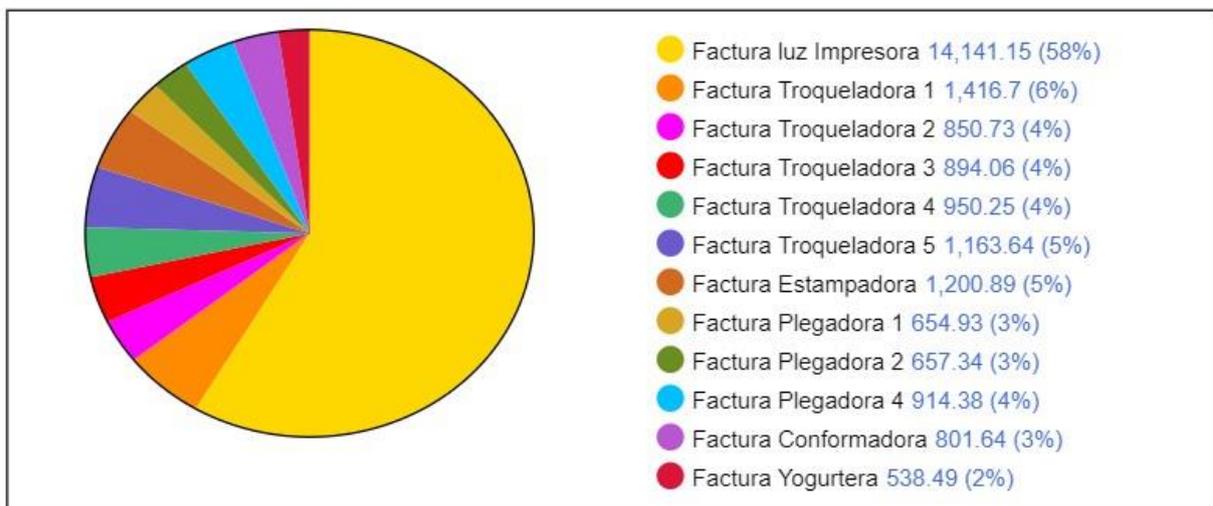


Figura 6.14. Distribución de la factura de la luz tras la optimización.

6.3 Estudio del rendimiento de la planta buscando producir al mayor ritmo posible

El último caso de estudio para buscar mejorar el modelo será, como indica el título del apartado, el escenario en el que la fábrica produce al mayor ritmo logísticamente posible. Es

decir, partiendo de que la materia prima recibida a lo largo de la semana suma un total de 2.590.000 pliegos, se examinará la viabilidad económica de un plan de producción en el que se busque imprimir un total de 2.300.000 en una semana.

Se comentó en el capítulo 5.3.3 como especialmente en la sección de troquelado, los tiempos de preparación dilatados afectaban a la velocidad media de producción en la planta. Teniendo esto en cuenta, se seleccionará un número bajo de órdenes de trabajo, 40, de pedidos distintos a fabricar. Así, se obtiene un tamaño medio de 57.500 pliegos por orden.

Teniendo en cuenta el principio del nivelado de la producción mediante el cual se rige el funcionamiento de la planta, se espera un aumento en la demanda de WIP impreso por parte de la sección de troquelado. Para poder abastecer todas las máquinas, se decide contratar un impresor más, mejorando así el ritmo de impresión de pliegos. El resultado obtenido se puede ver reflejado en la figura 6.15:

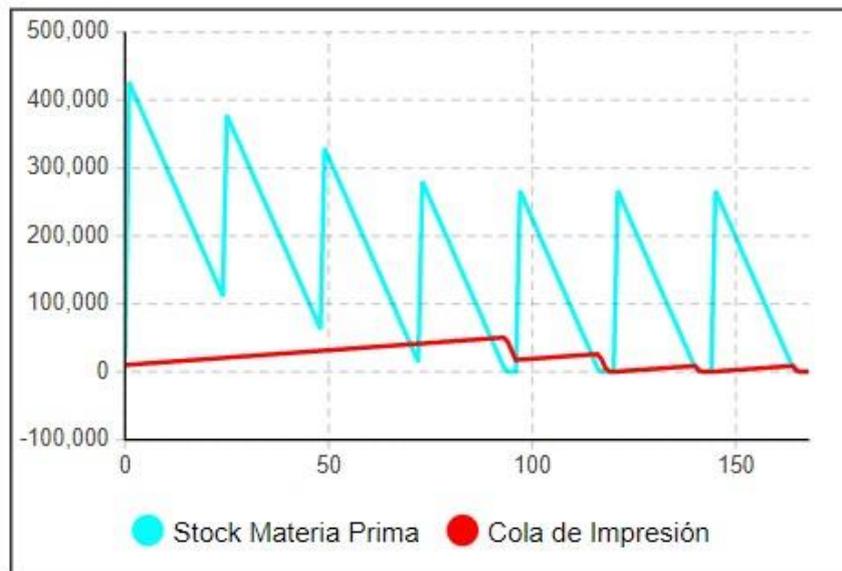


Figura 6.15. Evolución del stock de la entrada a la impresora tras la optimización.

Se aprecia en la evolución del stock de cola de impresión como se ha alcanzado la minimización de stock a lo largo de toda la simulación, alcanzando un máximo de 50.000 pliegos almacenados simultáneamente, frente al pico de 400.000 en la simulación inicial (ver figura 5.23).

Como es lógico, el aumento del ritmo de impresión provoca un crecimiento desmedido de las existencias de la variable de stock *WIP_ Impresión*, por lo tanto, es necesario redistribuir estos nuevos recursos disponibles entre todas las máquinas de la sección de troquelado.



Figura 6.16. Stock de WIP de impresión previo a la distribución de los nuevos recursos.

Como se puede comprobar a simple vista en el gráfico de la figura 6.16, se llegan a almacenar hasta 700.000 pliegos impresos, los cuales no se llegan a consumir en la simulación.

A la hora de decidir como distribuir este excedente de recursos, se ha de tener en cuenta los puntos observados en el apartado 5.5 con respecto a los ingresos generados y los pallets enviados.

Por un lado, se observó en la simulación inicial, y en las optimizaciones de los apartados 6.1 y 6.2, la existencia de un punto fuerte en la venta de producto premium, ya que pequeños volúmenes generaban importantes ingresos. Para capitalizar en esta ventaja, en primer lugar, se mejorará la disponibilidad de WIP en esta línea, pasando de destinar un 20% a un 25% de los recursos pliegos salidos de la impresora; además, se ampliará plantilla de toda la línea Premium: se trabajará ahora con tres operarios en la troqueladora y 3 estampadores.

En sentido opuesto, durante la simulación del modelo inicial, se apreció como la línea de producto manipulado no era capaz de cubrir la demanda impuesta por el ritmo de salida de

camiones y la distribución de producto terminado. Por este motivo, aunque se ha decidido mantener la fracción de recursos asignada a esta línea en el 30% inicial, se ha decidido trabajar en la troqueladora 1 con un total de 3 operarios.

Finalmente, las troqueladoras 3 y 4, asignadas a la línea de plegado, captarán el 35% de los pliegos impresos en planta.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de estas medidas se reflejan en las siguientes dos figuras.

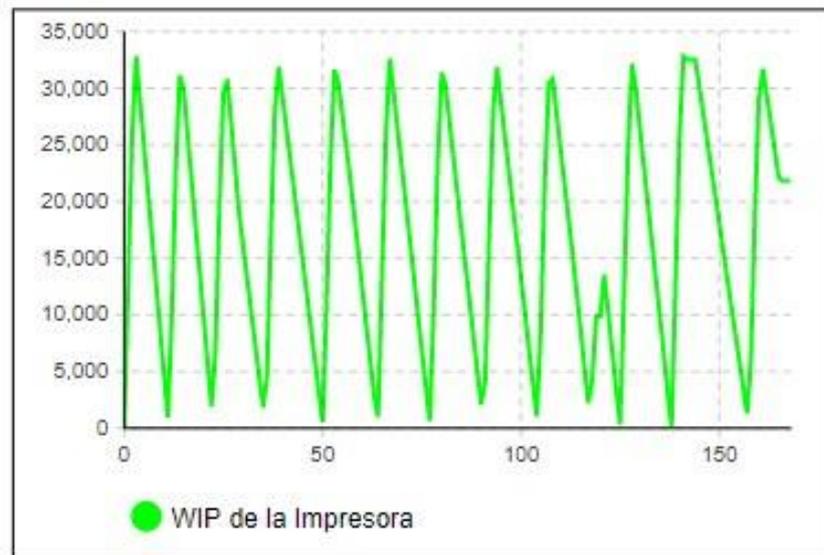


Figura 6.17. Stock de WIP de impresión tras la optimización.

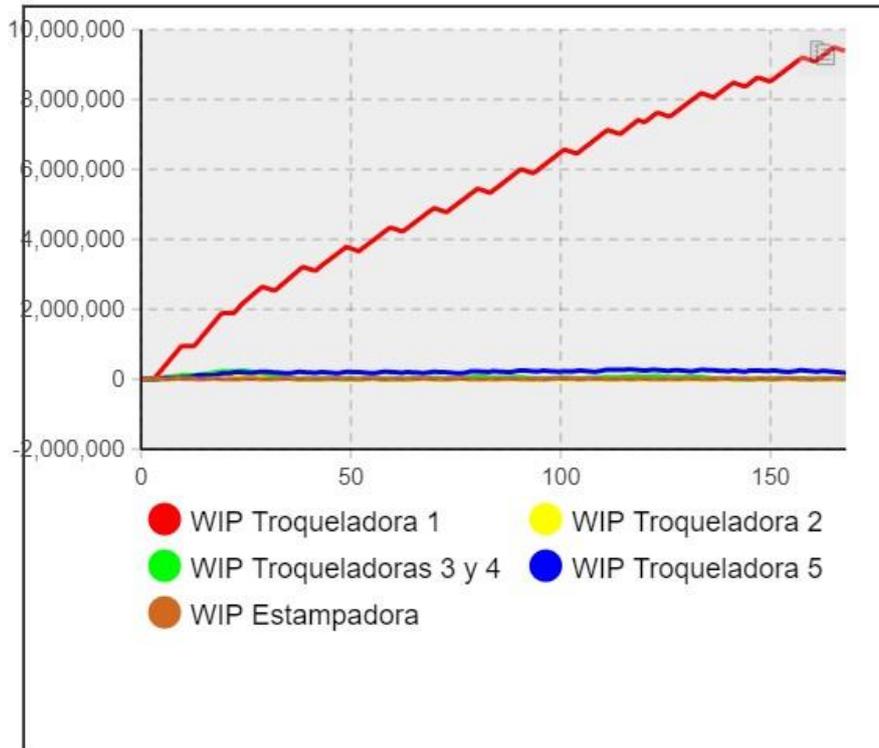


Figura 6.18. WIPs de la sección de Troquelado tras la distribución de los recursos de Impresión.

Claramente apreciable es la mejora de la figura 6.16 a la 6.17; se ha conseguido pasar de un stock de WIP de la impresora que se acumula hasta los 700.000 pliegos a oscilar con una media aproximada de 15.500 pliegos en reserva. Como se verá a continuación, la distribución del resto de los medios disponibles hace que las paradas por ausencia de WIP que se reflejan en la figura 6.17 no afectan en gran medida al rendimiento final de la planta.

Por otro lado, es fácilmente observable como la redistribución de las prioridades entre las distintas máquinas ha llevado a un desajuste en el ritmo de producción de las líneas de producto manipulado. Se intentará remediar este efecto en la siguiente sección: finishing.

El resto de WIPs a la salida de las troqueladoras mantiene niveles bajos, por lo que no serán necesarios aplicar tantos ajustes en sus respectivas cadenas.

Como se ha mencionado en los anteriores párrafos, se va a ampliar el personal en la yogurtera a dos manipuladores, así se pretende tener más pallets de producto terminado disponibles a la salida de fábrica, y reducir stocks de producto semiterminado.

Paralelamente y para acompañar la expansión del resto de máquinas en la cadena de producto premium, se ha incorporado un operario más a la plegadora 1, sumando un total de 3.

Finalmente, los resultados de estas medidas se aprecian en las figuras 6.18 y 6.19:

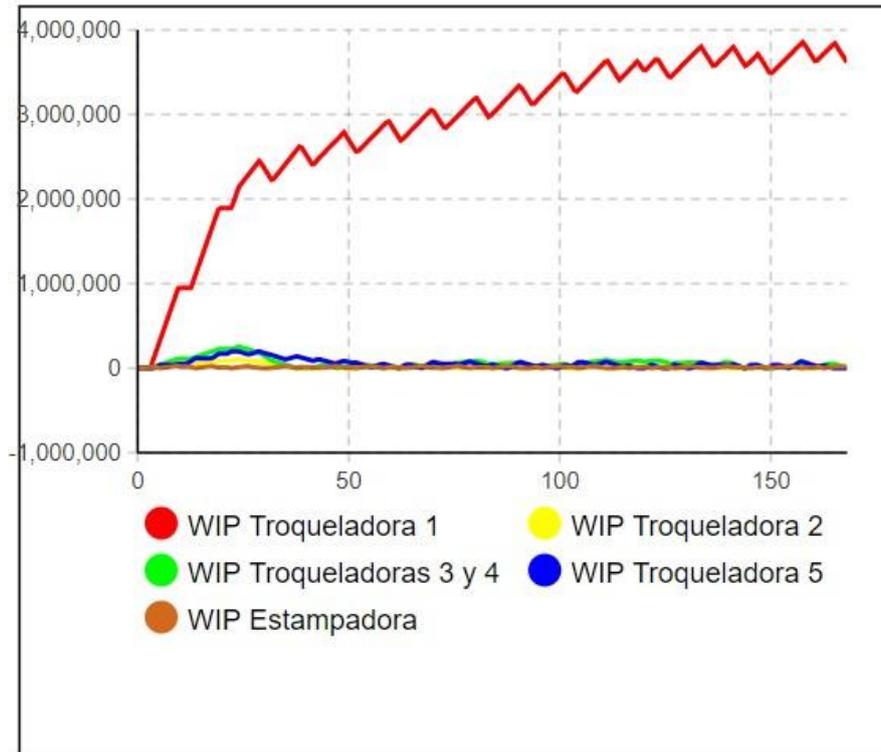


Figura 6.18. WIPs de la sección de Troquelado tras la optimización.

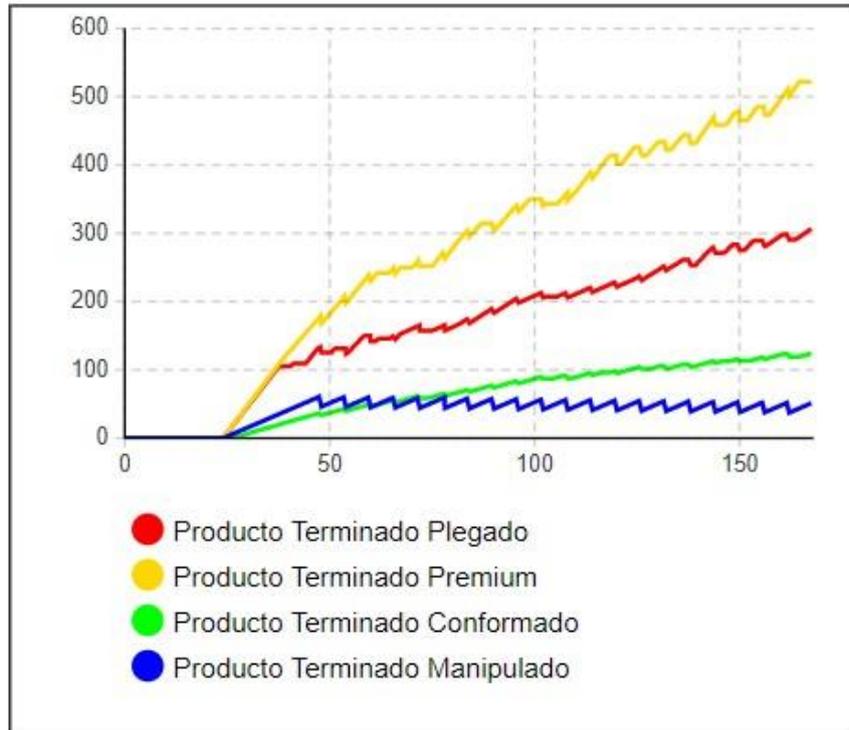


Figura 6.19. Stocks de Producto terminado tras aplicar las mejoras de producción en la planta.

Ampliando el número de operarios en la yogurtera se consigue reducir considerablemente la acumulación de WIP de la troqueladora 1, en más de un 50% (Figura 6.18).

Por otro lado, en la figura 6.19 se ve cómo para las condiciones de salida de producto terminado de la simulación inicial, se genera un superávit de producto plegado y premium. Esta situación era de esperar desde el momento en el que se decidió “rio arriba” aumentar la producción en planta.

Para aprovechar este incremento en los stocks de producto, se ampliará el número de camiones que extraerán producto de la fábrica y lo llevarán a los distintos clientes. Ahora se trabajará con una flota de 35 camiones.

Paralelamente, se reorganizará la proporción de salida de los distintos productos, pasando a cargar en cada camión 20 pallets de producto Premium (50%), 12 de producto plegado (30%), y 4 tanto de conformado como de manipulado (10% cada uno).

De este modo, se obtiene la gráfica de productos terminados mostrada en la figura 6.20:

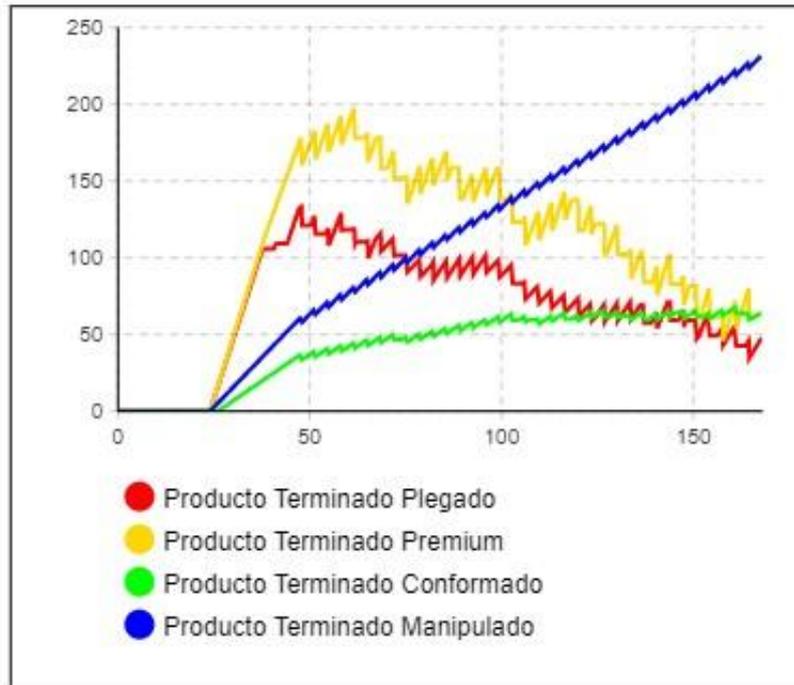


Figura 6.20. Evolución de los Stocks de Producto Terminado tras la Optimización.

Vista la gráfica de la figura 6.20, se puede concluir que la planta consigue con éxito abastecer todos los camiones durante la simulación del modelo. Por otro lado, se ha conseguido, pese a no poder usar la herramienta de optimización de Anylogic en este caso en particular, mantener unas existencias de producto terminado estables, a excepción del producto manipulado. Así, se considera que la optimización del almacenamiento de recursos ha tenido un éxito moderado.

Una vez terminado el recorrido de optimización de la planta, se pasará a evaluar el rendimiento de ésta a lo largo de la simulación.

En primer lugar, es obligatorio comentar que económicamente, la optimización ha sido un rotundo éxito. Se ha pasado de generar 89.800 euros en pérdidas, a obtener unas ganancias de 91.313,48 euros, es decir, un incremento en los beneficios en planta del 201,64%.

Ahora se estudiará en detalle el desglose económico de este resultado.

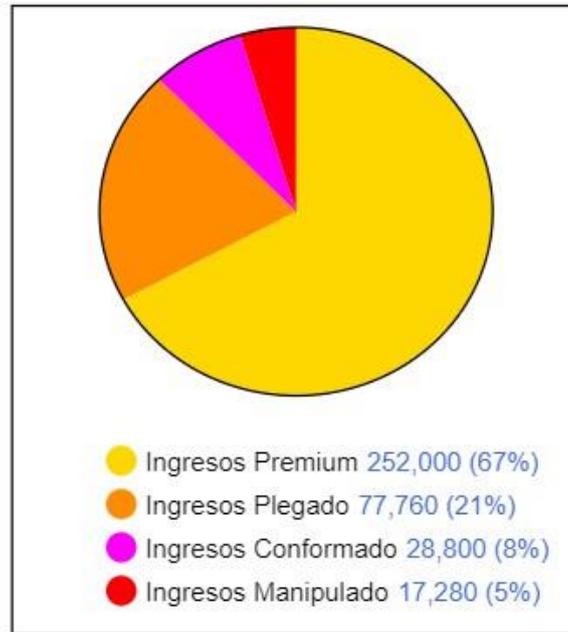


Figura 6.21. Diagrama por sectores de los ingresos de la planta tras la optimización.

Apreciable en la figura 6.21 es el resultado de la estrategia de focalizar la salida de producto terminado en la gama Premium. Con un total de 720 pallets enviados, este producto genera el 67% de los ingresos totales de esta planta.

En segundo lugar, habiéndose enviado a los clientes un total de 432 pallets durante la semana de la simulación del modelo, encontramos el producto plegado, gracias al cual se han facturado 77.760 euros.

En total, se ha conseguido extraer de la fábrica un total de 1.440 pallets, suponiendo una mejora del 224,32% con respecto de las condiciones iniciales del modelo.

Por supuesto, es necesario evaluar en qué medida las mejoras incluidas en esta ruta de optimización han afectado a los distintos costes de funcionamiento de la planta. A continuación, se recorrerán los distintos grupos de gastos de la fábrica.

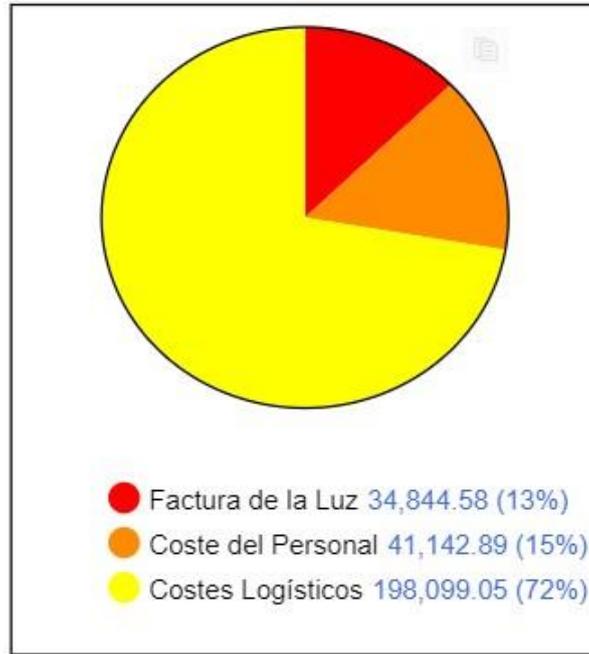


Figura 6.22. Diagrama por sectores de la distribución de los costes de funcionamiento de la planta tras la optimización.

Como era de esperar, en la figura 6.22 se refleja el aumento generalizado en los costes de operación de la fábrica. Aunque las proporciones se han mantenido, los tres grupos de costes, la luz, el personal y los costes logísticos, han aumentado en su valor. Respectivamente, los incrementos han sido del 50,48%, 48,22% y 48%.



Figura 6.23. Costes logísticos tras la optimización.

Una vez observada la figura 6.23, destaca el aumento de los costes de mantenimiento de la flota de camiones; al ampliar dicha flota, se asume un incremento del 75% en el precio de esta.

Por otro lado, el espacio existente en el contenedor de la compactadora no ha sido capaz de asumir el incremento drástico en los residuos generados en planta, como consecuencia de la mejora en el ritmo de producción, llegando a ser necesarios tres recambios no programados del contenedor de la compactadora.



Figura 6.24. Evolución del contenedor de la compactadora tras la optimización.

Finalmente, la existencia de mayores cantidades de productos semiterminados y terminados en planta incrementa el coste de almacenamiento en un 87,42%.

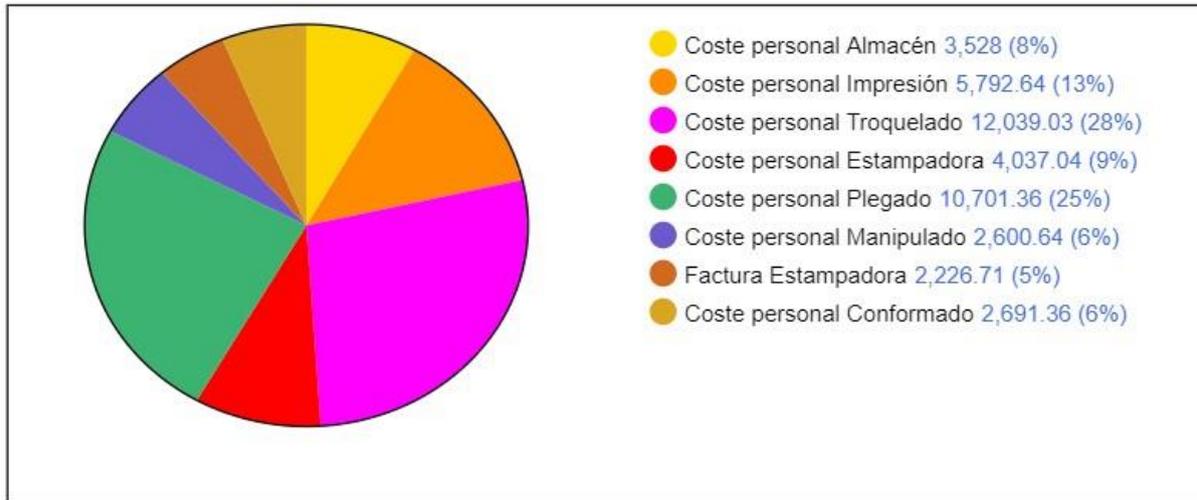


Figura 6.25. Costes de personal tras la optimización.

Como es de esperar, y se refleja en la figura 6.25, el aumento de la plantilla conlleva asumir el crecimiento de los gastos en las secciones en las que se incorpora el personal nuevo. Así, se observa como el personal asignado a Impresión, Troquelado, a la estampadora, y a la sección de Finishing (Manipulado y Plegado) ha visto aumentar la partida de los costes destinados a su manutención con respecto a la simulación inicial.

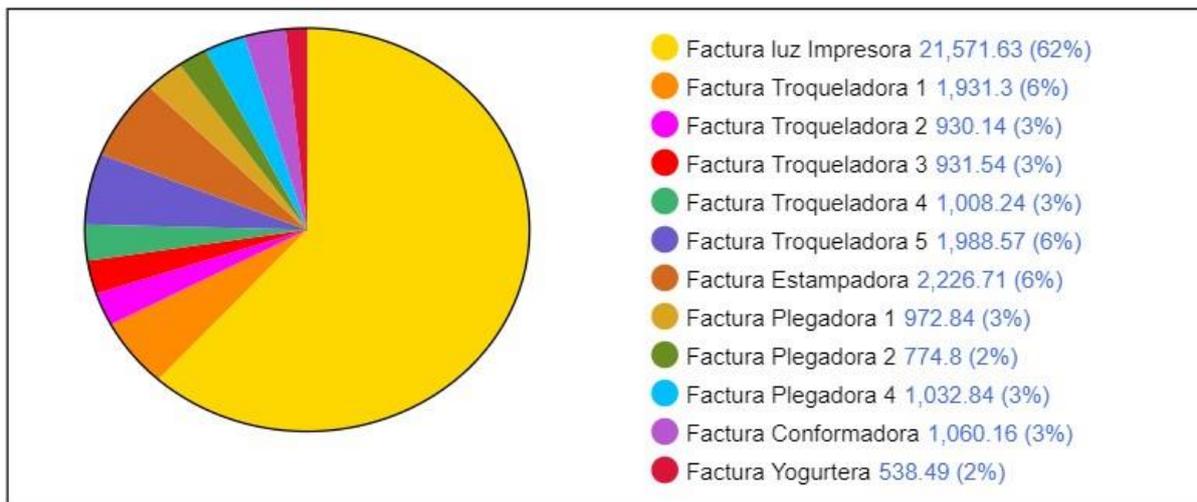


Figura 6.26. Distribución de la factura de la luz tras la optimización.

De forma similar, todas las máquinas, a excepción de la yogurtera, han visto incrementado su consumo eléctrico, y, en consecuencia, su factura eléctrica. Se puede observar, en el crecimiento porcentual del consumo de las máquinas de la línea premium (Estampadora, Troqueladora 5 y Plegadora 1), cómo se refleja la prioridad que se ha decidido dar a esta línea de producto.

7. Conclusiones

Una vez finalizado el estudio, es hora de evaluar el punto en el que se encuentra el trabajo, en función de los objetivos redactados en el capítulo 1.2:

- El segundo objetivo se centraba en el modelado y optimización de un sistema básico. A lo largo del capítulo 4, se emplea la construcción de este modelo como una toma de contacto con el programa empleado en este trabajo. Aunque se observa una gran limitación tanto en el diseño como en la ejecución de este sistema, esta introducción al modelado con Anylogic constituye una cimentación firme sobre el que trabajar en el modelo de la planta de envases de cartón.
- Del mismo modo, más adelante en el capítulo 4 se estudia cómo este sistema básico se comporta, y en especial, cómo reacciona a variaciones en su parámetro de entrada, el personal que trabaja en la fábrica. Empleando la herramienta de optimización de Anylogic, se encuentra el número de trabajadores en planta que proporciona el mejor resultado económico. Así, se satisface el objetivo 3.
- Los objetivos 4,5 y 6 giran en torno al modelado y optimización de la Fábrica de envases de cartón. En primer lugar, el hecho de que el autor haya podido realizar prácticas en la empresa Graphic Packaging International, fábrica en la que se basa el trabajo, ha supuesto una gran ventaja a la hora de construir el modelo. El poder observar “en vivo”, y participar en la organización del proceso productivo de la fábrica, facilita representar “sobre el papel” un caso de estudio real de aplicación de Ingeniería de organización industrial.

La oportunidad de haber podido trabajar en esta empresa se muestra de nuevo al observar los resultados de la primera simulación. Pese a llevar dos meses de prácticas en el momento de la ejecución por vez primera del modelo, rápidamente se identificaron claras similitudes con su contraparte real, como son el cuello de botella en la sección de troquelado, o la acumulación de WIP de manipulado.

Finalmente, el hecho de saber desde el inicio de la construcción del modelo cuáles son los puntos fuertes y débiles del funcionamiento de la planta facilitó enormemente la selección de estrategias a desarrollar para optimizar el proceso.

- Los objetivos 6 y 1 se enfocan en la viabilidad de Anylogic como herramienta de modelado en particular, y de la Dinámica de Sistemas como recurso en la Ingeniería Industrial en general. Como se observó, en especial en los capítulos 5 y 6, mediante Anylogic se construye un modelo con un buen grado de fiabilidad de una planta industrial. Además, es posible optimizar hasta cierto grado el sistema mediante el uso de la herramienta de optimización que aporta el programa.

Por extensión, es acertado concluir que la Dinámica de Sistemas, el principio teórico sobre el que se apoya este Trabajo de Fin de Grado, es una herramienta que permite al ingeniero estudiar los distintos sistemas productivos que se puede encontrar a lo largo de su carrera profesional.

8. Observaciones del Autor

Quiero dedicar este último capítulo de mi trabajo a recorrer el viaje que la redacción de este TFG ha supuesto, ya que lo he desarrollado a la vez que realizaba mis prácticas.

Mi primera semana tras llegar a GPI fue, como para todos, agobiante. Al llegar allí, estaba centrado en entender lo más rápido y mejor posible cómo funcionaba cada parte de la planta, para poder plasmarlo en un modelo que ni siquiera había empezado.

Pocos días después, conseguí encontrar mi punto de partida, esto es, la línea de producción básica. Algo tan sencillo como saber dónde va qué y en qué orden se disponen las cadenas productivas, dependiendo de qué producto se va a fabricar.

Construido el esqueleto de este modelo, pasé tiempo entendiendo cómo funciona cada parte de la planta. Durante unos cuantos días, pedí a los distintos jefes de sección que me explicaran el funcionamiento en concreto de las máquinas en las que trabajan todos los días. Aunque no me ha sido posible reflejar todos los puntos que me detallaban, todo este tiempo me sirvió para entender cómo funciona la fábrica en la que trabajo.

Y es que la necesidad entender cómo funciona tu alrededor es, para mí, lo que hace a alguien ingeniero. Una vez llegué a esta conclusión, no podía evitar disfrutar al construir mi modelo. Cada vez que ocurría una situación extraordinaria en planta pensaba: “¿Cómo no he incluido esto en mi modelo?”. Cada vez que me sentaba a terminarlo, acababa incluyendo algún punto, alguna condición más. Lo mejor es que sé que este entusiasmo lo transmitía; mi tutor, Saúl, me llegó a comentar: “Me da la sensación de que lo estás, de alguna manera, disfrutando. [...] Da gusto”. Al final, tuve que dejar de añadir mejoras al modelo, para poder terminar con mi trabajo.

Finalmente, he tenido que terminar mi carrera, y mi Trabajo de Fin de Grado, para saber que no me he equivocado al elegir mi camino. Por primera vez, y seguro que no por última, me he sentido como un auténtico Ingeniero Industrial.

9. Bibliografía

- *Dinámica de Sistemas*. Javier Aracil, Francisco Gordillo (1997).
- *The Big Book of Simulation Modelling*. Andrei Borshchev, Ilya Grigoryev (2014).