



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado
CURSO 2017/18

*OPTIMIZACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN DE UN PROCESO
DE FABRICACIÓN DE UNA EMPRESA MADERERA MEDIANTE
SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

ALUMNO

Santiago José Tutor Roca

TUTOR

CAT. Alejandro García Del Valle

FECHA

JULIO 2018

Resumen

Optimización de la tasa de producción de un proceso de fabricación de una empresa maderera mediante simulación de eventos discretos.

En el presente trabajo se lleva a cabo el estudio y la simulación de un proceso de fabricación de una empresa maderera mediante simulación de eventos discretos (DES). Para ello y, en primer lugar, se ha diseñado el diagrama de flujo correspondiente al proceso de fabricación. A continuación, se ha realizado una recopilación de los diversos datos y parámetros que caracterizan el sistema, introduciéndolos posteriormente en un software de simulación de eventos discretos, *ExtendSim*. Una vez implementado el modelo en dicho programa, se desarrollan y se estudian los distintos escenarios para determinar cuál de ellos es más productivo además de detectar y aliviar los cuellos de botella del proceso, aumentando, por tanto, la productividad final. Por último, para la consecución de tal fin, se han efectuado experimentaciones con los diferentes modelos obtenidos, así como un análisis de los resultados de los mismos. Se trata de un caso real en colaboración con la empresa *Asimov Efficiency S.L.*

**Palabras clave: simulación, proceso de fabricación, empresa maderera, eventos discretos, diagrama de proceso, ExtendSim, modelo, escenario, cuello de botella, tasa de producción, optimización, Asimov Efficiency S.L.*

Resumo

Optimización da taxa de produción dun proceso de fabricación dunha empresa madeireira mediante simulación de eventos discretos.

No presente traballo lévase a cabo o estudo e a simulación dun proceso de fabricación dunha empresa madeireira mediante simulación de eventos discretos (DES). Para iso e, en primeiro lugar, diseñouse o diagrama de fluxo correspondente ao proceso de fabricación. A continuación, realizouse unha recopilación dos diversos datos e parámetros que caracterizan o sistema, introducíndoos posteriormente nun software de simulación de eventos discretos, *ExtendSim*. Unha vez implementado o modelo en dito programa, desenvólvense e estúdanse os distintos escenarios para determinar cal deles é o máis productivo ademáis de detectar e aliviar os pescozos de botella do proceso, aumentando, por tanto, a produtividade final. Por último, para a consecución de tal fin, efectuáronse experimentacións cós diferentes modelos obtidos, así coma unha análise dos resultados dos mesmos. Trátase dun caso real en colaboración ca empresa *Asimov Efficiency S.L.*

**Palabras chave: simulación, proceso de fabricación, empresa madeireira, eventos discretos, diagrama de proceso, ExtendSim, modelo, escenario, pescozo de botella, taxa de produción, optimización, Asimov Efficiency S.L.*

Abstract

Throughput optimization of a manufacturing process in the timber industry using discrete event simulation.

Within the following bachelor thesis, a study and simulation of a manufacturing process in the timber industry using discrete event simulation (DES) is carried out. For this purpose and, in the first place, the flow diagram corresponding to the manufacturing process has been designed. Next, a compilation of the various data and parameters that characterize the system has been made, showing them later in a software simulation of discrete events, *ExtendSim*. Once the model was implemented in said program, the different scenarios were made and studied to determine which of them was more productive besides detecting and relieving the bottlenecks in the process, in order to increase the final productivity. Finally, to achieve this goal, experiments have been done with the different models obtained, as well as an analysis of their results. It is a real case in collaboration with the company *Asimov Efficiency S.L.*

**Keywords: simulation, manufacturing process, timber industry, discrete events, process diagram, ExtendSim, model, scenario, bottleneck, throughput, optimization, Asimov Efficiency S.L.*



extendsim®



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2017/18**

*OPTIMIZACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN DE UN PROCESO
DE FABRICACIÓN DE UNA EMPRESA MADERERA MEDIANTE
SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Documento

MEMORIA

Índice de contenido:

Capítulo 1. Introducción y objetivo del proyecto.....	13
1.1. Introducción:.....	13
1.2. Objetivo del proyecto:	14
Capítulo 2. Antecedentes	15
2.1. Contexto actual:.....	15
2.2. Historia de la simulación:.....	18
2.3. Simulación de procesos industriales:.....	22
2.3.1. Sistemas y modelos de simulación:	23
2.3.2. Etapas de la simulación:.....	27
2.3.3. Aplicaciones:	30
2.3.4. ¿Por qué simular?	31
2.3.5. Ventajas e inconvenientes de la simulación:	35
2.3.6. ¿Cuándo la simulación es o no apropiada?.....	41
2.3.7. Lenguajes de simulación:	42
2.3.8. Simulación de eventos discretos:.....	44
2.4. ExtendSim como herramienta de simulación:.....	47
2.5. La industria maderera en Galicia:	49
2.5.1. Productos de la cadena forestal:	50
2.5.2. Cadena de valor:	54
Capítulo 4. Simulación de escenarios y optimización	94
4.1. Resultados del modelo actual.....	94
4.2. Optimización:.....	97
Capítulo 5. Conclusiones	101
Capítulo 6. Futuras líneas de investigación	102
Referencias bibliográficas	103

Índice de figuras:

<i>Figura 1: Logo del software de simulación ExtendSim. (Fuente: http://www.extendsim.com/)</i>	14
<i>Figura 2: Evolución de la industria. (Fuente: Energy Solutions)</i>	15
<i>Figura 3: Los 9 pilares de la Cuarta Revolución Industrial. (Fuente: BCG)</i>	18
<i>Figura 4: Evolución histórica de la simulación. (Fuente: Elaboración propia)</i>	21
<i>Figura 5: Etapas en la explotación de modelos matemáticos. (Fuente: Elaboración propia)</i>	25
<i>Figura 6: Etapas de un estudio de simulación. (Fuente: Elaboración propia)</i>	30
<i>Figura 7: Interfaz gráfica de ExtendSim. (Fuente: http://www.gii.udc.es/)</i>	48
<i>Figura 8: Distribución geográfica de las empresas del sector forestal en Galicia. (Fuente: ARDÁN)</i>	49
<i>Figura 9: Distribución por cadena de valor de las empresas del sector forestal en Galicia. (Fuente: ARDÁN)</i>	50
<i>Figura 10: Distribución por volumen de facturación de las empresas del sector forestal en Galicia. (Fuente: ARDÁN)</i>	50
<i>Figura 11: Evolución de las cortas de madera en los montes gallegos. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)</i>	51
<i>Figura 12: Distribución territorial de las empresas transformadoras de la madera en Galicia. (Fuente: IGE)</i>	52
<i>Figura 13: Evolución de la facturación del sector de la madera. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)</i>	52
<i>Figura 14: Exportaciones de productos de madera y muebles en Galicia. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)</i>	53
<i>Figura 15: Porcentaje de industria forestal sobre el total de industrias asentadas. (Fuente: Instituto Galego de Estadística)</i>	53
<i>Figura 16: Sistema de certificación forestal PEFC. (Fuente: http://www.pefc.es/)</i>	54
<i>Figura 17: Cadena de valor de la madera a nivel gallego. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)</i>	55
<i>Figura 18: Cadena de valor del sector forestal a nivel gallego. (Fuente: Instituto Galego de Estadística)</i>	55

<i>Figura 19: Ubicación y emplazamiento del lugar de trabajo. (Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 20: Zona de corte. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 21: Zona de secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 22: Buffer de troncos de 4 y 2 metros a la entrada. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 23: Introducción de troncos por medio de la paleadora en la entrada principal. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24: Descortezadora de troncos. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25: Introducción de troncos al sistema en la entrada secundaria de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 26: Buffer de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 27: Máquina serradora de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 28: Conveyer para el transporte de leña procedente de la sierra de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 29: Conveyer para el transporte de tablonos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 30: Troceadora de tablonos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 31: Conveyer para el transporte de tablas de 2 metros hasta el buffer de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 32: Tándem. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 33: Productos de la astilladora transportados hacia fuera de la línea de corte. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 34: Máquina serradora de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 35: Conveyer para el transporte de tablas de 2 metros hasta el buffer de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 36: Canteadora. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 37: Conveyer para el transporte de tablas de 2 metros hasta la retestadora. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 38: Retestadora. (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>68</i>

<i>Figura 39: Buzón donde se almacena la tabla de 2 metros hasta su posterior secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia)</i>	69
<i>Figura 40: Buzón donde se almacena la pavia hasta su posterior secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia)</i>	69
<i>Figura 41: Apilador de piezas de madera. (Fuente: Elaboración propia)</i>	70
<i>Figura 42: Buffer externo de pavia. (Fuente: Elaboración propia)</i>	70
<i>Figura 43: Buffer externo de tabla de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	70
<i>Figura 44: Almacén. (Fuente: Elaboración propia)</i>	71
<i>Figura 45: Separadores de madera para el apilado. (Fuente: Elaboración propia)</i>	71
<i>Figura 46: Introducción de piezas previamente apiladas en el secadero. (Fuente: Elaboración propia)</i>	71
<i>Figura 47: Almacén de productos en stock. (Fuente: Elaboración propia)</i>	72
<i>Figura 48: Función de densidad de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	73
<i>Figura 49: Ajuste de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	73
<i>Figura 50: Gráfico Q-Q de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	74
<i>Figura 51: Ajuste de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	74
<i>Figura 52: Función de densidad de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	75
<i>Figura 53: Gráfico Q-Q de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	75
<i>Figura 54: Ajuste de los tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y del tablón de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	76
<i>Figura 55: Ajuste de los tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	77
<i>Figura 56: Ajuste de los tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y de la pavia. (Fuente: Elaboración propia)</i>	78

<i>Figura 57: Ajuste de los tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	79
<i>Figura 58: Ajuste de los tiempos de ciclo de la troceadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	80
<i>Figura 59: Ajuste de los tiempos de ciclo de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	81
<i>Figura 60: Ajuste de los tiempos de ciclo de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	82
<i>Figura 61: Llegada de troncos al sistema. (Fuente: Elaboración propia)</i>	85
<i>Figura 62: Bloque "Random Number" mediante el cual se generará un número aleatorio. (Fuente: Elaboración propia)</i>	85
<i>Figura 63: Ecuaciones que reúnen la restricción de introducir troncos por una de las entradas. (Fuente: Elaboración propia)</i>	86
<i>Figura 64: Proceso de introducción de troncos a través de la entrada principal. (Fuente: Elaboración propia)</i>	86
<i>Figura 65: Bloque "Get" mediante el cual se asignarán los atributos de longitud y diámetro. (Fuente: Elaboración propia)</i>	87
<i>Figura 66: Caracterización de la probabilidad de parada en la descortezadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	87
<i>Figura 67: Conjunto de ecuaciones que restringen la entrada de troncos a los buffers. (Fuente: Elaboración propia)</i>	87
<i>Figura 68: Recuento de la longitud total ocupada por los troncos en un instante determinado. (Fuente: Elaboración propia)</i>	88
<i>Figura 69: Proceso de obtención de distintas piezas a partir de las máquinas serradoras. (Fuente: Elaboración propia)</i>	88
<i>Figura 70: Ecuaciones que impiden cortar un tronco hasta que no salgan las piezas anteriores. (Fuente: Elaboración propia)</i>	88
<i>Figura 71: Dirección de las piezas de 2 metros según su tipo. (Fuente: Elaboración propia)</i>	89
<i>Figura 72: Dirección de las piezas de 4 metros según su tipo. (Fuente: Elaboración propia)</i>	89
<i>Figura 73: Camino seguido por la leña antes de llegar a la astilladora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	90
<i>Figura 74: Influencia de las paradas del tándem en la troceadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	90

<i>Figura 75: Creación del atributo “ancho” para emplearlo en el conveyor siguiente. (Fuente: Elaboración Propia)</i>	90
<i>Figura 76: Proceso seguido por las tablas de 2 metros que confluyen en la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	90
<i>Figura 77: Introducción de piezas de 2 metros en la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	91
<i>Figura 78: Circulación de la leña procedente de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	91
<i>Figura 79: Contabilización del número de piezas totales producidas. (Fuente: Elaboración propia)</i> ...	91
<i>Figura 80: Diagrama de proceso de la línea de corte. (Fuente: Elaboración propia)</i>	92
<i>Figura 81: Diagrama de proceso de la zona de secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia)</i>	92
<i>Figura 82: Vista 3D de la zona de corte del aserradero. (Fuente: Elaboración propia a partir de Asimov Efficiency)</i>	93
<i>Figura 83: Utilización del buffer de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	94
<i>Figura 84: Utilización del buffer de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	94
<i>Figura 85: Utilización de la máquina serradora que opera con troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	95
<i>Figura 86: Utilización de la máquina serradora que opera con troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	95
<i>Figura 87: Utilización del tándem. (Fuente: Elaboración propia)</i>	96
<i>Figura 88: Utilización de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	96
<i>Figura 89: Indicación del tiempo real de simulación. (Fuente: Elaboración propia)</i>	97
<i>Figura 90: Optimización de la frecuencia de llegada de troncos a cada una de las entradas. (Fuente: Elaboración propia)</i>	98
<i>Figura 91: Luz roja que indica una señal de alarma debido a un atasco en el sistema. (Fuente: Elaboración propia)</i>	98
<i>Figura 93: Problema típico donde entran dos troncos a la vez, cuando solo uno puede entrar. (Fuente: Elaboración propia)</i>	99
<i>Figura 92: Operario de la canteadora mal situado solucionando problema en el tándem. (Fuente: elaboración propia)</i>	99

Índice de tablas:

<i>Tabla 1: Tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	73
<i>Tabla 2: Tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	74
<i>Tabla 3: Tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y del tablón de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	76
<i>Tabla 4: Tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	77
<i>Tabla 5: Tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y de la pavia. (Fuente: Elaboración propia)</i>	78
<i>Tabla 6: Tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)</i>	79
<i>Tabla 7: Tiempos de ciclo de la troceadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	80
<i>Tabla 8: Tiempos de ciclo de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	81
<i>Tabla 9: Tiempos de ciclo de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	82
<i>Tabla 10: Tiempos de ciclo, velocidades y capacidades de otras actividades. (Fuente: Elaboración propia)</i>	83
<i>Tabla 11: Tiempos de ciclo, longitudes, velocidades y capacidades de los conveyors. (Fuente: Elaboración propia)</i>	83
<i>Tabla 12: Tamaños y longitudes de los buffers. (Fuente: Elaboración propia)</i>	83
<i>Tabla 13: Frecuencia de llegada de troncos en cada una de las entradas del sistema. (Fuente: Elaboración propia)</i>	83
<i>Tabla 14: Tiempos de ida y vuelta y capacidad de la paleadora. (Fuente: Elaboración propia)</i>	84
<i>Tabla 15: Probabilidad y frecuencia de parada en algunas actividades. (Fuente: Elaboración propia)</i>	84
<i>Tabla 16: Número y distribución de trabajadores en el aserradero. (Fuente: Elaboración propia)</i>	84

Capítulo 1. Introducción y objetivo del proyecto

1.1. Introducción:

En la actualidad, la sociedad mundial transita por un proceso de cambio continuo, el cual es inherente a la naturaleza humana. De hecho, hay que admitir que no hay nada más permanente que el cambio; y negarlo, sería desconocer la capacidad del ser humano para progresar y crear nuevo conocimiento. Así, ese nuevo acervo que se va generando en todos los campos del saber es lo que lleva a la especie humana, mediante la aplicación práctica, a impulsar múltiples transformaciones.

Este continuo cambio, que se lleva a cabo en todos los ámbitos de nuestra vida, tanto personal como profesional, se caracteriza por la globalización de las operaciones de las empresas y por el uso intensivo de las tecnologías de la información desarrolladas por la industria, como causa y a la vez consecuencia de dicha globalización.

En este contexto, las empresas están obligadas a la introducción de nuevos productos y servicios que le permitan atraer nuevos clientes y mejorar la calidad del servicio a los actuales. Para ello, es fundamental que su sistema productivo se base en la flexibilidad y en la adaptabilidad y que en él se incorporen los requerimientos que el mercado actual necesita (tiempos de entrega de producto más cortos y ciclos de producción más reducidos, económicos y de calidad), para lo cual son necesarias la ciencia, la tecnología y la innovación.

Dicho de otra forma, en las empresas se presentan situaciones o sucesos que requieren tomar decisiones para planificar, predecir, invertir, proyectar... por lo que es importante el conocimiento del problema, de la situación y de las posibles soluciones. Así, distintas técnicas de producción como *Lean Manufacturing* o *Just in Time* se aplican desde hace ya varios años en múltiples e importantes compañías para utilizar eficientemente los recursos de que se dispone, con bajos costes y con un alto cumplimiento en la atención al cliente con el fin de alcanzar objetivos como la eliminación de despilfarros, la mejora de la calidad y la reducción de tiempos de espera y operaciones que no añaden valor al producto (Crespo Pereira D., 2013).

Por todo ello, se necesita crear estrategias que respondan a los cambios rápidos y constantes del entorno actual, así como apoyarse en las nuevas tecnologías y en el software especializado. En este sentido, la simulación de procesos cobra especial importancia como apoyo para eliminar la incertidumbre en la toma de decisiones a corto plazo, ya que, con ésta, es posible asesorarse en las eventuales consecuencias del fracaso de una planta y en la mitigación de sus efectos. Asimismo, se mejora la comprensión de los procesos, además de ser una herramienta poderosa para la optimización de plantas, tanto en el campo operativo como en el diseño.

En general, la simulación permite evaluar el comportamiento de un sistema en diferentes situaciones, con el fin de imitar los procesos que desarrollan las empresas, para luego ponerlos a prueba de cambios, de manera que las modificaciones se realizan sobre el modelo y no sobre el propio sistema, por lo que nos permite probar cualquier cambio o propuesta antes de que ésta se lleve a cabo. De esta forma, al trabajar con un modelo, una equivocación no ocasionará ningún

problema real a la planta de producción, ya que dicho error ha sido cometido en un ambiente virtual, por lo que al mismo tiempo abre la posibilidad de reducir el riesgo y los costes de dichas experimentaciones. Además, el modelo puede ejecutarse a una velocidad variable, haciendo que los eventos de simulación sucedan más lentos, igual o mucho más rápido que en tiempo real, lo que proporciona la ventaja de poder evaluar cambios en la demanda o determinar en qué momento se recupera una inversión.

Por tanto, con los modelos de simulación tenemos la libertad de comprender como un proceso existente se desempeñaría si lo modificamos, e incluso visualizar como se comportará un sistema o proceso totalmente nuevo antes de que este funcione. Así, la habilidad para construir fácilmente los modelos, ver la animación y analizar los resultados y estadísticas brinda un beneficio sin precedente. Más concretamente, la simulación permitirá entre otros beneficios, detectar y aliviar los cuellos de botella del proceso estudiado, optimizar la producción, asignar recursos de manera eficiente, comparar diferentes estrategias o alternativas, así como gestionar los inventarios.

1.2. Objetivo del proyecto:

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el análisis mediante modelado y simulación (M&S) del proceso de fabricación de una empresa maderera.

Para ello y, en primer lugar, se ha diseñado el diagrama de flujo correspondiente al proceso de fabricación, además de realizarse una recopilación de los datos y parámetros que caracterizan el sistema. A continuación, se han introducido en un software de simulación de eventos discretos, *ExtendSim*, y una vez implementado el modelo en dicho programa, se desarrollan y se estudian los diferentes escenarios para determinar cuál de ellos es el más productivo además de detectar y aliviar los cuellos de botella del proceso, aumentando así, la productividad final. Para la consecución de tal fin, se han efectuado experimentaciones con los diferentes modelos obtenidos, así como un análisis de los resultados de los mismos.

Por tanto, el objetivo principal de este proyecto, se puede desagregar en una serie de hitos, como son:

- Diseñar el diagrama de flujo o el gráfico del proceso en cuestión.
- Desarrollar el modelo de simulación correspondiente al proceso.
- Desarrollar y estudiar diferentes escenarios.
- Efectuar experimentaciones con dichos escenarios y analizar los resultados obtenidos.
- Informar justificadamente la elección del mejor escenario para la empresa.

Para la elaboración del modelo se utilizará, como se ha dicho previamente, un software de simulación denominado *ExtendSim*, el cual nos permitirá además alcanzar los objetivos propuestos.



Figura 1: Logo del software de simulación *ExtendSim*. (Fuente: <http://www.extendsim.com/>)

Capítulo 2. Antecedentes

2.1. Contexto actual:

La Revolución Industrial supuso en los últimos siglos un cambio revolucionario, empezando por la invención de la máquina de vapor en el siglo XIX, seguida de la producción en serie a principios del siglo XX y terminando con la automatización de la industria en la década de 1970. Hoy en día, las transformaciones actuales de las que somos testigos, nos sitúan ya en un nuevo período de avance tecnológico, la llamada “*Industria 4.0*” o “*Cuarta Revolución Industrial*”.

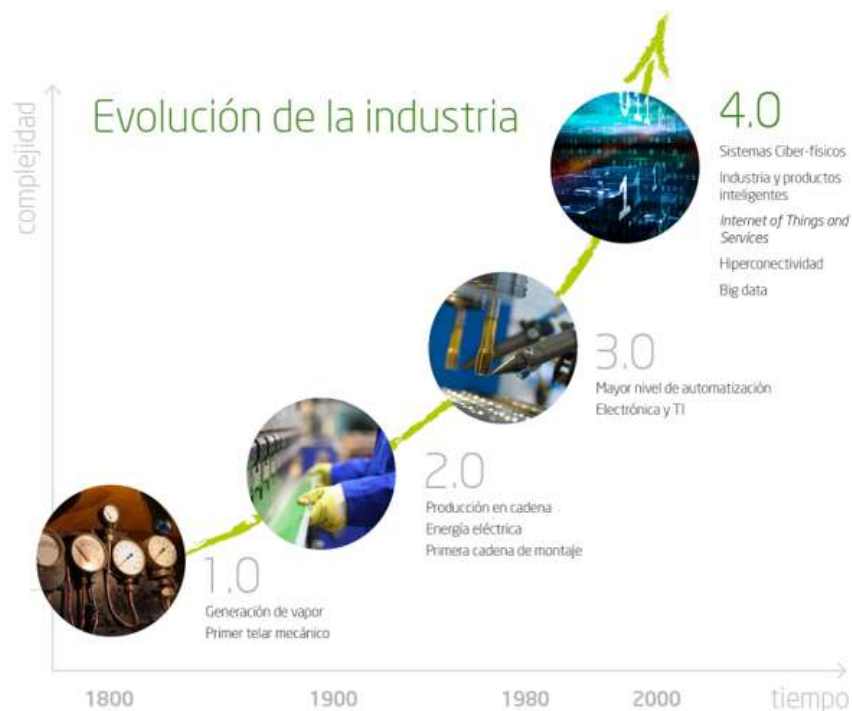


Figura 2: Evolución de la industria. (Fuente: Energy Solutions)

En los últimos años este concepto ha pasado de ser una mera utopía a ser una realidad cada vez más presente en los múltiples sectores que conforman el tejido industrial, donde la automatización de los sistemas de almacenamiento y la llegada de la fábrica inteligente o *Smart Factory*, son dos conceptos fundamentales en este movimiento. Así, la demanda creciente de productos cada vez más adaptados al consumidor junto con el decrecimiento simultáneo de los ciclos de vida de los mismos, exige estructuras de organización mucho más complejas e inteligentes que las empleadas hasta el momento (Brettel, Friederichsen & Keller, 2014). Como consecuencia, las empresas manufactureras comienzan a basar su producción en la diferenciación del producto (Lasi Hans-Georg Kemper, Peter Fettke, Thomas Feld & Michael Hoffmann, 2014).

La transformación digital aplicada a los procesos supone incorporar tecnologías 4.0 para hacerlos más eficientes y flexibles, ya sea mediante una optimización de los ya existentes o una modificación de los mismos, además de reducir los plazos acortando el tiempo de espera de los

clientes. Además, la *Industria 4.0* y sus tecnologías también posibilitan la aparición de nuevos modelos de negocio al cambiar el modo en que se pone a disposición del cliente un producto o servicio. Estas tecnologías digitales permiten la hibridación entre el mundo físico (dispositivos, materiales, productos, maquinaria e instalaciones) y el digital (sistemas), lo que a su vez posibilita la colaboración entre ellos y con otros sistemas para crear una industria inteligente.

Sin embargo, la digitalización de la sociedad en general y de la industria representa tanto una oportunidad como un reto. Estos desafíos pueden proceder del cliente hiperconectado, con gran acceso a la información y que cada vez exige más a las empresas, o de la necesidad de la industria de adaptarse a las nuevas tecnologías. La evolución de las mismas y la transformación digital, por tanto, son al mismo tiempo el origen de algunos retos y la solución a otros.

Existe multitud de literatura al respecto dependiendo del autor, pero la definición que probablemente nos puede dar una mejor idea de lo que estamos hablando puede ser la siguiente: “Integración de dispositivos y maquinaria física completa, conectados por sensores y software que son utilizados para predecir, controlar y planificar mejor el negocio y los resultados” (Lu 2017).

Son 9 los pilares en los que se sustenta esta Cuarta Revolución Industrial (Rüßmann, Lorenz, Gerbert & Waldner, 2015):

- 1. Big Data y análisis:** El análisis basado en grandes conjuntos de datos ha emergido recientemente en el mundo de la fabricación, buscando optimizar la calidad de la producción, el ahorro de energía y mejorar el servicio. Así, la recolección y evaluación de forma integral de datos de diversas fuentes diferentes llegará a ser un estándar en la toma de decisiones en tiempo real.
- 2. Robots autónomos:** En innumerables sectores de fabricación se utilizan desde hace ya varios años robots para hacer frente a las tareas más tediosas, complejas o peligrosas. Se trata de sistemas cada vez más autónomos, flexibles y capaces de trabajar de forma cooperativa y segura junto con los seres humanos, aprendiendo a su vez éstos de aquellos.
- 3. Simulación:** En la fase de ingeniería se utilizan desde hace tiempo las simulaciones 2D y 3D de productos, materiales y procesos de producción. Lo que se plantea en un futuro cercano es llevar las simulaciones a operaciones que se realizan en la planta productiva, aprovechando de esta forma, datos en tiempo real para reflejar el mundo físico en un modelo virtual, que puede incluir personas, máquinas productos.
- 4. Integración horizontal y vertical:** Actualmente, la mayoría de los sistemas no están totalmente integrados, es por ello que se están dedicando muchos recursos para poder integrar empresas, proveedores y clientes además de departamentos como ingeniería, producción y atención al cliente. Con la *Industria 4.0* se pretende, por tanto, que empresas, departamentos, funciones y capacidades estén cohesionados, integrando datos entre las diferentes compañías y evolucionando hacia redes universales que permitan automatizar realmente las cadenas de valor.

5. **Internet Industrial de las Cosas (IoT):** Hoy en día, muy pocos fabricantes de máquinas y sensores están conectados en red para hacer uso de sistemas embebidos. Por lo general, están organizados en una pirámide de automatización vertical en la que sensores y dispositivos de campo, con una automatización e inteligencia limitada, alimentan un sistema general de control de procesos en fábrica. Sin embargo, gracias al *Internet of Things*, más dispositivos pueden ser equipados con estos sistemas embebidos y conectados entre sí utilizando tecnologías estándar. Esto conlleva, por tanto, que los dispositivos desplegados puedan comunicarse e interactuar entre ellos y con los sistemas centrales cuando sea necesario, además de descentralizar el análisis y la toma de decisiones, permitiendo la respuesta en tiempo real.
6. **Ciberseguridad:** Muchas empresas todavía dependen de sistemas de gestión y de producción (ERP) que no están integrados. Con la llegada de una mayor conectividad y con el uso de los protocolos de comunicación estándar que se proponen con la *Industria 4.0*, aumenta dramáticamente la necesidad de proteger los sistemas de las amenazas cibernéticas, tanto los sistemas industriales críticos como las líneas de producción. Por ello, es esencial disponer de comunicaciones seguras y fiables, así como de un adecuado sistema de gestión de accesos de usuarios y verificación de identidades. De hecho, varios fabricantes de equipamiento industrial han unido sus esfuerzos con compañías dedicadas a la seguridad informática, ya sea a través de alianzas o incluso adquisiciones.
7. **Computación en la nube:** Desde hace algún tiempo las empresas están utilizando software en la nube para algunas aplicaciones empresariales, pero con la llegada de la Cuarta Revolución Industrial, las organizaciones demandarán mayores capacidades para almacenar cantidades de datos y realizar procesamientos masivos de forma simultánea. Este incremento en la demanda propiciará una mejora en el rendimiento de las tecnologías empleadas en la nube lo que dará lugar a que cada vez se despliegue más funcionalidad y datos en los “servidores cloud” apareciendo a la vez nuevos servicios de los que se puedan beneficiar los sistemas de producción.
8. **Fabricación aditiva:** Las empresas están incorporando esta estrategia en procesos como el prototipado para producir componentes individuales. Así, estos métodos aditivos serán ampliamente utilizados para producir lotes pequeños de productos personalizados que ofrecen ventajas en muchos sectores, como puede ser el de la edificación. Por otra parte, los sistemas de fabricación aditiva y descentralizada de alto rendimiento permitirán reducir las distancias de transporte además de los costes de inventario.
9. **Realidad aumentada:** La realidad aumentada ofrece gran variedad de posibilidades como puede ser la asistencia en la reparación de equipos y el envío de instrucciones de reparación a dispositivos móviles. Aunque estos sistemas están todavía en el inicio de su desarrollo, muchas empresas están apostando por esta tecnología y también por la Realidad Virtual para proporcionar a sus trabajadores información en tiempo real para mejorar la toma de decisiones y la ejecución de los procedimientos de trabajo asignados.

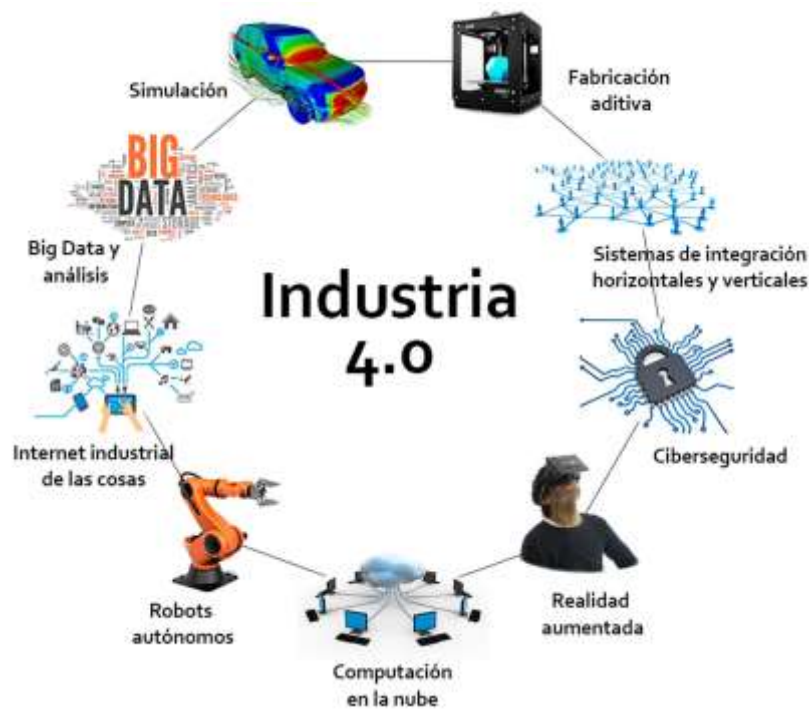


Figura 3: Los 9 pilares de la Cuarta Revolución Industrial. (Fuente: BCG)

Por tanto, la *Industria 4.0* se concibe como una nueva revolución industrial que consiste en aplicar las nuevas tecnologías a la industria, lo que hará posible obtener procesos más rápidos, eficientes y flexibles que permitirán producir entregables de mayor calidad a costes mucho más reducidos. A su vez, todo ello conllevará un incremento de la productividad, cambios en la economía, fomentará además el crecimiento industrial y modificará el perfil del trabajador deseado, modificando así la competitividad de las empresas.

Así, esta nueva interpretación de la industria busca transformar realmente la producción, proponiendo unidades aisladas y optimizadas que se unan en un flujo automatizado de producción totalmente integrado.

2.2. Historia de la simulación:

El comienzo histórico del concepto de simulación nace en 1777 con el experimento del conde de Buffon, un clásico problema de probabilidad geométrica cuyo interés radica en ser una forma sencilla para ir aproximando el valor del número “Pi” a partir de sucesivos intentos (utilizando un método parecido al de Montecarlo) y que fue mejorado posteriormente por Laplace en 1812.

Más tarde, William Sealy Gosset, aplica la simulación a una empresa cervecera con el fin de desarrollar variedades de cebada cuya robustez permitiese que la producción no se viese afectada por las variaciones en el suelo y el clima. Este hito histórico abrió las puertas a la aplicación de la simulación en el campo del proceso del control industrial, así como a las sinergias que generaban

este hecho basado en la experimentación y técnicas de análisis para descubrir soluciones exactas a problemas clásicos de la industria y de la ingeniería. Posteriormente, a finales de la década de 1940, dos hechos sentaron las bases para la rápida evolución del campo de la simulación. Uno de ellos fue la construcción de los primeros computadores de propósito general como el ENIAC. El segundo, tiene lugar cuando Stanislaw Ulam, John Von Neumann y otros científicos usaron el método de Montecarlo en computadoras modernas para solucionar problemas de difusión de neutrones en el diseño y desarrollo de la bomba de hidrógeno. Finalmente, a principios de 1950, la simulación tomó otro significado debido a que surgió la posibilidad de experimentar con modelos matemáticos en una computadora. Así, su sorprendente crecimiento brindó la herramienta necesaria que permite la implementación de los métodos de simulación más complejos de una manera simple y eficiente.

Hasta la actualidad, la simulación ha evolucionado exponencialmente tanto en sus herramientas como en sus aplicaciones, de forma que hoy en día podemos encontrarla en campos y ámbitos tan diversos como la sanidad, la economía y la investigación. Durante este crecimiento, se pueden distinguir varias etapas caracterizadas por las distintas tecnologías que se han empleado en la simulación. Éstas son:

- **Período de búsqueda (1955 – 1960):** En los primeros años, la simulación se llevó a cabo en FORTRAN u otro lenguaje de programación de propósito general, sin el apoyo de rutinas específicas de simulación. En este período se puso mucho empeño en la búsqueda por unificar conceptos y en el desarrollo de rutinas reutilizables para facilitar la simulación. Así, K. D. Tocher y D. G. Owen desarrollaron GSP (General Simulation Program) que constituyó la primera librería diseñada específicamente para simulación. Por último, en 1960, Keith Douglas Tocher desarrolló un programa de simulación general cuya principal tarea era la de simular el funcionamiento de una planta de producción, donde las máquinas marcarían el estado definitivo de la producción de la planta. Este trabajo fue la causa de la publicación del primer libro sobre simulación, *“The Art of Simulation”* (1963).
- **El Advenimiento (1961 – 1965):** En este período aparecen los precursores de los lenguajes de programación de simulación (Simulation Programming Languages o SPL) actuales. El primer SPL desarrollado con interacción de procesos fue GPSS (General Purpose Simulation System) presentado por IBM en 1961. GPSS fue diseñado para simular comunicaciones y sistemas de cómputo, pero rápidamente se extendió a otras áreas de aplicación. Básicamente GPSS utiliza una representación de diagramas de bloques apropiada para modelar sistemas de colas. Más tarde, en 1963, surgió SIMSCRIPT, el cual fue desarrollado por RAND bajo el auspicio de la Fuerza Aérea de EEUU. Éste estaba fuertemente influenciado por FORTRAN, y en sus principios, estaba orientado a la planificación de eventos. Al mismo tiempo apareció GASP, el cual estaba también orientado a la planificación de eventos y basado inicialmente en Angol, aunque no era un lenguaje propiamente dicho, sino una colección de rutinas de FORTRAN para facilitar posteriormente la simulación en este último lenguaje.
- **Período de formación (1966 – 1970):** Durante esta etapa los conceptos fueron revisados y redefinidos para promover una representación más consistente de cada visión del lenguaje, por lo que la mayoría de los SPL maduraron y lograron un uso más amplio. Los rápidos avances del hardware y las demandas de los usuarios forzaron a que algunos lenguajes

fuesen revisados y sufrieran cambios notables, en especial a GPSS. Como consecuencia, se produjo la aparición de GPSS/360, diseñado para las IBM 360 y SIMSCRIPT II. Posteriormente el SPL SIMULA introdujo el concepto de clases y herencia transformándose así en un precursor de los modernos lenguajes de programación orientados a objetos. Más tarde, en 1967 se funda WSC (Winter Simulation Conference), donde desde entonces, se archivan los lenguajes de programación y las aplicaciones derivadas en lo que a avances en el campo de los sistemas de simulación se refiere. Finalmente, entre los años 1968 y 1969, Niklaus Wirth desarrolla el conocido lenguaje popular y de uso general denominado PASCAL, el cual estimuló el diseño de paquetes de simulación basados en este mismo lenguaje.

- **Período de expansión (1971 – 1978):** En estos años, tuvieron lugar los mayores avances en GPSS, ya que se desarrolló GPSS/H, la versión principal de GPSS y que se sigue utilizando actualmente. En 1974 aparece GASP IV, el cual es utilizado como soporte para emplear el escaneo de actividad y la programación de eventos. Además, se realizaron esfuerzos para intentar simplificar el proceso de modelado y utilizar simuladores de programas interactivos e interfaces de lenguaje natural, junto con asignaciones automáticas para el idioma de elección. Sin embargo, al igual que las anteriores creencias excesivamente optimistas en la programación automática, se encontraron severas limitaciones en la generalidad de lo que podía modelarse debido a la complejidad inevitable de sistemas del mundo real, por lo que el mayor éxito se dio únicamente en el modelado de sistemas de simulación diseñados para aplicaciones en dominios estrechos. Así, usando SIMULA como base, se empezaron a desarrollar las primeras herramientas de alto nivel tratando de automatizar el proceso de traducción del modelo conceptual al computacional.
- **Período de consolidación y regeneración (1979 – 1986):** En el quinto período se produce la adaptación de los SPL para su utilización en computadoras personales y microordenadores manteniendo su estructura básica. Se crea SLAM (Simulation Language for Alternative Modeling), el cual soporta la planificación de eventos basada en GASP y que presenta un enfoque de red (derivado de la integración de procesos) y otro enfoque para el modelado de sistemas continuos. Finalmente, en 1982, C. Dennis Pegden desarrolla SIMAN (Simulation Analysis), el primer ejecutable de lenguaje de simulación importante y diseñado para ejecutarse bajo restricciones de MS-DOS. Éste utilizaba un segundo lenguaje independiente llamado CINEMA, que junto con el anterior se combinaron para crear el software Arena en 2002. Similar a GASP, permitió un enfoque de planificación de eventos discretos mediante la programación de una colección de rutinas implementadas en FORTRAN, un enfoque de diagrama de bloques análoga en algunos casos a GPSS y a SLAM, así como un enfoque para la incorporación de rutinas con un componente continuo. En 1986, WITNESS lanzó el primer producto con nivel de construcciones prefabricadas junto con una mejor representación visual. Este nuevo software redujo todavía más la necesidad de una nueva programación directa en el lenguaje de simulación, ya que era más fácil de usar, pero carecía aún de flexibilidad y la programación de código en el ordenador no estaba disponible para el usuario. Así, a finales de los años 80, existían en el mercado diferentes simuladores para computadora basados en Disk Operating System (DOS), los cuales fueron creados principalmente para usos comerciales. En esa misma época, había disponible una amplia

variedad de software de simulación, no obstante, muchos de ellos eran difíciles de usar debido a la limitada capacidad gráfica del ordenador al ejecutar los modelos de simulación.

- **Período de ambientes integrados (1987 – Actualidad):** En esta última etapa que está presente hoy en día, tiene lugar un crecimiento notable de SPL para ordenadores personales con entornos de simulación, con interfaces gráficas de usuario, animaciones 2D y 3D y muchas otras herramientas para la visualización. Muchos de estos entornos contienen también analizadores de datos de entrada y de salida. Además, algunos paquetes intentan simplificar el proceso de modelado mediante el uso de flujos de proceso o diagramas de bloques dando origen a los paquetes VIMS, evitando al mismo tiempo la necesidad de aprender la sintaxis de programación. Las animaciones pueden variar desde representaciones esquemáticas a dibujos en escala 2D y 3D. Más tarde, se realizaron avances recientes en la simulación basada en la web y actualmente todavía se sigue discutiendo sobre el papel de la simulación en la cadena de suministro. En la década de los 90 surgieron diferentes simuladores como son el Simple++, el Simul8 o el Taylor II (el primer simulador 3D para ejecutarse en un ordenador personal) en Europa; o el Extend y Simcad en Estados Unidos. En 1998, fue puesto en el mercado Taylor ED, el cual destacó por ser el primero orientado a objetos en 3D con realidad virtual y que también operaba con la plataforma de Microsoft Windows. Finalmente, en el año 2003, fue lanzado al mercado el software FlexSim, que resultó ser sustancialmente diferente respecto a los simuladores anteriores tanto en su lenguaje de simulación como en su arquitectura.

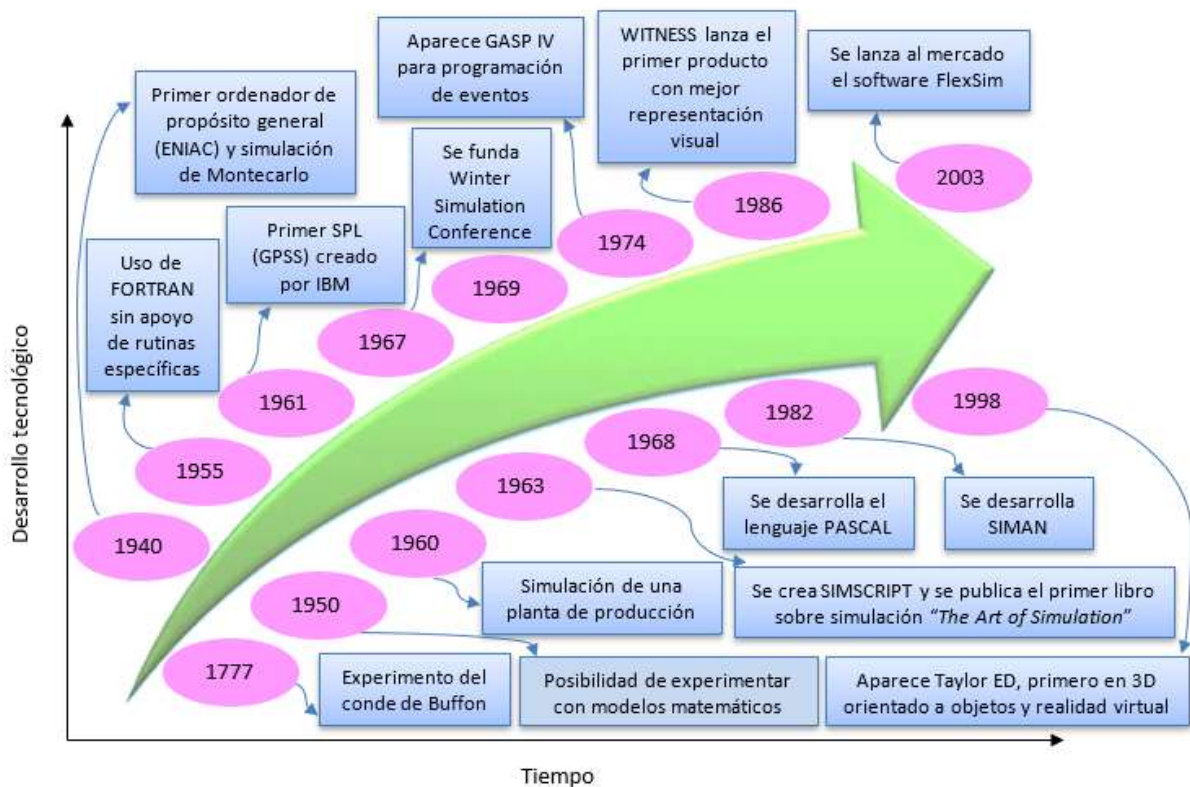


Figura 4: Evolución histórica de la simulación. (Fuente: Elaboración propia)

2.3. Simulación de procesos industriales:

Los cambios en el suministro o en las características de los materiales o maquinaria, los retrasos o adelantos en la llegada de productos o cualquiera otra modificación en el entorno del proceso, puede conllevar un impacto significativo en nuestro sistema. Por ello, es fundamental emplear estrategias o métodos de organización de la producción que proporcionen las herramientas necesarias para un diseño adecuado y robusto de nuestros sistemas.

En este contexto de competitividad feroz en el mundo industrial y de un entorno altamente variable motivado por las continuas y rápidas mejoras tecnológicas, la globalización y la personalización del producto, la simulación se presenta como el medio perfecto para apoyar la toma de decisiones tácticas y operativas. Además, en sistemas complejos de logística y producción, ésta proporciona una herramienta que permite el análisis de comportamientos que no serían fácilmente deducibles de otra forma.

Así, la simulación es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más sencillo y fácil de comprender. Ésta es en algunos casos indispensable y en otros no tanto, pero aun así es esencial a la hora de estudiar y entender mejor el sistema con el que estamos trabajando y anticiparse a numerosos problemas que pudieran surgir en el diseño del mismo.

Formalmente, la simulación es la imitación de las operaciones de un proceso del mundo real a lo largo del tiempo, la cual implica la generación de un sistema artificial para poder extraer inferencias sobre las características operativas del proceso real que se está representando. Este sistema, definido como “modelo”, es una representación de un proceso real mediante un conjunto de eventos sucesivos que cambian de estado a lo largo del tiempo (Banks J., Carson J. S., II & Nelson B. L.). Dicho modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de hipótesis (expresadas en forma de relaciones matemáticas, lógicas y simbólicas entre entidades o ítems del sistema) y aproximaciones (únicamente representa la realidad de forma parcial) y se construye para cumplir una finalidad específica. Además, debe recopilar todos los aspectos esenciales del sistema de estudio a la vez que ser una buena solución de compromiso entre dicho aspecto y la simplicidad. (Guasch, Piera, Casanovas & Figueras, 2002). Más concretamente, la simulación es el proceso de diseñar un modelo a partir de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento de dicho sistema y evaluar nuevas estrategias (dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos) para el funcionamiento del mismo (Shannon, R.E., 1998).

La aplicación de ésta, supone una fuente de competitividad para las empresas, mediante modelos que permitan simular el comportamiento de un sistema en diferentes circunstancias, analizando los posibles cambios y sus respectivas consecuencias. Por ello, está considerada como una herramienta indispensable para resolver muchos de los problemas que se presentan en la realidad, además de ser empleada para analizar las distintas alternativas de un sistema productivo, para así finalmente, ayudarnos a decidir cuál es la más apropiada. Este proceso de toma de decisiones se define como la elección de la alternativa más adecuada de entre varias posibilidades con el fin de alcanzar un estado deseado, considerando la existencia de unos recursos limitados (Davis, 2001).

2.3.1. Sistemas y modelos de simulación:

La simulación digital es una técnica que permite representar, imitar o simular en un ordenador el comportamiento de un sistema físico o teórico según ciertas condiciones particulares de operación. Por tanto, para analizar, estudiar y mejorar su comportamiento mediante las técnicas de dicha simulación digital, es necesario primero desarrollar un modelo conceptual que describa las dinámicas de interés, y luego implementarlo en un simulador para poder analizar los resultados.

Aunque es una técnica relativamente reciente y en constante evolución, el uso de la simulación como metodología de trabajo es una actividad muy antigua, y podría decirse que inherente al proceso de aprendizaje del ser humano. Por ello, para poder comprender la realidad y toda la complejidad que un sistema puede conllevar, ha sido necesario construir artificialmente objetos y experimentar con ellos dinámicamente antes de interactuar con el sistema real. Así, la simulación digital puede verse como el equivalente electrónico a este tipo de experimentación, para lo que será necesaria la construcción de modelos que representen la realidad de tal modo que puedan ser interpretados por un ordenador.

A partir de esta primera aproximación al concepto de simulación digital, se desprende que el uso de las técnicas para la solución de problemas es un campo interdisciplinario muy amplio, tanto por la variedad de sistemas que pueden ser considerados, como por la cantidad de contextos que pueden darse.

Puede decirse, además, que estas técnicas han adquirido recientemente una importancia cada vez más relevante en la resolución de diferentes tipos de problemas prácticos, ya que es muy común encontrar aplicaciones en campos tanto como ingeniería, economía, medicina, así como las ciencias sociales o la ecología. De hecho, la formación en el desarrollo de modelos matemáticos y su ejecución en simuladores digitales está presente en muchas titulaciones universitarias.

Sin embargo, es importante enfocarnos previamente en explicar los conceptos que permiten la aplicación de estas técnicas. Por esta razón, veremos en qué consisten los términos de “sistema” y “modelo”, así como los tipos que existen de cada uno de ellos. Pero para poder introducir el concepto de modelo de un sistema y sus principales características, es imprescindible definir previamente qué se entiende por sistema.

En primer lugar, un sistema puede definirse como una colección de objetos o entidades que interactúan entre sí como un todo para alcanzar cierto objetivo. Hay que decir que el conjunto de objetos de un sistema puede ser tan solo un subconjunto de los que deberían ser considerados en un sistema si el objetivo que se pretendiese alcanzar fuera otro. Por tanto, el estado de un sistema puede ser definido como el conjunto mínimo de variables necesarias para caracterizar o describir aquellos aspectos de interés del sistema en un cierto instante de tiempo. Así, a estas variables las denominamos variables de estado, y el número y el tipo de éstas vendrán condicionados por los objetivos de nuestro estudio. Además, en función de la evolución temporal de éstas, podremos clasificar los sistemas en continuos o discretos, como se verá a continuación.

Ahora bien, sin perder generalidad y considerando como finalidad de los experimentos tan solo el estudio del comportamiento de un sistema en el dominio temporal, se pueden clasificar los sistemas en continuos, discretos, orientados a eventos discretos o combinados, atendiendo tan solo a la relación entre la evolución de las propiedades de interés y a variable independiente del tiempo.

- **Sistemas continuos:** Las variables del estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo. Un ejemplo de este tipo de sistemas sería la evolución de la temperatura en una habitación durante cualquier intervalo de tiempo, o la evolución del nivel de líquido en un tanque.
- **Sistemas discretos:** Se caracterizan porque las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en un cierto instante o secuencia de instantes y permanecen constantes el resto del tiempo. Además, la secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio, obedece normalmente a un patrón periódico.
- **Sistemas orientados a eventos discretos:** Al igual que los sistemas discretos, se caracterizan porque las propiedades de interés del sistema cambian solamente en una secuencia de instantes de tiempo. Sin embargo, la secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio, sigue en este caso un patrón aleatorio.
- **Sistemas combinados:** Son aquellos que combinan subsistemas que siguen filosofías continuas o discretas, respectivamente. Es el caso de sistemas que poseen componentes que deben ser necesariamente modelados según alguno de dichos enfoques, ya que existen variables que cambian continuamente con el tiempo y otras que lo hacen solamente en algunos instantes determinados. Además, pueden existir tres tipos de interacciones entre las variables de estado, como puede ser en primer lugar que un evento discreto modifique el valor de una variable de estado continua. Por otro lado, puede ocurrir que un evento discreto cause que la relación que gobierna una variable de estado continua cambie en un instante de tiempo en particular. Finalmente, puede suceder también que una variable continua provoque que un evento discreto tenga lugar o sea programado.

Son conocidas numerosas alternativas a las técnicas de simulación digital para imitar el comportamiento de un sistema. Éstas pueden ser la construcción de un prototipo a escala del sistema real, la representación analógica del sistema mediante circuitos eléctricos, la descripción cualitativa del sistema, o la analogía con otros sistemas físicos o biológicos. Todas ellas tienen en común que, para simular el comportamiento de un sistema, requieren de algún modo la descripción de las características internas o mecanismos del sistema en cuestión para prever su respuesta. La descripción de éstas se conoce como modelo del sistema, y el proceso de abstracción para obtener esta descripción se denomina modelado.

Existen muchos tipos de modelos (físicos, mentales, simbólicos...) para representar los sistemas en estudio, pero debido a que uno de los objetivos para los cuales se van a desarrollar los modelos es su uso en entornos de simulación digital, es necesario que los modelos formalicen el conocimiento que se tiene del sistema de modo conciso, sin ambigüedades de forma que exista una única interpretación y que puedan ser procesados por un ordenador. Estas características

determinan el uso de modelos simbólicos matemáticos como herramienta para representar las dinámicas de interés de cualquier sistema en un entorno digital, los cuales mapean las relaciones existentes entre las propiedades físicas del sistema que se pretende modelar en las correspondientes estructuras matemáticas. El tipo de formalización matemática que se utilice va a depender de las características intrínsecas de las dinámicas de interés que se quieran representar.

La descripción en términos matemáticos de un problema real no es una metodología de trabajo propia de la simulación digital, sino que es inherente a la mayoría de las técnicas que se utilizan para solventar cualquier tipo de problema, las cuales suelen seguir unas pautas que, de modo general, se pueden resumir de la siguiente forma:

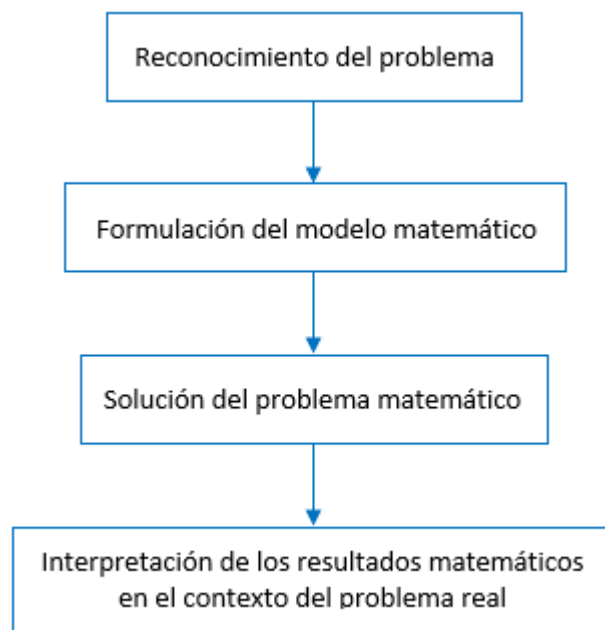


Figura 5: Etapas en la explotación de modelos matemáticos. (Fuente: Elaboración propia)

Además, aunque existe gran diversidad de metodologías para el desarrollo de modelos matemáticos de sistemas físicos, existe un conjunto de consideraciones que se deben tener en cuenta para organizar una representación eficiente del sistema real:

- Un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y consecuentemente, representa tan solo parcialmente la realidad.
- Un modelo se construye para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin.
- Un modelo tiene que ser por necesidad un compromiso entre la simplicidad y la necesidad de recoger todos los aspectos esenciales del sistema en estudio.

Así, un buen modelo debe preservar ambas propiedades:

- Representar adecuadamente aquellas características del sistema que son de nuestro interés.

- Ser una representación abstracta de la realidad lo suficientemente sencilla como para facilitar su mantenimiento, adaptación y reutilización.

Atendiendo entonces, a las características que debe poseer un buen modelo, así como los objetivos del estudio de simulación, pueden clasificarse de diferentes formas en función de su gestión del tiempo o de su aleatoriedad.

En función de gestión del tiempo, podemos distinguir:

- **Modelos estocásticos:** Suelen utilizarse para representar el sistema en un cierto instante de tiempo, y en su formulación, no se considera el avance del tiempo. Este tipo de modelos es muy útil cuando el sistema se encuentra en equilibrio, es decir, no evoluciona respecto al tiempo. Por tanto, si se modifica dicho punto de equilibrio alterando uno o más de los valores del sistema, el modelo permite deducir el resto de los valores, pero no muestra la manera en la que cambiaron.
- **Modelos dinámicos:** En contraposición a los anteriores, permiten deducir cómo las variables de interés del sistema en estudio evolucionan respecto al tiempo. Un ejemplo de modelo dinámico sería la evolución del stock de material, que depende de los flujos de entrada y de salida, cada uno de los cuales lleva implícito la evolución del tiempo.

Por otro lado, en función de su aleatoriedad, se pueden diferenciar dos tipos de modelos:

- **Modelos deterministas:** Son aquellos en los que su nuevo estado puede ser completamente definido a partir del estado previo y de sus entradas, es decir, si presenta un único conjunto de valores de salida para unas determinadas entradas que son conocidas.
- **Modelos estocásticos:** Son aquellos que no requieren de una o más variables aleatorias para formalizar las dinámicas de interés. En consecuencia, el modelo no genera un único conjunto de valores de salida cuando es utilizado para realizar un experimento, sino que los resultados generados son utilizados para estimar el comportamiento real del sistema.

Además, en analogía a los sistemas, los modelos dinámicos también pueden clasificarse a la vez en continuos o discretos, según la forma en que evolucionen las variables de estado.

- **Modelos continuos:** Se caracterizan por representar la evolución de las variables de forma que éstas cambian continuamente en el tiempo. Generalmente, suelen utilizarse ecuaciones diferenciales ordinarias si se considera la evolución de una propiedad respecto al tiempo, o bien ecuaciones en derivadas parciales si se tiene en cuenta también las relaciones de las tasas de cambio de las variables de estado respecto al espacio.
- **Modelos discretos:** Se caracterizan por representar la evolución de las variables de estado en un cierto instante o instantes de tiempo concretos.

Es importante notar, además, que, a partir de la clasificación de modelos realizada, es posible describir un sistema continuo mediante uno discreto y al revés. Por tanto, la decisión de utilizar un

modelo u otro depende de los objetivos particulares de cada estudio y no tanto de las características del sistema.

Por último, para terminar de aclarar el concepto de modelo de un sistema, se introducen otras definiciones igualmente válidas, así como algunas de las características que debe cumplir un buen modelo (Guasch, Piera, Casanovas & Figueras, 2002):

- Un modelo es un concepto que utilizamos para representar cualquier otra entidad, como puede ser un sistema cualquiera. Así, mediante un proceso de abstracción, se muestran en un formato adecuado las características de interés de un objeto o sistema real o hipotético.
- Un modelo es la representación simplificada de un sistema que nos facilitará comprender, explicar, modificar, preservar, prever y posiblemente controlar el comportamiento de un sistema.
- Un modelo es el sustituto de un sistema físico concreto.
- Un modelo debe representar el conocimiento que se tiene de un sistema de modo que se facilite su interpretación, formalizando únicamente los factores que son importantes para alcanzar los objetivos propuestos con el modelado.
- Un modelo debe ser tan sencillo como sea posible, ya que el desarrollo de modelos universales es impracticable y, además, poco económico; siempre y cuando represente adecuadamente los aspectos que sean necesarios y de nuestro interés.

Para finalizar, hay que tener en cuenta que los procesos industriales están constituidos generalmente por modelos dinámicos, aleatorios y discretos, por lo que, para su representación y posterior estudio, es necesaria la denominada simulación de eventos discretos, con la cual se modelan y analizan este tipo de procesos.

2.3.2. Etapas de la simulación:

Una vez explicado en qué consiste la simulación de procesos y sus principales características, merece especial importancia mencionar también las etapas que hay que llevar a cabo para ejecutar un estudio de simulación. Éstos han sido discutidos por diversos autores, y a pesar de existir una gran variedad de tipos de simulación, este proceso consta de unas etapas comunes que deberemos tener en cuenta. Así, basándonos en el esquema más completo y detallado (Banks J., Carson John S., II, Nelson Barry L.), podemos diferenciar las siguientes etapas:

1. **Formulación del problema:** Toda simulación empieza con el enunciado del problema. En el caso de que éste sea proporcionado por un cliente, el ingeniero debe asegurarse en primer lugar de que entiende perfectamente el problema. Si, por el contrario, es el ingeniero el que redacta el enunciado, es muy importante que el cliente lo comprenda y esté de acuerdo con el planteamiento inicial. Sin embargo, y a pesar de todas estas precauciones, es posible que el enunciado tenga que ser formulado nuevamente a medida que el proceso de simulación progresa dada la naturaleza cambiante del problema.

- 2. Planteamiento de los objetivos y plan general del proyecto:** Los objetivos indican las cuestiones a las que ha de responder el estudio de simulación que se va a realizar. Por tanto, llegados a este punto, debe plantearse si a la vista de la formulación del problema y de sus objetivos, la simulación es la herramienta adecuada para realizar el trabajo. Asumiendo entonces que la simulación es la forma o la metodología correcta, lleva a cabo la planificación del proyecto, la cual deberá contemplar los distintos escenarios que será necesario estudiar. Asimismo, las distintas etapas del estudio deben indicar el tiempo y el personal requerido, el hardware y el software que podría requerir el cliente en el caso de que quisiese simular personalmente el modelo una vez realizado, además del coste y el plazo tanto del estudio en general como de cada fase en particular.
- 3. Diseño y conceptualización del modelo:** A partir del estudio del sistema real, éste deberá ser abstraído a un modelo conceptual, es decir, una serie de relaciones matemáticas y lógicas correspondientes a la estructura y a los componentes del sistema en cuestión. Es recomendable comenzar por un modelo simplificado e ir desarrollándolo hasta completarlo, teniendo siempre la precaución de no hacerlo más complejo de lo realmente necesario, ya que dicha complejidad conllevará un mayor tiempo y a la vez un mayor coste sin necesariamente conseguir mejores resultados. Además, en esta etapa se recomienda la implicación del cliente, pues con ello se podrá aumentar la calidad de los resultados finales, así como incrementar la confianza del cliente en el modelo.
- 4. Toma de datos:** Una vez que la propuesta sea aceptada, debe ser presentada una lista con todos los datos al cliente. En el mejor de los casos, el cliente tendrá recogidos estos datos y se podrán introducir fácilmente en el modelo. Sin embargo, existe la posibilidad de que el cliente no posea esos datos, o bien que los que tenga no sean los requeridos. Esta situación provocará un aumento del tiempo necesario para desarrollar el modelo y del coste del trabajo, por lo que se puede ver la importancia de la etapa donde se realiza la planificación del proyecto. Por otro lado, esta etapa de recogida de datos, puede hacerse en paralelo con la del diseño del modelo, con lo que el ingeniero puede construir este último mientras realiza el proceso de toma de datos.
- 5. Realización de la simulación:** Elaborado el modelo, se introducen los datos obtenidos en la etapa anterior en el software de simulación donde estará implementado dicho modelo y a continuación, se procede a ejecutarlo para empezar a visualizar los resultados.
- 6. Verificación del modelo:** Esta etapa consiste en una revisión completa del modelo y de los datos introducidos en el mismo, comprobando que el modelo conceptual se ajusta al modelo virtual. Esta revisión tiene una importancia fundamental para el desarrollo correcto del estudio, ya que algunos datos introducidos de manera incorrecta pueden cambiar totalmente los resultados obtenidos.
- 7. Validación del modelo:** La validación consiste en determinar si el modelo conceptual se ajusta o no a la realidad. Por tanto, es necesario plantearse ciertas preguntas como, por ejemplo: “¿Puede el modelo conceptual sustituir al modelo real para poder alcanzar los propósitos del proyecto?” Así, a través de la calibración del modelo y del proceso iterativo de

comparación de ambos, se reajustará el modelo que desarrollado hasta que la convergencia con el real sea justificadamente aceptable. Además, en el caso de tener un sistema físico, se podrían comparar los resultados de la simulación con el valor real.

- 8. *Diseño experimental:*** Para cada escenario contemplado inicialmente, será necesario introducir todos los datos correspondientes a cada uno de ellos y definir los parámetros a analizar ya que es fundamental filtrar la información e identificar cuál es realmente de nuestro interés. Además, se determinará la duración de la simulación, el número de simulaciones y toda la información que resulte relevante.
- 9. *Realizar la simulación y analizar los resultados:*** Una vez contemplados los pasos anteriores, es el momento de simular el modelo creado para obtener los resultados con los cuales se obtendrán las conclusiones necesarias para alcanzar los objetivos planteados en un principio.
- 10. *¿Más simulaciones?:*** Realizadas las simulaciones, si los datos extraídos son coherentes y suficientes para alcanzar los objetivos propuestos, no será necesario volver a realizar más simulaciones. En caso contrario, se deberá volver a simular para obtener otros resultados, o bien, diseñar de nuevo otro experimento.
- 11. *Informe y documentación:*** Los resultados de las distintas simulaciones deben ser entregados de la forma más clara y concisa posible al cliente, para que éste pueda analizar el planteamiento del problema, los datos de partida y los diferentes escenarios, así como los resultados obtenidos en cada uno de ellos. De esta forma, será posible comparar las diferentes alternativas planteadas y a partir de ellas, obtener las conclusiones pertinentes que resuelvan las cuestiones planteadas, tanto si se trata del diseño de un proceso productivo o del replanteamiento de uno ya existente.
- 12. *Implementación:*** En los casos en los que el modelo sea desarrollado mediante un programa el cual será reutilizado más adelante, deberá recopilarse toda la documentación del propio programa la cual estará constituida por las herramientas necesarias para explicar cómo funciona. De esta manera, el cliente tendría la posibilidad, con toda esta documentación generada y adaptada a su proceso productivo, de realizar nuevas simulaciones, experimentos o modificaciones para ayudarlo a tomar las decisiones adecuadas o simplemente servir de base para implementar físicamente el escenario planteado mediante simulación.

El proceso de validación de un modelo de simulación siempre estará sujeto al experimento frente al que se vaya a realizar el estudio, por lo que no se puede asegurar estrictamente si el modelo es correcto o no, sino que habrá que señalar siempre el experimento al que hace referencia y comprobar si es válido. Por lo tanto, la simulación sirve como una guía en el diseño de experimentos, ya que, para realizar la validación de cualquier modelo, no es necesario ser un experto, bastaría con tener ciertos conocimientos estadísticos y estar respaldado por la simulación del sistema que hemos diseñado, así como realizar un análisis de sensibilidad, un análisis de residuos o simplemente optar por la búsqueda de dominios apropiados de los parámetros de entrada.

Finalmente, comentar que la validez del modelo de simulación se dará cuando éste sea fiel al sistema, es decir, cuando presente un comportamiento análogo al mismo, cuando su nivel de detalle sea el adecuado conforme a lo establecido en los objetivos iniciales y cuando, además, el modelo incluya los elementos necesarios para que éste represente completamente el sistema físico que se ha estudiado (Sokolowski & Banks, 2010).

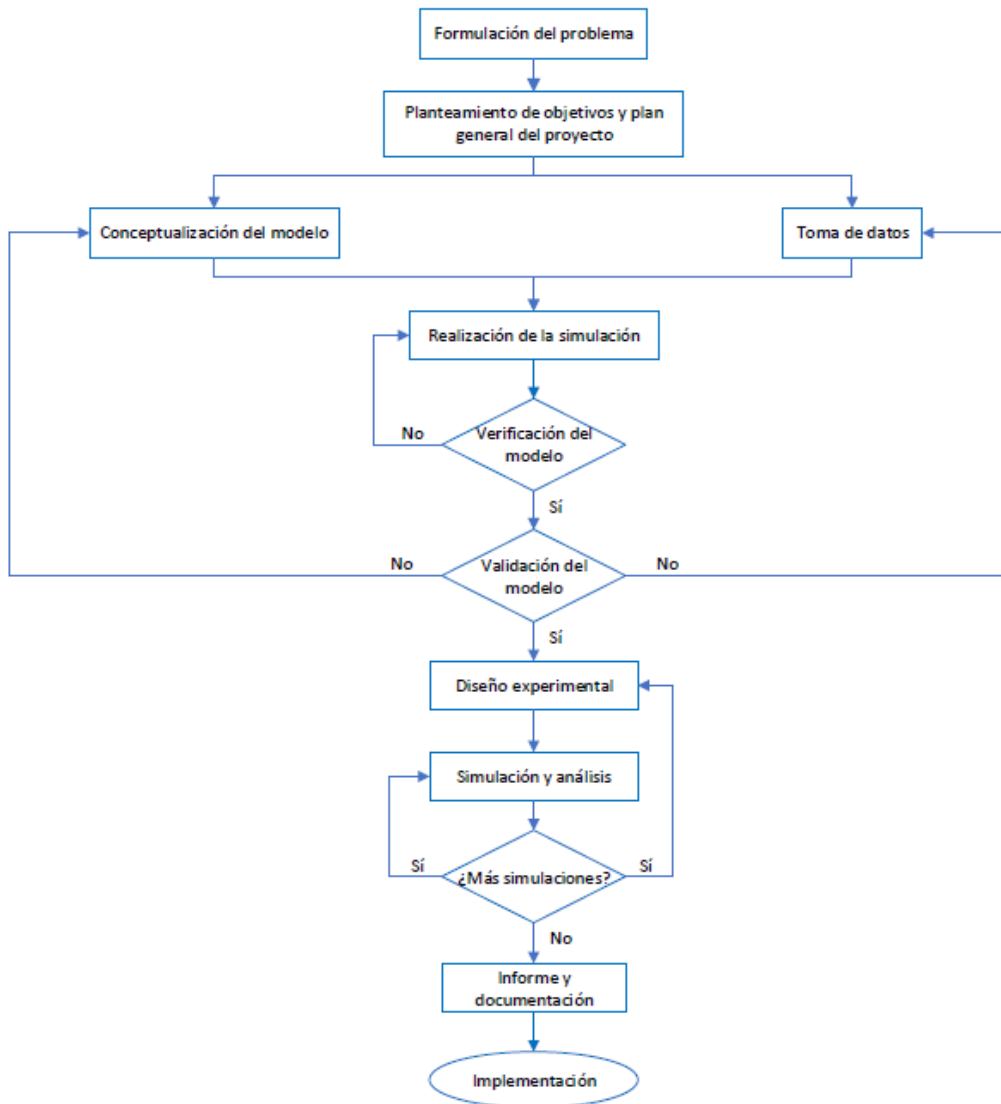


Figura 6: Etapas de un estudio de simulación. (Fuente: Elaboración propia)

2.3.3. Aplicaciones:

En cuanto a las áreas de aplicación, éstas son muy amplias y diversas, desde el análisis del impacto ambiental causado por diversas fuentes o el análisis y diseño de sistemas de comunicaciones, hasta campos como la medicina o la biología, pero todas ellas con objetivos comunes como son el diseño y gestión de sistemas, así como su mejora.

Específicamente, ciñéndonos al caso que nos concierne, los principales usos de la simulación en la ingeniería industrial son:

- **Diseño de Layout:** La simulación de procesos nos permitirá verificar desde el punto de vista de la fabricación un Layout, midiendo productividades, unidades fabricadas, tiempo empleado en transportes de material que se realizan en una planta... Además, nos permitirá organizar correctamente, disponiendo de la mejor ubicación posible de máquinas y operarios.
- **Optimización del flujo de material:** El flujo de materiales dentro de una fábrica está íntimamente ligado con el Layout, por lo que la buena organización de los transportes de material tendrá consecuencias positivas en el proceso productivo.
- **Balanceo de líneas de producción:** Uno de los principales problemas que presentan muchas líneas de producción son las diferencias de tiempo de ciclo entre unas máquinas y otras y la dificultad de planificar las horas de funcionamiento de éstas. Con la simulación se consigue detectar con claridad los cuellos de botella y tener una buena perspectiva dinámica del balanceo de la línea de reducción, permitiendo analizar el material en proceso, el empleo de recursos y la saturación de los *buffers* intermedios.
- **Optimizar los niveles de stocks:** Ligado al balanceo de las líneas de producción, está la optimización de los niveles de stocks intermedios, que serán los que regulen las diferencias de tiempo de ciclo de unos procesos y otros. Además, también podremos calcular los requisitos de materiales para una determinada capacidad de fabricación.
- **Validación de sistemas logísticos automáticos:** En este apartado se encontraría la validación de sistemas logísticos como es el caso de sistemas automáticos de movimiento de materiales como son los AGVs, cintas transportadoras, cadenas de transporte elevadas e incluso los transelevadores de los sistemas automáticos

A pesar de todo y desafortunadamente, todavía son muchos los sectores industriales que no se aprovechan de las ventajas que esta tecnología ofrece para la toma de decisiones, el ahorro de costes y la optimización de procesos industriales.

2.3.4. ¿Por qué simular?

Para responder a esta pregunta, se adoptan principalmente tres perspectivas. La primera de ellas sería la necesidad de utilizar la simulación debido a la naturaleza de los sistemas de operaciones unida, además, a las facilidades que presenta ésta sobre otros enfoques para comprender y mejorar un sistema físico concreto. Finalmente, nos encontramos con las ventajas que presenta este método para hacer frente a la variabilidad e impredecibilidad asociada a un sistema real.

En primer lugar, podemos observar como la mayoría de los sistemas reales están condicionados por una gran variabilidad. Esto es debido principalmente a los cambios predecibles e

intencionados que se realizan para poder cumplir con las variaciones del volumen de la demanda en una instalación de producción. En otros casos, sin embargo, estas variaciones son impredecibles, como, por ejemplo, la tasa de llegadas de pacientes en el departamento de emergencias de un hospital. Así, ambas formas de variabilidad están presentes en la mayoría de los sistemas de operaciones.

Por otro lado, estos sistemas también están interconectados, de forma que sus componentes no funcionan de forma aislada, pero sí se afectan entre ellos y, por lo tanto, hay que tener en cuenta que una modificación en una parte del sistema, tendrá como consecuencia un cambio en otra parte del mismo. Por ejemplo, si una máquina está configurada para funcionar más rápido de lo que lo hace habitualmente, es probable que provoque una reducción del progreso del trabajo aguas abajo y una acumulación de elementos aguas arriba. A pesar de todo, resulta difícil predecir los efectos de las interconexiones en un sistema, especialmente cuando está presente la variabilidad antes mencionada.

Finalmente, podemos encontrarnos con sistemas caracterizados por su complejidad, tanto dinámica como combinatoria. Esta última está relacionada con la cantidad de componentes en un sistema o el número de combinaciones posibles de las diferentes partes del sistema y está presente en algunos sistemas de operaciones. Por ejemplo, una pieza que se procesa a través de una máquina en una estación de trabajo, cuando termina, pasará a cualquiera de las otras máquinas, dependiendo además del tipo de pieza y el siguiente proceso requerido. Por lo tanto, como se puede comprobar, a medida que aumentan las máquinas, el número de interconexiones potenciales crecerá exponencialmente. Asimismo, también hay que tener en cuenta la complejidad dinámica, la cual no está necesariamente relacionada con el tamaño y que surge de la interacción de los componentes de un sistema a lo largo del tiempo (Sterman, 2000). Además, los sistemas que están altamente interconectados es probable que posean esta característica de complejidad dinámica, que a su vez puede conllevar tres efectos distintos. En primer lugar, puede ocurrir que una acción tenga efectos dramáticos diferentes en el corto y largo plazo. También es posible que una acción tenga un conjunto muy diferente de consecuencias en una parte del sistema y en otra. Y, por último, hay que aclarar que una acción puede conllevar efectos no obvios, es decir, no detectables mediante la intuición.

Todas estas adversidades, suponen que sea muy difícil predecir el rendimiento de un sistema cuando se llevan a cabo diferentes acciones, o se realizan modificaciones en él. Los efectos descritos anteriormente surgen normalmente debido a una retroalimentación dentro de nuestro sistema, ya que las interconexiones entre las operaciones a pueden no ser unidireccionales (en particular, los elementos físicos y la información a menudo fluyen en direcciones opuestas). Es decir, cuando los componentes están interconectados mediante una estructura de bucle, una acción tomada en un punto determinado del sistema finalmente conduce a un efecto de retroalimentación sobre ese mismo punto. Además, en algunos casos, estas estructuras de bucle son muy complejas, involucrando así a distintos componentes del sistema.

Por lo tanto, como podemos ver, muchos sistemas de operaciones están interconectados y caracterizados a la vez por una alta variabilidad y complejidad, tanto dinámica como combinatoria. Es por ello, que predecir el comportamiento de todos aquellos que estén sujetos a cualquiera de este tipo de variabilidad, será muy difícil, si no imposible. Sin embargo, los modelos de simulación pueden representar explícitamente dicha variabilidad, además de la interconexión y la complejidad de un

sistema dado, para así comparar los diseños de sistemas alternativos y determinar el efecto de las diferentes políticas en el rendimiento de nuestro sistema real. Así, la combinación de variabilidad e interconexión implica que el sistema puede ser representado mediante un modelo de simulación.

Ahora bien, en lugar de desarrollar y utilizar un modelo de simulación, los experimentos podrían llevarse a cabo en el sistema real. Sin embargo, existen algunas razones obvias y otras no tanto, por las cuales la simulación es preferible a tal directa experimentación.

- **Coste:** La experimentación con el sistema real es probable que no sea demasiado económica y, a parte del coste de realizar cambios en el sistema, la idea de probar nuevas ideas, interrumpe las operaciones cotidianas además de que puede ser necesario apagar o detener el sistema por un tiempo mientras se realizan dichas modificaciones. Si, además, las alteraciones provocan que el rendimiento de la operación empeore, esto puede ser costoso en términos de pérdida e insatisfacción de los clientes. Sin embargo, con la simulación los cambios pueden hacerse a expensas del tiempo que lleva alterar el modelo y sin ninguna interrupción en el funcionamiento del sistema real.
- **Tiempo:** Experimentar con un modelo real puede requerir mucho tiempo, antes del cual es posible que no obtengamos ninguna conclusión convincente. Así, dependiendo del volumen del modelo y de las características de la computadora, una simulación puede realizarse más rápidamente y muchas más veces que en tiempo real. Como consecuencia, los resultados en el rendimiento del sistema se pueden obtener en cuestión de minutos o tal vez horas y a la vez, representar períodos de tiempo muy largos si es necesario, lo que permitirá explorar diversas ideas y alternativas en un reducido período de tiempo.
- **Control de las condiciones experimentales:** Al comparar alternativas, es útil controlar las condiciones bajo las cuales se realizan los experimentos para que las comparaciones directas puedan resultar efectivas, lo que se hace bastante difícil cuando se trata con el sistema real. También es probable que la experimentación con este sistema conduzca al efecto Hawthorne, donde el rendimiento del personal mejoraría simplemente porque se les está prestando algo de atención. Además, en algunos casos, el sistema real solamente ocurre una vez, por lo que no hay opción de repetir un experimento. Sin embargo, con un modelo de simulación adecuado, las condiciones bajo las cuales se realiza un experimento pueden repetirse todas las veces que sean necesarias, así como reproducir exactamente el mismo patrón de ciertos eventos con la frecuencia que se requiera.
- **El sistema real no existe:** Una dificultad muy obvia que a menudo sucede cuando la experimentación se realiza en el mundo, es que el sistema físico puede no existir. Así, además de construir una serie de alternativas para el sistema real, las cuales es poco probables que sean prácticas en cualquiera de las situaciones más triviales, es muy común que la experimentación directa sea casi imposible en tales circunstancias. Es entonces, cuando la simulación puede salvar esta dificultad y se convierta por tanto en la única alternativa para poder estudiar el sistema físico real mediante el diseño y desarrollo de un modelo adecuado.

Aun así, la simulación no es el único método que se puede usar para comprender y mejorar un sistema real, si no que existen otros enfoques que van desde simples operaciones matemáticas o modelos implementados en hojas de cálculo hasta la programación más compleja o métodos heurísticos como por ejemplo la programación lineal, la programación dinámica o el recocido simulado y los algoritmos genéticos que se basan en una analogía con un fenómeno natural determinado (García del Valle, Alejandro, 2014). Así, por ejemplo, la teoría de colas proporciona una clase específica de modelo que analiza situaciones similares a aquellos a menudo representados por simulaciones, llegadas, colas y procesos de servicio (Winston 1994).

Sin embargo, existen diversas razones por las cuales la simulación debe utilizarse con preferencia respecto a estos otros métodos:

- **Variabilidad del modelo:** Ya se ha comentado que la simulación es capaz de modelar la variabilidad y los efectos que ésta conlleva, mientras que la mayoría de los otros métodos anteriormente mencionados no son capaces de hacerlo, y aunque lo consiguieran por una u otra razón, esto aumentaría notablemente su complejidad. Por tanto, si el sistema que queremos estudiar está sujeto a niveles significativos de variabilidad, entonces la simulación será la única herramienta potencialmente útil para poder predecir con precisión el rendimiento del mismo. Esto fue ilustrado por Robinson y Higton en 1995 cuando contrastaron los resultados de una simulación y de un análisis estático. Así, mientras que esta última predijo que cada diseño alcanzaría el rendimiento adecuado, la simulación mostró que ninguno de ellos había sido satisfactorio.
- **Supuestos restrictivos:** La simulación requiere pocas, si no ninguna suposición, aunque en ocasiones, el deseo de simplificar los modelos y la escasez de datos obliga a tener que realizarlas, pero nada comparado con las necesarias en otros tipos de modelado.
- **Transparencia:** Un ingeniero que se enfrente con un conjunto de ecuaciones matemáticas o con una gran hoja de cálculo, puede tener dificultades para creer o simplemente comprender los resultados del modelo. Sin embargo, la simulación es más atractiva en este aspecto, ya que se trata de un método mucho más intuitivo que además permite crear una visualización animada del sistema, proporcionando a la vez una mayor comprensión y confianza en el modelo.

A pesar de todo, puede darse el caso de que haya sistemas que ya pueden ser representados de forma apropiada mediante otros métodos, con lo que la simulación no será recomendada por ser un enfoque demasiado lento y por tanto se utilizará solamente como último recurso (Pidd, 1998).

Por último, es importante hacer referencia también a los motivos más convincentes para emplear la simulación en la mayoría de las empresas. Éstos son:

- **Fomentar la creatividad:** En ocasiones, las ideas más propensas a producir mejoras considerables no son nunca puestas en práctica debido al miedo al fracaso (Gogg & Mott, 1992). Por el contrario, con la simulación, las distintas alternativas pueden ser o no implementadas en un entorno libre de riesgos, lo que ayudará a fomentar la creatividad al abordar situaciones problemáticas.

- **Crear conocimiento y comprensión:** La mayoría de las veces se cree que todos los beneficios podrían haberse obtenido sin el uso de la simulación, simplemente enfocándonos en el problema con más detalle. Sin embargo, el modelo de simulación nos obliga, a veces inconscientemente, a reflexionar sobre cuestiones que de otro modo podrían no haber sido consideradas. Incluso, en ocasiones, el modelador que busca información, plantea suposiciones sobre datos y preguntas para alcanzar un mayor conocimiento del sistema, reconoce que únicamente el desarrollo del modelo, sin la necesidad de experimentación ninguna, puede crear una comprensión suficiente para lograr la mejora necesaria del sistema real (Shannon, Robert E., 1975). O como dice el viejo adagio, un problema bien planteado es un problema medio resuelto.
- **Visualización y comunicación:** En más ocasiones de las que nos gustaría, buenas ideas han sido desperdiciadas porque los beneficios asociados a las mismas no pudieron ser demostrados a un gerente superior o al encargado del proyecto. Así, las simulaciones visuales son una poderosa herramienta para la comunicación, con la que podremos convencer a los altos directivos de la validez de nuestra experimentación.
- **Creación de consenso:** Muchos estudios de simulación se realizan a la luz de diferentes opiniones sobre el camino a seguir. Por tanto, poniendo de manifiesto las distintas políticas que existan alrededor de una simulación, el modelo del sistema puede ser un medio muy útil para compartir inquietudes, probar diferentes ideas y obtener finalmente un consenso con la mejor alternativa que posibilite resolver el problema.

2.3.5. Ventajas e inconvenientes de la simulación:

Como se ha visto, la simulación de procesos no es el único método para analizar y mejorar los sistemas de operaciones. En particular, podría ser posible experimentar con el sistema real o utilizar otro enfoque de modelado (Pidd, 1998). Sin embargo, tanto recientes avances en la metodología de simulación como la gran disponibilidad de software y entornos de simulación orientados a campos específicos, con librerías preprogramadas y validadas de componentes típicos que actualmente existe en el mercado, junto con la capacidad de programación gráfica y de visualización, han hecho de esta técnica una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis y la mejora de sistemas.

Así, en un estudio realizado por Thomas y DaCosta en el que se les proporcionaban a los analistas de 137 grandes firmas una lista de herramientas y se les preguntaba cuáles de ellas usaban con más frecuencia, el análisis estadístico resultó clasificado en primer lugar con el 93% de utilización, seguido de la simulación con un 84%. Ésta se situó por delante de técnicas clásicas de investigación operativa como son la programación lineal, la teoría de colas, la teoría de inventarios o la programación no lineal.

Por todos estos motivos, la aplicación de las técnicas de simulación está irrumpiendo con fuerza permitiendo a las empresas disfrutar de diversos beneficios, como pueden ser:

- Reducción de los plazos de entrega.
- Disminución de los costes de desarrollo. Las correcciones del producto y las modificaciones realizadas cuestan mucho menos si se ejecutan durante la fase de diseño.
- Aumento de la calidad y fiabilidad del diseño, al poder estudiar diferentes escenarios y escoger las mejores soluciones en cada momento.
- Seleccionar la maquinaria más adecuada a cada proceso.
- Optimizar el diseño de todos los componentes.
- Definir distancias de seguridad.
- Calcular los tiempos de ciclo total de las operaciones.
- Evaluar las mejores alternativas de montaje y mantenimiento.
- Evaluar el flujo de materiales para optimizar los recursos productivos.
- Identificar los correspondientes cuellos de botella.
- Obtención de ahorros significativos debido a la evitación de inversiones y retrabajos innecesarios.
- Mejora de la gestión de procesos debido al incremento en la productividad y a la mayor cantidad de información y de mejor calidad para la adecuada toma de decisiones.
- Mayor agilidad a la hora de realizar análisis de procesos, comparado con el tiempo de hacerlo de forma manual.
- Mejor comprensión y entendimiento de los procesos por parte del personal técnico y de la gerencia.

Ahora bien, las ventajas que aporta la simulación de procesos de forma general son:

1. Permite el análisis y estudio de la incidencia sobre el rendimiento global del sistema de pequeños cambios realizados sobre alguno de sus componentes.
2. Permite simular fácilmente los cambios en la organización de una empresa, así como en la gestión de la información, además de analizar los efectos sobre el sistema real a partir de la experimentación con el modelo.
3. Permite explorar nuevas políticas, procedimientos operativos, reglas de decisión y flujo de información, sin interrumpir las operaciones en curso del sistema real.
4. Permite ilustrar y facilitar la comprensión de los resultados que se obtienen mediante técnicas analíticas con una perspectiva más pedagógica.
5. Permite experimentar con condiciones de operación que podrían ser peligrosas o de elevado coste económico en el sistema real.
6. Permite probar las hipótesis sobre cómo o por qué ocurren ciertos fenómenos para determinar de esa forma su viabilidad.
7. Permite experimentar con nuevos diseños físicos, de hardware o sistemas de transporte sin comprometer recursos para su adquisición.

8. Permite comprimir o expandir el tiempo, lo que proporciona la ventaja de poder investigar determinados fenómenos que no suceden con tanta regularidad.
9. Permite inferir aspectos relativos a la sensibilidad del sistema y qué variables son las que más pueden beneficiar al rendimiento del mismo, mediante la observación y experimentación de los resultados del modelo, así como los cambios en los parámetros de entrada.
10. Permite comprender cómo se comporta realmente el sistema en lugar de cómo las personas creen que funciona.
11. Permite resolver preguntas del tipo “¿*what if...*?” o ¿qué ocurriría si realizamos este cambio en...?” las cuales pueden ser útiles en el diseño de nuevos sistemas.

Aun así, a pesar de todas estas claras ventajas, hay que tener en cuenta que un modelo de simulación tiende a aproximarse a la realidad en un porcentaje cercano al 100%, por lo que no podríamos llegar a reproducirla exactamente debido además al sobrecoste que esto supondría tanto en tiempo dedicado como en los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Uno de los motivos más obvios es que desafortunadamente no se puede duplicar la realidad, ya que por definición lo que nosotros estamos creando es un modelo, el cual, si fuese prácticamente exacto, contemplaría una enorme cantidad de datos e información casi imposible de analizar y procesar, lo que provocaría que fuese muy difícil de validar alargando excesivamente el tiempo empleado en el desarrollo del proyecto.

Por otro lado, se exponen a continuación las principales aportaciones de la simulación para las empresas en el contexto de la ingeniería industrial (Banks, Carson, Nelson & Nicol, 2000):

- **Escoger correctamente:** La simulación permite probar cada aspecto de un cambio propuesto o una ampliación antes de realizar cualquier tipo de gasto económico, además de comprobar rápidamente si funcionará o no.
- **Comprimir o expandir el tiempo:** Por medio de la aceleración o desaceleración de la velocidad de ejecución del sistema simulado, se puede ver lo que ocurre en un turno entero en cuestión de minutos, o bien, dedicar varias horas a contemplar con precisión todos los eventos que en la realidad suceden en muy poco tiempo.
- **Entender el porqué:** Las empresas necesitan comprender las causas por las que cierto suceso se presenta en un sistema real. Con la simulación se puede dar respuesta a preguntas del estilo “¿Por qué...?”, reconstruyendo la escena y realizando un examen del sistema para determinar los motivos por los que se sucede dicho fenómeno de una manera rápida y precisa.
- **Explorar posibilidades:** Una de las grandes ventajas del uso de la simulación es que, una vez que se haya realizado un modelo de aquello que interesa analizar, se pueden explorar fácil y rápidamente diferentes políticas, procedimientos de operación o nuevos métodos sin el

elevado coste, la pérdida de tiempo y la desorganización que conllevaría el realizarlo en el sistema real.

- **Diagnosticar los problemas:** Los procesos de una planta de fabricación industrial o de una empresa de servicios son muy complejos, por lo que resulta prácticamente imposible considerar todas aquellas restricciones que aparecen en un momento dado. Sin embargo, la simulación posibilita comprender estas interacciones e interdependencias entre los componentes que conforman un sistema complejo. Así, el diagnóstico de los problemas y sus correspondientes efectos, unido a una clara visión del comportamiento de las variables, incrementa el conocimiento de los fenómenos que son realmente importantes para el buen desempeño de todos los subprocesos de la empresa.
- **Identificar las restricciones:** Los cuellos de botella en la producción provocan grandes problemas y retrasos en la entrega de los productos. En este caso, las técnicas de simulación, permitirán descubrir fácilmente la causa de las demoras en el manejo y transporte de materiales, en la producción, en la información o en cualquier proceso en general.
- **Visualización del modelo en 3D:** Los software de simulación que cuentan con esta característica permiten obtener con máximo detalle todo el sistema de la planta de producción en la pantalla de un ordenador, por lo que también se pueden incluir en el modelo. La animación del mismo posibilita ver cómo se mueven los operarios con el material, cómo están trabajando, el movimiento de las grúas, camiones y carretillas o el traslado del producto por medio de cintas transportadoras. Asimismo, se puede verificar en tiempo real de simulación por medio de gráficas y valores, el inventario en proceso, el nivel de los almacenes, el nivel de ocupación de cada actividad, si las máquinas están operando, en espera o averiadas, los costes de producción y cualquier otra información que se requiera.
- **Consensuar las soluciones:** El uso de las herramientas de simulación para presentar los cambios o modificaciones realizadas de cualquier clase permite ilustrar los resultados y conclusiones de una forma mucho más objetiva. Así, las gráficas y el respaldo estadístico respaldarán las ideas y recomendaciones y aumentarán la seguridad en los resultados que se lograrán con la implementación. Además, se podrán seleccionar aquellos proyectos o cambios que realmente conlleven los resultados más convenientes como, por ejemplo, el incremento de la producción, el mantenimiento de otro nivel de inventario o la reducción del tiempo de espera para un determinado servicio.
- **Preparación para el cambio:** Todos sabemos con certeza que el futuro siempre implica nuevos cambios. Por tanto, tener la respuesta a preguntas como ¿Qué pasaría si...? Es sumamente útil, tanto para el diseño de nuevos sistemas como para el replanteamiento de los ya existentes actualmente.
- **Mejora continua del equipo de trabajo:** Los modelos de simulación pueden proveer de una mejora continua excelente cuando son diseñados con esta finalidad, de forma que el equipo de trabajo introduzca los factores de decisión en dicho modelo. Así, los ingenieros podrán ver los resultados de sus decisiones para trabajar de la mejor manera posible, lo que, a su vez, es

mucho menos costoso y más rápido que si se aprende por medio de la experimentación sobre el proceso real.

- **Especificar requerimientos:** Un modelo puede ser también utilizado para determinar las especificaciones en el diseño de un sistema con el fin de alcanzar un objetivo concreto. Por ejemplo, en una sección para la que no conocemos las especificaciones necesarias para un tipo particular de máquina, mediante la simulación podremos determinar dichas capacidades o requerimientos de una forma rápida y sencilla.
- **Optimizando:** Muchos de los software de simulación cuentan con un módulo de optimización en el que se originarán o crearán las diferentes alternativas o escenarios sin tener que estar efectuando pruebas en el modelo, para finalmente escoger la más conveniente.
- **Aplicación en todas las áreas de la empresa:** Por último, una de las ventajas que presenta la simulación es la gran variedad de ámbitos en los que puede utilizarse, así, por ejemplo, podemos emplearla como herramienta de ayuda mediante la programación de la producción, la evaluación de inversión en equipo, la reducción de inventario en proceso, como políticas de mantenimiento, el manejo de materiales, la definición del layout de la planta, Just in Time, la planificación de capacidad, los retrabajos, el balanceo de líneas de producción, la evaluación de la tecnología, la asignación de recursos, la reducción del tiempo de ciclo, la administración de inventario y material, la distribución del transporte, asignación de rutas, proceso de órdenes, control de calidad, niveles de servicio a clientes, fiabilidad y disponibilidad, así como soporte de los productos y costes.

Por último, como en todo método de análisis de un sistema físico o de cualquier herramienta en general y, a pesar de todo lo comentado anteriormente, existen una serie de problemas o desventajas derivadas del uso de la simulación que no deben ignorar:

1. **La construcción de modelos requiere un entrenamiento especial:** La simulación es un arte que se aprende con el tiempo y a través de la experiencia y que requiere habilidades como el modelado conceptual, la validación de resultados, estadística o el trabajo en grupo para la gestión de proyectos, más que el simple desarrollo en una computadora de un programa o el uso de un paquete de software. Como consecuencia, se puede comprobar que, si dos individuos competentes diseñan cada uno de ellos un modelo a partir de un mismo sistema, éstos tendrán similitudes, pero es muy poco probable que sean prácticamente iguales.
2. **Los resultados de la simulación pueden ser difíciles de interpretar:** Como la gran mayoría de los parámetros de salida de un modelo son variables basadas fundamentalmente en entradas aleatorias, puede resultar complicado determinar si un determinado evento es producto de las interacciones del sistema o de dicha aleatoriedad.
3. **El análisis de la simulación puede consumir mucho tiempo y dinero:** Ya se ha comentado que la simulación es un método de enfoque bastante lento, lo que se traduce en unos beneficios no inmediatos y en un todavía mayor aumento del precio, debido a que el software de simulación no es especialmente barato y el coste del desarrollo del modelo

puede ser también considerable, particularmente si los analistas y consultores deben ser empleados. Además, la omisión de recursos para la modelización y análisis puede dar como resultado un modelo de simulación que no es suficiente para cumplir los objetivos acordados.

4. **Datos hambrientos:** La mayoría de los modelos de simulación requiere de un gran volumen de datos, que puede no estar siempre disponible de inmediato y en el lugar adecuado, por lo que se requerirán numerosos análisis y mucho más tiempo.
5. **La simulación puede ser utilizada de manera inapropiada:** En algunos casos, es común hacer uso de ella cuando la solución analítica es posible o incluso preferible. Esto es particularmente cierto en la simulación de algunas líneas de espera que son estudiadas mediante modelos de colas cerrada en donde el número de clientes que hay en el sistema es constante.
6. **Sobreconfianza:** Existe el peligro de creer que cualquier operación que se realice con la ayuda de una computadora está necesariamente bien realizada. Con la simulación, esta situación se agrava todavía más, ya que la animación del modelo puede dar una apariencia de realismo. Por lo tanto, al interpretar los resultados, se debe considerar la validez del modelo subyacente y las suposiciones y simplificaciones que hayan realizado.

Sin embargo, en defensa de la simulación estas desventajas se pueden compensar de la siguiente manera:

- **Simuladores:** Los vendedores de software de simulación han estado desarrollando recientemente paquetes que contienen modelos que solamente necesitan algunos datos de entrada para su operación conocidos como simuladores o plantillas.
- **Análisis de salida:** La mayoría de los vendedores de software de simulación han implementado mejoras en la capacidad de salida del modelo incorporándolas dentro de sus paquetes para así posibilitar un análisis mucho más extenso. Esto reduce los requisitos computacionales necesarios por parte del usuario, aunque deban comprender mínimamente el procedimiento.
- **Más y más rápido:** La simulación se puede realizar más rápidamente hoy que ayer, y probablemente más lento que mañana. Esto es atribuible a los avances en hardware que permiten un funcionamiento y visualización cada vez más rápida de los escenarios, aunque también se puede relacionar con la mejora en los paquetes de simulación, los cuales muchos de ellos contienen construcciones para modelar el manejo de materiales mediante el uso de cintas transportadoras o vehículos guiados automatizados.
- **Limitaciones de los modelos de forma cerrada:** Este tipo de modelos no son capaces de analizar la mayoría de los sistemas reales más complejos que se encuentran en la práctica y, de hecho, aún no se ha encontrado ningún problema que pudiera resolverse de esta forma.

2.3.6. ¿Cuándo la simulación es o no apropiada?

La disponibilidad de lenguajes de simulación de propósito general, de capacidades de computación masivas que disminuyen el coste de las operaciones y los avances en las metodologías de modelado, han hecho que la simulación sea una de las herramientas más ampliamente utilizadas en la investigación, experimentación y análisis de sistemas. Sin embargo, las circunstancias en las que debe implementarse han sido discutidas por numerosos autores. En general las condiciones de utilización son las siguientes (Shannon, Robert E., 1975):

1. No existe formulación matemática completa del problema, o no se han desarrollado todavía los métodos analíticos para resolverlo.
2. Existen los métodos analíticos, pero las hipótesis simplificadoras, necesarias para su aplicación, desvirtúan las soluciones obtenidas y su interpretación.
3. Existen los métodos analíticos y en teoría están disponibles, pero los procedimientos numéricos son tan arduos y complejos que la simulación constituye un método mucho más sencillo para obtener una solución.
4. Existen los métodos analíticos y en teoría están disponibles, pero los procedimientos numéricos son tan arduos y complejos que la simulación constituye un método mucho más sencillo para obtener una solución.
5. Es deseable observar una historia simulada del proceso dentro de un horizonte temporal dado para poder estimar ciertos parámetros.
6. La simulación constituye la mejor alternativa por la dificultad de realizar experiencias en el contexto real.
7. Es necesario realizar una compresión o expansión temporal para estudiar la evolución del sistema a largo o a corto plazo respectivamente.

Asimismo, la simulación puede utilizarse para los siguientes propósitos:

- Permitir el estudio y la experimentación con las interacciones internas de un sistema complejo o de un subsistema dentro del mismo.
- Pueden simularse cambios informativos, organizativos y ambientales, y el efecto de estas modificaciones se puede observar en el comportamiento del modelo.
- El conocimiento adquirido durante el diseño de un modelo de simulación podría ser de gran valor para sugerir mejoras en el sistema que se está investigando.
- Cambiar las variables de entrada y observar los resultados obtenidos puede generar información muy valiosa sobre qué variables son las más importantes y como interactúan entre ellas.

- Puede utilizarse como un dispositivo pedagógico para reforzar las metodologías que conllevan una solución analítica.
- Puede utilizarse para experimentar con nuevos diseños o políticas antes de la implementación de las mismas, a fin de prepararse para lo que pueda ocurrir.
- Puede usarse para verificar las soluciones analíticas.
- Los modelos de simulación diseñados para experimentar hacen posible el aprendizaje sin el coste y la interrupción de cualquier instrucción de trabajo.
- La animación muestra un sistema operando para que todo el plan se pueda visualizar correctamente.
- Algunos sistemas de fabricación o de organización de servicios son tan complejos que sus interacciones internas solo pueden tratarse mediante simulación.

A pesar de todo, existen un conjunto de reglas para evaluar cuando la simulación no es la herramienta apropiada para enfocar un problema (Banks & Gibson, 1997):

1. Si el problema puede resolverse mediante el sentido común.
2. Si el problema puede resolverse analíticamente.
3. Si es más fácil realizar experimentos directos.
4. Si los costes superan a los ahorros.
5. Si los recursos o el tiempo no están disponibles.
6. Si no hay datos disponibles o ni siquiera estimaciones.
7. Si no se puede validar ni verificar el modelo, esto es, si el tiempo o el personal no están disponibles.
8. Si los gerentes tienen expectativas irrazonables o se sobreestima el poder de la simulación.
9. Si el comportamiento del sistema es demasiado complejo o no se puede definir adecuadamente.

2.3.7. Lenguajes de simulación:

Una de las decisiones más importantes que ha de tomar un modelador o analista para la realización de un estudio de simulación de sistemas discretos es la selección del lenguaje en el cual va a programar el modelo. Éste se escogerá en base al atractivo de sus características, aunque hay una de ellas que resulta determinante e impone la naturaleza del mismo, ésta es la estrategia, enfoque o visión del mundo la cual es inherente al propio lenguaje y que se utiliza para la elección del “suceso siguiente” así como, para la gestión del tiempo.

Así, la codificación de un modelo en términos de lenguaje de programación, ya sea de propósito general o especial para la simulación, pone de manifiesto una serie de características comunes a todos ellos (Fishman, 1978):

1. La generación de muestras de números aleatorios uniformemente distribuidos en (0,1).
2. La generación de muestras de variables aleatorias con distribuciones específicas.
3. Los mecanismos de control y flujo del tiempo durante la simulación.
4. La determinación del suceso que ha de ser tratado a continuación del que lo está haciendo.
5. La adición, supresión o actualización de registros en estructuras de datos ad hoc.
6. La recolección y el análisis de los datos generados por la simulación.
7. La elaboración de informes sobre los resultados obtenidos.
8. La detección de condiciones de error.

La existencia de éstos y otros factores comunes a la mayor parte de los programas de simulación es lo que ha conducido al desarrollo de los lenguajes de propósito general, cuyo perfeccionamiento, estandarización y accesibilidad han sido los principales motivos del incremento que ha experimentado el uso de la simulación en estos últimos años.

Por último, y como decisión en el diseño de nuestra simulación, la elección del lenguaje con el que se implementará el modelo presentará ciertas ventajas sobre otros de propósito general, y por supuesto, también conllevará una serie de inconvenientes.

Como ventajas, podemos destacar:

- Proporcionan automáticamente la mayoría de los elementos necesarios en la programación de modelos de simulación, con la siguiente disminución del tiempo requerido para su desarrollo.
- Proporcionan un entorno natural de desarrollo para modelos de simulación.
- Los modelos de simulación son más fáciles de modificar cuando están desarrollados en un lenguaje propio y familiar.
- Disminuyen la probabilidad de cometer errores, por ser necesario escribir menos líneas de código.
- Facilitan la detección de errores ya que existe una serie de errores potenciales, ya identificados, cuya comprobación es automática.

Asimismo, existen ciertos inconvenientes:

- Todo programador conoce algún lenguaje de propósito general, pero no necesariamente uno de simulación, lo que implicará un esfuerzo de aprendizaje.

- Son lenguajes usualmente caros y no suelen estar disponibles para todos los sistemas operativos.
- En general, un programa escrito en un lenguaje de propósito general requiere menos tiempo de ejecución que uno escrito en un lenguaje de simulación.
- Pueden aparecer problemas si se intentan solventar necesidades diferentes a las comunes; sin embargo, los lenguajes de propósito general permiten una mayor flexibilidad.

2.3.8. Simulación de eventos discretos:

En la actualidad, la mayor parte de las organizaciones, empresas y procesos productivos han crecido en complejidad y han presenciado la necesidad de un aumento en los requerimientos de competitividad, flexibilidad y calidad en sus actividades, por lo que han debido innovar y adaptarse a los constantes cambios provocados por su pertenencia a un mercado cada vez más global. Así, posiblemente influenciadas por las nuevas tendencias en el sector, muchas empresas se han visto involucradas en un proceso de reingeniería de su proceso productivo.

La falta de herramientas analíticas que ayuden y faciliten la toma de decisiones es uno de los principales problemas con los que se encuentran los directivos, los cuales ven la necesidad de mejorar el rendimiento de aquellos sistemas cuyo comportamiento depende de un número elevado de variables. Por tanto, determinar variaciones en los procedimientos, en las reglas que utilizan los distintos departamentos en la toma de decisiones, en los flujos de información, así como cambios en la organización y en las políticas de funcionamiento tradicionales de la empresa, son tareas que deben ser realizadas para reaccionar ante perturbaciones y adaptarse a los cambios del mercado a los que se ven constantemente sometidos. Sin embargo, la dificultad que comportan estos procesos se hace evidente en una gran diversidad de campos en los que, prácticamente, se desconoce la influencia de determinados cambios en algunas variables sobre el rendimiento global de la empresa.

El problema es todavía más complicado cuando se pretende optimizar, o en su caso mejorar, el rendimiento de un sistema que presenta un comportamiento estocástico, el cual es predecible desde un punto de vista estadístico, a partir de cambios en la logística del mismo. Ésta, además, suele contemplar no solo las fluctuaciones estadísticas, sino también las distintas situaciones que se derivan de la dependencia entre sucesos.

Sin embargo, las herramientas de simulación orientadas a eventos discretos ofrecen una plataforma que permite abordar con éxito un proceso de mejora continua en estos sistemas complejos para los cuales las técnicas analíticas clásicas basadas en el uso de cálculo diferencial, teoría de probabilidades y métodos algebraicos, no pueden ser utilizadas para formalizar de modo sencillo la complejidad de los procesos.

Así, la simulación de procesos industriales, basada más concretamente en la simulación de eventos discretos (DES), es una técnica que permite crear modelos dinámicos de una fábrica o de un sistema logístico, que posteriormente servirán para analizar el comportamiento de ese modelo en diferentes circunstancias, analizando los posibles cambios y sus consecuencias, de tal manera que permite comprobar las hipótesis antes de implementarlas en la realidad.

Como se comentó anteriormente, en este tipo de simulación, solo los momentos en los que el estado del sistema cambia están representados, por lo que el proceso se modela como una serie de eventos, que aparecen en determinados instantes de tiempo cuando el sistema sufre alguna modificación. Éstas no aparecen periódicamente, si no que vienen determinadas por variables de estado aleatorias, por lo que los resultados estarán influenciados también por esta característica. Por lo tanto, estaremos hablando de modelos dinámicos, discretos y estocásticos, lo que da origen a los denominados modelos de simulación de eventos discretos, que nos permitirán capturar la aleatoriedad y la operatividad de nuestro sistema.

Estos modelos están caracterizados por ciertos elementos de interés, como son:

- 1. Entidades:** Son el conjunto de componentes y objetos que constituyen o fluyen por el sistema, tales como piezas, máquinas, equipos de transporte o clientes. Pueden ser temporales o permanentes, e incluyen también a todos aquellos recursos que nos permiten mantener la coherencia con los múltiples formalismos empleados en el proceso de abstracción del sistema. Entidades diferentes pueden tener características diferentes que denominaremos atributos, como por ejemplo el precio, la prioridad, el estado o el tamaño.
- 2. Entidades temporales:** Son los objetos que se procesan en el sistema como por ejemplo las piezas, los clientes o los documentos y cuya principal característica es que se crean y se destruyen a lo largo de la simulación, es decir, llegan, se procesan y salen del sistema.
- 3. Entidades permanentes o recursos:** Son los medios gracias a los cuales se pueden ejecutar las actividades, como máquinas, elementos de transporte u operarios y cuya principal característica es que son elementos estáticos en cuanto que su número no aumenta ni disminuye a lo largo de la simulación. Los recursos definen quién o qué ejecuta la actividad, y suelen parametrizarse por características tales como capacidad, velocidad o tiempo de ciclo.
- 4. Actividades:** Son las tareas o acciones que tienen lugar en el sistema normalmente encapsuladas entre dos eventos y que precisan del uso de recursos como, por ejemplo, la reparación de una máquina, el procesado de una pieza o el transporte de un cliente. La mayoría de ellas involucran a más de un tipo de entidad, y, por lo tanto, su inicio estará condicionado por la presencia de todas estas entidades. Un aspecto esencial de las actividades es su duración, la cual, a pesar de no ser un valor constante por tratarse de procesos estocásticos, tiene que ser conocida para que el simulador pueda determinar el instante en el que la actividad finalizará. Por tanto, en estos casos en los que la duración no es constante, el momento de finalización puede determinarse a partir de la distribución de probabilidad que modela la duración prevista.
- 5. Atributos:** Permiten caracterizar a las entidades, así como a toda aquella información que fluye en el sistema junto con las mismas, ya sea la posición donde se encuentra la pieza o los resultados de los controles de calidad. Cada uno de ellos corresponde a una propiedad determinada como, por ejemplo, el precio, la prioridad o el tamaño y son imprescindibles para el control del flujo de entidades en el sistema, además de para la extracción de las mismas de una cola, la cual se puede realizar por orden del atributo prioridad.

6. **Colas:** Estas estructuras quedan determinadas a partir de una colección de entidades, generalmente temporales, ordenadas de una forma lógica, las cuales sufren un retardo de duración indeterminada.
7. **Eventos:** Acciones instantáneas que no consumen tiempo y que pueden modificar el valor de las variables de estado, conteniendo éstas toda la información asociada al sistema necesaria para evaluar su comportamiento. Normalmente, más de una actividad comienza o finaliza con cada evento. Éstos se pueden clasificar en primer lugar según la causa de su ocurrencia, en no condicionados o condicionados. En relación a estos últimos, es necesario que se cumplan una o más condiciones para que se activen; sin embargo, los no condicionados, ya están planificados para su ejecución y no dependen de ninguna premisa. Además, se pueden dividir también en endógenos o internos y en exógenos o externos. Respecto a los primeros, son causados por condiciones en el modelo como, por ejemplo, la finalización de una operación, mientras que los otros son externos al modelo, como puede ser, por ejemplo, la llegada de una pieza.

Finalmente, se exponen algunos de los diferentes campos de aplicación de estas técnicas de simulación orientadas a eventos discretos tal y como podemos comprobar si realizamos una rápida consulta a los artículos publicados en la *Winter Simulation Conference* (WSC) en los últimos años.

- **Procesos de fabricación:** Es una de las primeras ramas beneficiadas por estas técnicas, las cuales se emplearán tanto para el diseño como para la ayuda a la toma de decisiones operacionales.
- **Logística:** La simulación contribuye de forma significativa a la mejora de los procesos logísticos en general como pueden ser una cadena completa de suministros o la gestión de inventarios de un almacén.
- **Transporte:** Ya sea por ferrocarril, por carretera o por vía aérea y ligado o no a decisiones logísticas, dentro de esta área, la intermodalidad entendida como interconexión de diferentes medios de transporte, ha merecido especial atención en los últimos años.
- **Sanidad:** Se emplea para la mejora tanto de un departamento hospitalario, como en la logística asociada a los trasplantes o a la coordinación médica en una región determinada.
- **Negocios:** Como simulación de los procesos administrativos y de negocio de una empresa.
- **Construcción:** Para la planificación de la construcción en obra civil o la gestión de recursos.
- **Emergencias:** La simulación puede usarse también para la gestión de las emergencias, como es el diseño de planes de evacuación en edificios o recintos públicos.
- **Servicios en general:** En servicios públicos, gestión de restaurantes, banca o empresas de seguros.

2.4. ExtendSim como herramienta de simulación:

Debido a que la simulación y posterior optimización que se va a realizar en este proyecto se va a llevar a cabo en el software de simulación *ExtendSim*, es fundamental explicar cómo funciona esta herramienta, así como dar una breve introducción a su interfaz de trabajo.

ExtendSim es un potente software de simulación de vanguardia que nos ofrece la oportunidad de desarrollar modelos dinámicos de procesos reales existentes o propuestos en una amplia variedad de campos. Nos permite, por tanto, explorar como interactúan y se relacionan entre ellos, para luego modificar las suposiciones creando diferentes escenarios y alcanzando la solución óptima, de forma que satisfagamos nuestras necesidades empresariales, industriales o académicas.

Es una herramienta fácil de utilizar, pero a la vez, extremadamente útil para simular procesos y que nos ayuda a comprender sistemas complejos con el fin de producir mejores resultados y más rápido. Así, nos permite predecir el curso y las consecuencias de llevar a cabo ciertas acciones, obtener información y estimular el pensamiento creativo, visualizar los procesos lógicamente en un entorno virtual, identificar áreas problemáticas antes de la implementación, explorar los efectos potenciales de las modificaciones, evaluar ideas e identificar ineficiencias, optimizar las operaciones, comunicar la integridad y viabilidad de los planes, o simplemente, comprender por qué ocurren los eventos observados.

Algunas de las características principales que posibilitan la simulación además de todas las funciones descritas anteriormente son:

- Un conjunto de bloques que le permiten diseñar modelos rápidamente.
- Una interfaz gráfica personalizable que describe las interacciones dentro del sistema.
- La descomposición jerárquica ilimitada hace que los modelos sean fáciles de construir y de comprender.
- Los diálogos y la base de datos integrada para cambiar los valores dentro del modelo permiten probar diferentes alternativas mucho más rápido e interactuar dinámicamente con el modelo.
- La animación en 2D o 3D del modelo permite una mejor visualización y presentación del modelo.
- Un entorno con todas las características para crear interfaces de usuario fáciles que simplifican la interacción y mejoran la comunicación con el modelo.
- La capacidad de ajustar la configuración de forma dinámica mientras se ejecuta la simulación.
- Un editor para crear ecuaciones personalizadas.
- La capacidad de crear nuevos bloques e iconos personalizados.
- Escalabilidad completa por estar limitado el tamaño del modelo únicamente a las características de nuestra computadora.
- Capacidad de contabilizar costes basados en las actividades.
- Conectividad total e interactividad con otros programas y plataformas.

Además, su arquitectura robusta agrega ciertas características avanzadas que convierten a este sistema de simulación en uno de los más escalable que hay disponible. Éstas son:

- Presenta un entorno multidominio para que se pueda modelar dinámicamente sistemas continuos, de eventos discretos, de velocidad discreta, lineales, entre otros.
- Los bloques que se construyen pueden guardarse en bibliotecas y reutilizarse fácilmente en otros modelos.
- Un lenguaje de programación compilado e integrado, así como un editor de diálogo optimizado para simulación.
- Un soporte integrado para acceder al código creado en otros lenguajes de programación.
- Más de 1.000 funciones que permiten la integración, la estadística, matrices, depuración, la manipulación de cadenas y bits o la definición de tus propias funciones.
- Soporte completo para una amplia gama de tipos de datos y estructuras como arrays, listas enlazadas y datos en cadena.

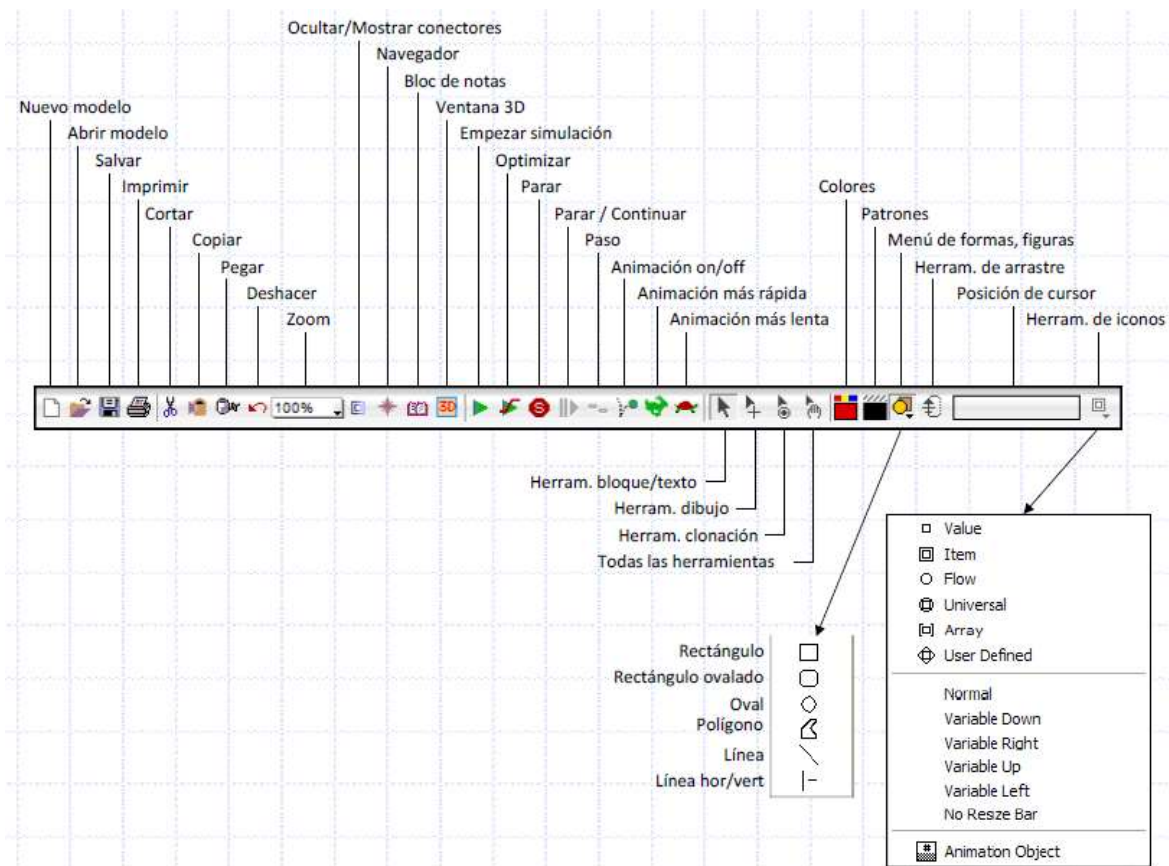


Figura 7: Interfaz gráfica de ExtendSim. (Fuente: <http://www.qii.udc.es/>)

2.5. La industria maderera en Galicia:

El sector de la madera o forestal incluye las actividades industriales que se ocupan del procesamiento de la madera, desde su plantación hasta su posterior transformación en objetos de uso práctico, pasando por la extracción, el corte, el almacenamiento y el tratamiento bioquímico y moldeo.

Los principales ejes en los que se asienta este sector son:

- 1. Silvicultura y explotación forestal:** Comprende la producción de madera y de leña, la extracción y recolección de los productos forestales silvestres no madereros, así como los servicios de apoyo a la silvicultura. Constituye la base principal sobre la que se asienta la cadena forestal y de la madera.
- 2. Actividades de primera transformación:** Se pueden dividir a su vez en dos ramas, la industria de la madera y la corteza o la industria del papel. La primera de ellas comprende la madera aserrada, la fabricación de tableros y chapas, la fabricación de vigas, puertas, ventanas, estructuras de madera para la construcción de envases y embalajes de madera, entre muchas otras. La segunda abarca la fabricación de pasta papelera, papel y productos de papel transformado.
- 3. Actividades de segunda transformación:** Al igual que las de primera transformación, están formadas por todas aquellas operaciones que se realizan en la industria de la madera y de la corteza, o bien de la industria del papel. Sin embargo, en este caso hay que tener en cuenta también la fabricación de muebles, que además de recoger las actividades de fabricación de los mismos, incluye la de productos afines sin ser directamente mobiliario.

A nivel gallego, según los datos de ARDÁN, el sector de la madera o forestal está constituido por 730 empresas, la mayoría de las cuales se encuentran en las provincias de A Coruña (41%) y Pontevedra (31%) y realizan actividades de primera o segunda transformación.



Figura 8: Distribución geográfica de las empresas del sector forestal en Galicia. (Fuente: ARDÁN)

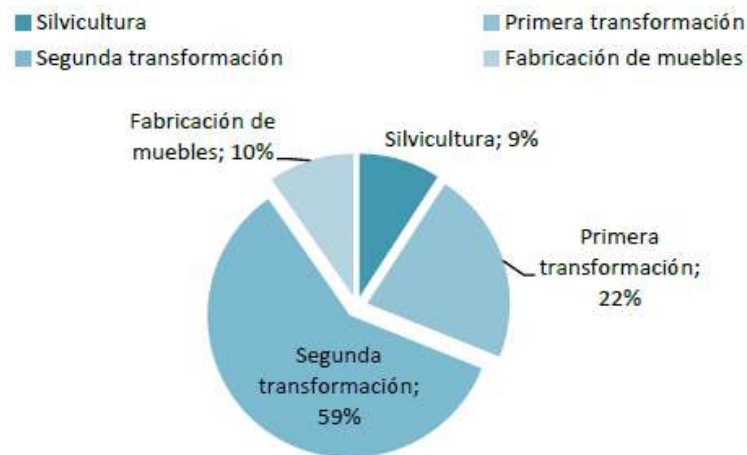


Figura 9: Distribución por cadena de valor de las empresas del sector forestal en Galicia. (Fuente: ARDÁN)

Además, en la mayoría de los casos (96% aproximadamente) son empresas pequeñas donde el número de empleados suele ser inferior a 50. Respecto al volumen de facturación, un 83,4% presenta unos ingresos anuales inferiores a 2.000.000 €.

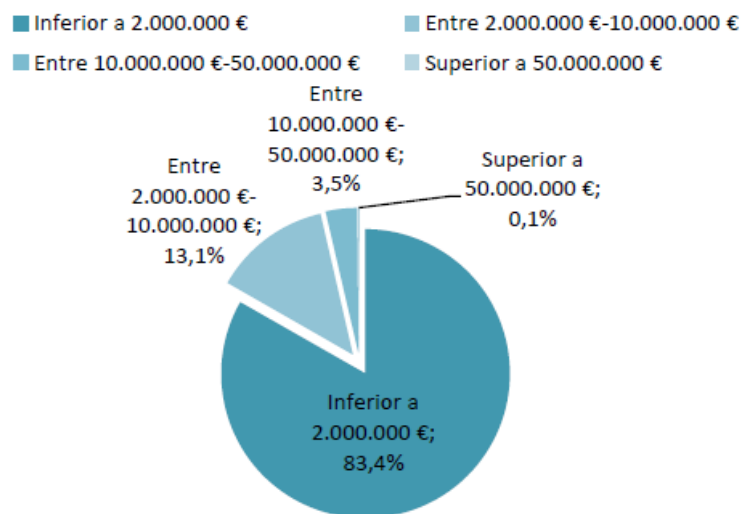


Figura 10: Distribución por volumen de facturación de las empresas del sector forestal en Galicia. (Fuente: ARDÁN)

2.5.1. Productos de la cadena forestal:

Por otro lado, los productos que se obtienen a partir de esta cadena forestal anteriormente descrita, son los siguientes (Instituto Galego de Estadística, 2013):

- Productos y servicios forestales tales como plantas forestales, madera, leña y servicios de apoyo a la silvicultura como la prevención de incendios forestales, la lucha contra las plagas, etc.

- Madera aserrada y cepillada como la madera aserrada, traviesas, madera, serrín y servicios de secado, impregnación y tratamiento químico de la madera.
- Pasta de papel, papel y cartón.
- Artículos de papel y cartón como sacos, bolsas o cajas de papel y cartón y artículos de papel y cartón para uso doméstico, sanitario e higiénico.
- Muebles de cocina, oficina, somieres, etc.

El sector forestal y de la madera en Europa camina hacia la bioeconomía, como consecuencia de la madurez del mercado de productos forestales actuales y a la necesidad creciente de utilizar productos renovables. Así, esta bioeconomía en Europa se valora en 2 billones de euros de facturación anual y en 22 millones de empleos (9% del empleo europeo), representando así, el sector forestal y de la madera, más del 20%.

Según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en su estudio “Diagnóstico del Sector Forestal Español”, España se sitúa en segundo lugar dentro de la Unión Europea en lo que a superficie forestal se refiere, con 27,7 millones de hectáreas, solamente precedida de Suecia. Además, la industria de la madera y el mueble española cuenta con 23.374 empresas, concentrándose la producción fundamentalmente en Galicia, Cataluña y la Comunidad Valenciana. En el año 2015, 164.000 profesionales trabajaron en esta industria y la cifra de negocio se situó en 9.646 millones de euros, representando en la actualidad el 1,72% del total del sector industrial nacional.

De acuerdo a los datos del Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4), Galicia tiene una extensión próxima a 3 millones de hectáreas, de las cuales cerca del 70% tiene un uso forestal, mientras que en el ámbito nacional ésta solo representa un 50% del total de la superficie. Así, en relación a la titularidad de dicha superficie, Galicia presenta una particular distribución de la propiedad forestal que incide de manera clara en su gestión, de forma que el 31% de la superficie forestal gallega corresponde a montes vecinales en mano común, mientras que tan solo el 1% son de titularidad pública.

Por tanto, Galicia se convierte en la novena potencia forestal europea, liderando el sector a nivel nacional y representando el 50% de la madera que se corta en España, así como el 3,5% del PIB de la comunidad. En términos de explotación, el volumen de cortas con destino industrial realizadas en los montes gallegos asciende a 8,25 millones de metros cúbicos. En cuanto a especies, el eucalipto se consolida por encima de la mitad del total de las cortas de madera, seguido por las coníferas.

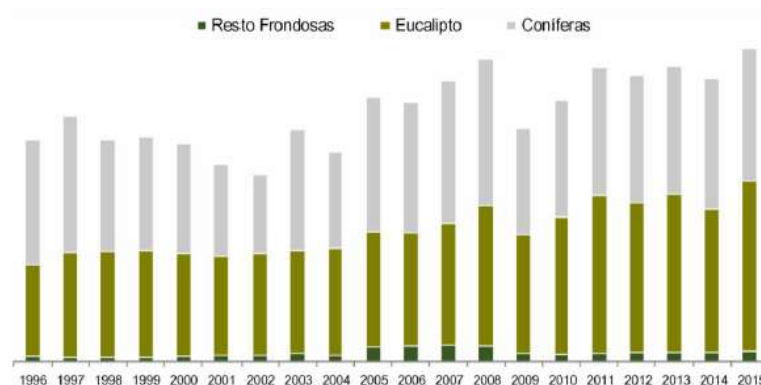


Figura 11: Evolución de las cortas de madera en los montes gallegos. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)

El sector gallego de la madera y el mueble cuenta, por lo tanto, con unas 3000 empresas, las cuales facturan en torno a 1.941 millones de euros y proporcionan empleo a aproximadamente unas 70.000 personas, lo que constituye el 6,6% de la población activa de Galicia, la cual se convierte en líder en exportaciones de madera a nivel nacional con 768,1 millones de euros, representando el 3,5% del producto interior bruto (PIB) de la comunidad gallega.

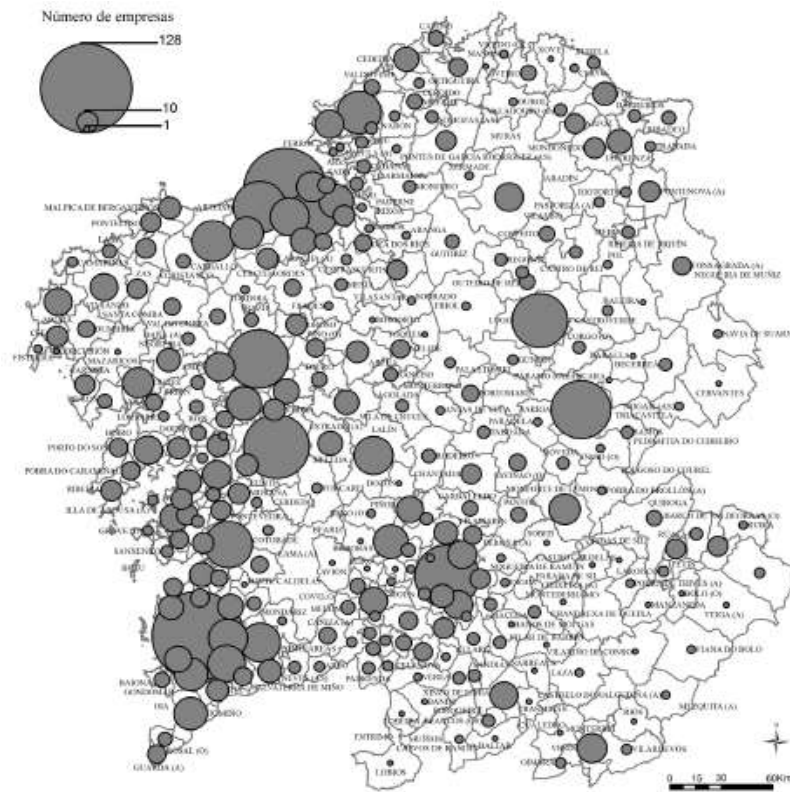


Figura 12: Distribución territorial de las empresas transformadoras de la madera en Galicia. (Fuente: IGE)

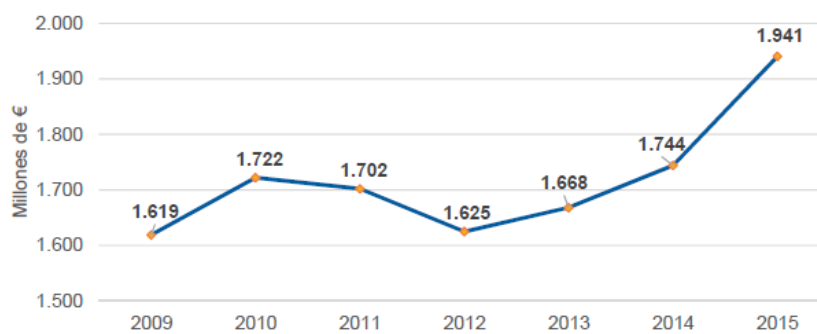


Figura 13: Evolución de la facturación del sector de la madera. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)

En relación a la primera transformación, se tiene que las actividades de aprovechamiento forestal, aserrado, pasta y tablero mejoraron su volumen de negocio en 2015 con respecto a 2014, facturando 1.555 millones de euros. Así, los rematantes facturaron un 5%, el aserrado aumentó su producción en un 3% y se produjo un incremento del 20% en la facturación conjunta de los sectores del tablero y pasta de papel, cifras que no incluyen las ventas de otros productos no directamente pertenecientes a la cadena principal de transformación de la madera, pero que sí incrementarían del

impacto del sector económico. Por otro lado, en lo relativo a las empresas de la segunda transformación de la madera, su facturación se incrementó también en el año 2015 un 7,8% respecto al anterior. Además, es necesario tener en cuenta que la industria de primera transformación gallega genera el 40% de la producción española de tableros y madera serrada, así como el 20% de pasta de papel. No obstante, las tradicionalmente denominadas segundas transformaciones que comprenden las actividades de carpintería y mobiliario, no superan el 8% de la cuota española.

En relación a las exportaciones nacionales, en 2015, el sector de la madera y el mueble exporto por valor de 3.210 millones de euros, un 10% más que en 2014, de las cuales casi el 50% se encuentran destinadas a Portugal, Francia y Reino Unido. Así, las comunidades autónomas de Cataluña, Comunidad Valenciana y Galicia son las más exportadoras. Concretamente, Galicia, con 578,9 millones de euros se sitúa en tercera posición dentro del ranking nacional, sin tener en cuenta las exportaciones de papel y pasta que ascienden a 189,2 millones de euros, y que constituyen el principal producto de madera que se exporta, seguida de mobiliario y tablero de fibras.

<i>Exportación productos de madera y mueble en Galicia</i>		
Principales países	2014	2015
Portugal	212,7	157,3
Francia	58,6	59,1
Reino Unido	35,8	44,3
Países Bajos	26	39,5
Marruecos	24	25,4
Italia	15,2	20
México	14,5	25
Alemania	14,1	13,2
Irlanda	11,8	13,5
EEUU	9,2	15,4

Figura 14: Exportaciones de productos de madera y muebles en Galicia. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)

Así, en las economías locales de la comunidad gallega, resulta de especial importancia esta industria, puesto que el sector forestal y transformador de la madera representa el 30% del total de las industrias asentadas en 52 ayuntamientos y supone más del 50% del empleo (Instituto Galego de Estadística, 2013). En este sentido, el peso de dicho sector en la economía de Galicia se incrementa hasta el 9,9% del valor añadido industrial y el 12,4% del empleo.

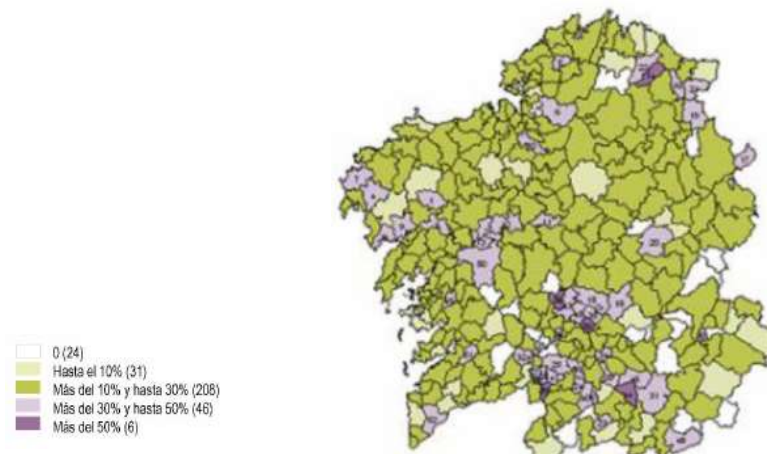


Figura 15: Porcentaje de industria forestal sobre el total de industrias asentadas. (Fuente: Instituto Galego de Estadística)

Además, la importancia cualitativa del sector aumenta todavía más al considerar las numerosas cadenas laterales y los proveedores de bienes y equipos, suministros complementarios, servicios de investigación e infraestructuras asociadas. Por tanto, un incremento en la cadena principal no solo provoca una elevación del empleo en esa rama, sino también en el resto.

Por otro lado, en relación a los sistemas de certificación forestal, que tratan de garantizar una gestión ambientalmente sostenible, socialmente responsable y económicamente viable, se tiene que en Galicia operan, desde hace más de una década, dos sistemas de certificación forestal reconocidos internacionalmente, como son el PEFC y FSC, los cuales han incrementado su presencia a través del papel activo de asociaciones y empresas de servicios en los últimos años.



Figura 16: Sistema de certificación forestal PEFC. (Fuente: <http://www.pefc.es/>)

2.5.2. Cadena de valor:

La madera aprovechada en los montes gallegos se basa en una compleja cadena de valor que comienza en las actividades de silvicultura y apoyo a la misma. Éstas proporcionarán la materia prima necesaria (madera en rollo) para los procesos industriales, subproductos para la producción energética, además de muchos otros usos. Así, por ejemplo, a partir de la madera en rollo, llevarán a cabo las actividades de primera y segunda transformación, con objeto de obtener los productos relacionados con el embalaje, carpintería, muebles y papel, fundamentalmente.

Asimismo, es importante también tener en cuenta la cadena de valor en términos cuantitativos, ya que aparecen especificados los m³ de cortas y los destinos específicos de las mismas, así como los porcentajes de madera aserrada, tableros, chapa y pasta de papel que se tratan en la industria de la segunda transformación en Galicia para la producción de envases y embalajes, productos de carpintería o ebanistería, mobiliario y objetos de madera, papel y cartón.

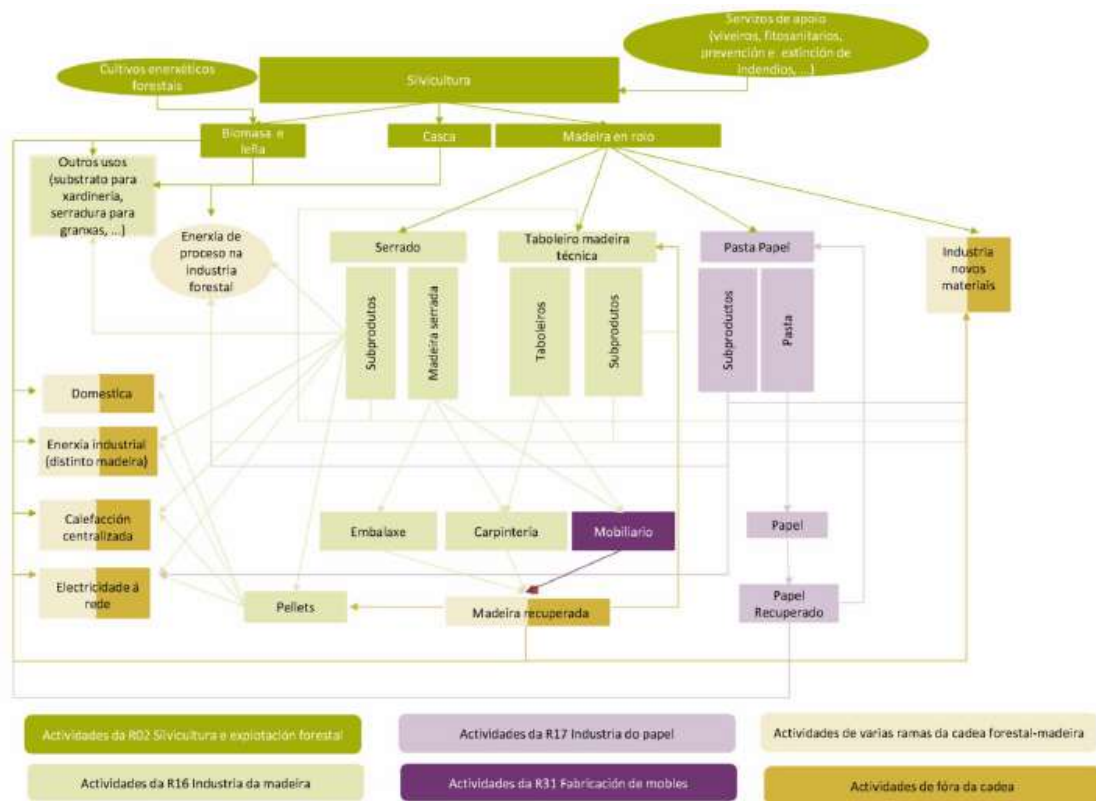


Figura 17: Cadena de valor del sector forestal a nivel gallego. (Fuente: Instituto Galego de Estadística)



Figura 18: Cadena de valor de la madera a nivel gallego. (Fuente: Confemadera Galicia, 2015)

Por otro lado, las principales tecnologías que se aplican en el sector, según indica en Plan de Sistemas Sectoriales del Sector de la Madera y el Clúster TIC Galicia, se concretan en equipos como carretillas elevadoras, pórticos y potentes grúas, cabestrantes, cadenas de transporte, cilindros, cizallas hidráulicas, prensas, lijadoras, tornos, entre otros, por lo que las tecnologías actuales son bastante heterogéneas. Asimismo, los déficits más significativos del sector en el ámbito tecnológico se centran en los sistemas de diseño, la automatización de los procesos productivos, los sistemas de gestión y control modernos y en el uso competitivo de las TIC en general.

Así, las principales tendencias tecnológicas en la primera transformación de la madera se encuentran relacionadas con la máxima optimización de la materia prima unida a un alto grado de productividad y elevada flexibilidad, además de la utilización de procesos industriales para valorizar maderas con bajas cualidades físico-mecánicas. En cuanto a la segunda transformación de la madera, las principales tendencias apuntan a la “*customización*” o personalización, a la generación de células de trabajo con lotes unitarios, las máquinas de alta tecnología para los centros de mecanizado con una gran flexibilidad y más compactas, un servicio postventa dinámico, nuevos sistemas de seguridad en la herramienta, mejores acabados, la impresión digital o la nanotecnología para la protección de la madera y secado por microondas.

Con todo ello, el concepto de “*Industria 4.0*” ya conocido, pasa a tener gran protagonismo en este sector, con el fin de dotarlo de alta flexibilidad y productividad (lotes de tamaño 1 con producción de millones de variantes en plazos mínimos). Sin embargo, si bien desde el sector forestal y de la madera se considera que existe ya un cierto grado de implantación de elementos de esta “*fabricación inteligente*”, nos encontramos todavía muy alejados de una aplicación notable.

En resumen, Galicia es una de las comunidades autónomas españolas con una gran vocación forestal y capacidad productiva, donde la ordenación de montes y la presencia de empresas de la transformación de la madera han tenido importantes relaciones. Hasta ahora el tipo de aprovechamiento más generalizado ha sido el de “*corta oportunidad*”, según el cual el monte pasa a funcionar como “*caja de ahorros*”, que se corta para satisfacer necesidades puntuales, apoyando en numerosas ocasiones a otras actividades. Por ello, a lo largo de la historia el monte gallego ha sido fundamental para su desarrollo socioeconómico, aunque siempre con una clara inclinación hacia el servicio de otras actividades como la agricultura, la ganadería o sectores industriales como las conserveras o la propia construcción. Así, problemas como la fragmentación del monte o la estructura de la propiedad, unido además a todo lo anterior, motivó que no se le concediera una valorización individual acorde con sus posibilidades de generar riqueza.

Desde finales del siglo XIX y, con más insistencia desde inicios del siglo XX, el monte gallego comenzó a tener un protagonismo por parte de la acción del hombre, promovido por la Administración, el cual se dirigió en exclusividad a producir una tipología de madera muy específica, pino y eucalipto, mientras que otras especies arbóreas como el roble, el castaño o árboles de ribera presentes en los montes gallegos a lo largo de su historia, vieron disminuir progresivamente sus superficies.

La razón más importante que promovió la repoblación de los montes gallegos con estas especies, además de producir grandes cantidades de madera, tuvo que ver con la propia evolución de la industria transformadora de la madera, lo que nos vuelve a confirmar la relación del binomio

formado por esta industria transformadora más el sector forestal; aunque estas repoblaciones solo se dirigieron hacia uno de los subsectores, la industria del papel y su producción. A su vez, la monopolización del monte gallego en producir madera de pino influyó en la especialización de otro subsector, los aserraderos, por lo que ambos sectores de la primera transformación de la madera generaron menos valor añadido sobre ésta que las empresas de la segunda transformación, carpinterías y fábricas de muebles. Éstas últimas, además, también han estado presentes, tanto en el pasado como en la actualidad, a lo largo del territorio de Galicia, con menos significación para la organización de los montes, pero sí con más relevancia socioeconómica en algunos municipios.

Existe, por tanto, un importante desequilibrio entre el sector de la madera y la industria de segunda transformación, que comenzó a fraguarse desde hace más de un siglo, cuando la política forestal no tuvo en cuenta el tipo de desarrollo fabril que estaba presente en Galicia. Así, esta tipología de empresas transformadoras no puede completar el círculo de la cadena de valor de la madera debido a que tienen que buscar su materia prima más allá del mercado gallego. Otro problema es que la mayoría de la madera que ha sido transformada por los aserraderos y las plantas de productos de chapa y tablero no es demandada por la carpintería y las fábricas de muebles en Galicia, con lo que también se generan fuera de la comunidad autónoma los mayores beneficios económicos derivados de una segunda transformación.

Pero a pesar de todo, en Galicia, gracias a su proximidad con la madera y al saber hacer de sus agentes productivos, existen empresas de todos los subsectores de la industria transformadora, tanto de primera como de segunda transformación, lo que la convierte en un territorio donde esta industria madura tiene mucha significación. Sin embargo, es necesario pensar en solventar el importante desequilibrio de la cadena de la madera entre producción y consumo para la tipología de empresas de segunda transformación de este territorio. Por ello, es fundamental aprovechar el potencial forestal que posee la comunidad gallega, el cual está claramente infrautilizado, además de repoblar o permitir una silvicultura natural donde vuelvan a tener presencia otras especies arbóreas más allá del pino y el eucalipto, sobre todo en aquellas zonas donde las características naturales así lo indiquen.

En relación a lo anterior, Galicia lidera el ránking mundial de las potencias forestales que más superficie tiene infrautilizada, se calcula que hasta un 30% del monte gallego está infrautilizado, lo que supone que aproximadamente unas 700.000 hectáreas son improductivas para su tejido industrial, proporción que es mucho menor que en diversos países, como el caso de Finlandia (12%), Austria (14%), Suecia (18%) o Estados Unidos (21%). Por ello, la Administración gallega ha aprobado recientemente una revisión del Plan Forestal de Galicia, el cual ya en 1992, preveía una inversión anual equivalente al 3% del presupuesto económico, y que se ha estado incumpliendo durante 25 años. Así, la idea de retomar dicha estrategia, actualizado y con las aportaciones de toda la cadena de valor, constata el error de un país que ha gastado en las últimas décadas más dinero en apagar fuegos que en ordenar su monte.

En definitiva, lo que se busca actualmente es equilibrar las necesidades estratégicas de la madera para el mantenimiento de la industria de primera transformación, las previsibles demandas crecientes en los aserraderos, así como el empleo estructural y las necesidades específicas para la producción de pasta de celulosa y de maderas técnicas.

Capítulo 3. Metodología

3.1. Descripción del proceso:

En este proyecto se realizará un estudio y posterior optimización del proceso de fabricación de la empresa maderera *Seistag S.L.*, en colaboración con otra compañía, *Asimov Efficiency S.L.*, la cual es una consultora dedicada a la ingeniería de procesos, la automatización, el mantenimiento y la robotización y que, a su vez, es una asesora externa de la anterior.

Desde su constitución en el año 2013, *Seistag S.L.* ha apostado por entender, innovar e invertir en la madera gallega con el objetivo de mejorar el entorno económico, social y medioambiental del potencial forestal regional. Inicialmente esta compañía prestaba servicios de arquitectura, pero posteriormente incluyó actividades como la promoción inmobiliaria, el desarrollo del producto y la primera transformación de la madera. Recientemente, en 2017, ha iniciado la actividad forestal integrando verticalmente toda la cadena de valor, desde el monte a los productos de diseño.

Apenas cinco años antes, los socios de la empresa observaron que la madera es un recurso abundante y competitivo en Galicia, pero también un material con margen para la tecnificación, la innovación y el diseño, motivo por el cual *Seistag* decidió basar su estrategia empresarial en ese material y sus posibilidades de desarrollo asumiendo así, el reto del sector forestal. En la actualidad la empresa ya emplea a 27 personas a las que califica como un equipo extraordinario y que gracias a ellos la facturación anual de la empresa ya supera los cinco millones de euros.

Más de quince años de experiencia avalan a los técnicos de *Seistag* en diseño y gestión de obras civiles, así como en servicios de cálculo estructural, por lo que la empresa amplió su actividad de ingeniería y arquitectura hacia la promoción inmobiliaria. Asimismo, en este ámbito, *Seistag* apuesta por el uso de la madera y de la ingeniería con el objetivo de diferenciar su oferta inmobiliaria: un producto residencial singular, innovador y de calidad. La innovación es una de las actividades claves en el desarrollo de *Seistag* ya que además colabora con las principales industrias y centros tecnológicos de Galicia como CIS-Madeira, lo que ha hecho posible aprender de los mejores interiorizando buenas prácticas, profesionalizando las actividades y adquiriendo capacidades propias.

Seistag ha sido pionera en la mejora de la competitividad industrial a través de la implementación de nuevas tecnologías como la informática y las telecomunicaciones y ha formado parte de las dos convocatorias de proyectos piloto “*fábrica 4.0*” impulsados por el Clúster de la Madera y el Diseño y respaldadas por la IGAPE. Además, ha comprometido inversiones próximas a los 200.000 euros anuales con el objetivo de lograr una producción industrial más eficiente y flexible.

Gracias al apoyo público, *Seistag* ha realizado fuertes inversiones, ha reconvertido máquinas y procesos industriales tradicionales en el ámbito de la primera transformación de la madera, ha ejecutado trabajos de acondicionamiento y pavimentación, además de adquirirse dos sierras, una desbrozadora automática y un tándem vertical, que permitirá la fabricación de ciertas medidas de madera que no existen en Galicia pero que sí cuentan con gran demanda internacional. “*Estamos*

hablando de tablas de 3 a 3,6 metros muy demandadas en ciertos destinos”, explica el portavoz de la empresa, Ismael Ameneiros, responsable de este desarrollo y de transformar un aserradero abandonado en un competitivo centro productivo, el cual alquiló en la parroquia de Gres, perteneciente al municipio de Vila de Cruces en la provincia de Pontevedra, para poder dotarse de medios propios para fabricar productos de alta demanda en los mercados de Oriente Próximo y el Norte de África. Es por tanto en este aserradero donde se va a llevar a cabo el análisis y simulación del proceso de fabricación, así como la optimización del mismo.



Figura 19: Ubicación y emplazamiento del lugar de trabajo. (Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps)



Figura 20: Zona de corte. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 21: Zona de secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia)

El proceso de producción comienza con la llegada de troncos al aserradero, los cuales pertenecen únicamente a dos especies distintas de pino, “*pino radiata*” o “*pino pinaster*”. Éstos, que pueden medir 4 metros de longitud o bien 2 metros, y tener un diámetro comprendido entre 20 cm y 60 cm y son depositados en la entrada del aserradero clasificándolos por su longitud.



Figura 22: Buffer de troncos de 4 y 2 metros a la entrada. (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, un operario los introducirá en la línea de corte por medio de una paleadora y los llevará a una de las tres entradas que hay en el sistema; la principal, a la que irán tanto los troncos de 4 metros como los de 2 metros, y las dos secundarias en las que habrá o troncos de 4 metros o de 2 metros.



Figura 23: Introducción de troncos por medio de la paleadora en la entrada principal. (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a la entrada principal, una vez que los troncos son depositados por la paleadora, una cinta transportadora o “conveyor” los conducirá hasta la descortezadora, la cual los pelará extrayendo su corteza o parte más externa.



Figura 24: Descortezadora de troncos. (Fuente: Elaboración propia)

Después de la descortezadora, se sitúa otro conveyor, en el que los troncos avanzarán lentamente hasta que sean empujados hacia su buffer correspondiente, según sean de 4 o de 2 metros, por lo que éstos últimos deberán realizar más recorrido que los anteriores para poder diferenciar el camino por el que seguirán circulando. En este lugar, es donde se sitúan las dos

entradas secundarias que se comentaron anteriormente, de modo que la paleadora introducirá los troncos dependiendo de su tipo en un *buffer* o en otro, atravesando el *conveyor*.



Figura 25: Introducción de troncos al sistema en la entrada secundaria de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Una vez los troncos ya están dentro de la línea de corte, se mantendrán en los *buffers* correspondientes hasta que puedan ser arrastrados hacia las máquinas serradoras, donde se cortarán en diferentes piezas. Destacar que el tamaño de ambos *buffers* es variable debido a que el diámetro de los troncos también lo es, por lo que el número de ellos que puede haber en cada instante no es constante.



Figura 26: Buffer de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Ahora bien, una vez que los troncos llegan a su sierra correspondiente, éstas se encargarán de dejarlo totalmente ausente de irregularidades, quedando éste con la forma de un prisma rectangular, el cual se cortará posteriormente en varias piezas. La forma en la que operan es haciendo girar el tronco sobre sí mismo varias veces, haciendo en cada una de ellas dos cortes, uno de ida y otro de vuelta.



Figura 27: Máquina serradora de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

En el caso de los troncos de 4 metros se obtendrá tablón de 4 metros, tabla de 2 metros y leña. Ésta última se conducirá a través de dos *conveyors*, hasta que llegue a uno común en donde se juntará con la proveniente de la sierra de 2 metros.



Figura 28: Conveyor para el transporte de leña procedente de la sierra de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a los tablonces de 4 metros, se trasladarán también mediante un *conveyor*, que los llevará hasta el buzón o salida de la línea de corte, en donde se mantendrán hasta que venga la carretilla que los llevará hacia la zona de apilado.



Figura 29: Conveyor para el transporte de tablonces de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Además, también se formarán tablas de 2 metros a partir de los tablonces de 4 metros, ya que algunos de ellos se desplazarán a través de un *conveyor* que los introducirá en la troceadora donde se dividirán en dos partes iguales de 2 metros cada una, que serán transportadas a su vez por otro *conveyor* hasta el tándem. Éste consta de unas sierras horizontales que están programadas para cortar las tablas de 2 metros en ciertas medidas exactas que no son muy comunes. Finalmente serán trasladadas hasta el *buffer* de la canteadora por un *conveyor*.



Figura 30: Troceadora de tablonces de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 31: Tándem. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 32: Conveyor para el transporte de tablas de 2 metros hasta el buffer de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, en el caso de la sierra que procesa los troncos de 2 metros, se obtendrán como producto de su corte, tabla de 2 metros, leña y pavia, que simplemente es como una tabla de 2 metros con la diferencia de que su sección es mayor (aproximadamente el triple, 90 mm). Así, esta última es conducida mediante un *conveyor* que la llevará hasta su buzón correspondiente.



Figura 33: Máquina serradora de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 34: Productos de la astilladora transportados hacia fuera de la línea de corte. (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto a la leña obtenida, se trasladará por otro *conveyor* hasta unirse a la proveniente de la sierra de 4 metros, momento en el cual serán conducidas por dos *conveyors* más hasta la astilladora, la cual se encuentra bajo tierra por seguridad debido a su gran potencia. Así, las astillas

generadas en esta fase, junto con la corteza extraída de los troncos al principio del proceso, se utilizarán como fuente de combustible para el secadero.

Finalmente, se obtendrán tablas de 2 metros que serán transportadas a través de un *conveyor* hacia el *buffer* de la canteadora, confluyendo con las procedentes de la sierra de 4 metros, donde todas ellas esperarán a ser procesadas.



Figura 35: Conveyor para el transporte de tablas de 2 metros hasta el buffer de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)

Una vez en el *buffer* de la canteadora, un operario se encargará de introducir las tablas de 2 metros en la misma con la ayuda de unos láseres que le proporcionarán una mayor precisión para poder delimitar adecuadamente los cantos de las piezas.



Figura 36: Canteadora. (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, las piezas serán trasladadas mediante un *conveyor* hasta la retestadora, la cual se encargará de retocar los extremos de las mismas, dejándolas con la longitud adecuada.



Figura 37: Conveyor para el transporte de tablas de 2 metros hasta la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 38: Retestadora. (Fuente: Elaboración propia)

Los cantos extraídos de los extremos de las piezas, se utilizarán a modo de leña, la cual será conducida a través de un *conveyor* hasta otro, donde confluye la leña anteriormente procedente del corte de ambas sierras. Finalmente, se elegirá de forma automática si la pieza será enviada al buzón correspondiente a la pavia o al de la tabla de 2 metros.



Figura 39: Buzón donde se almacena la pavia hasta su posterior secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 40: Buzón donde se almacena la tabla de 2 metros hasta su posterior secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia)

Terminado entonces el proceso de producción de las distintas piezas, se procede al secado y apilado de todas ellas. Así, en primer lugar, uno de los operarios las transportará por medio de una carretilla hasta un *buffer* externo situado fuera de la línea de corte, donde se mantendrán hasta que de nuevo se lleven al apilador. En éste, se dispondrán de forma ordenada todas las piezas de un mismo tipo, que irán encima unas de otras con unos separadores de por medio, por lo que obtendremos la denominada madera verde con separadores.

Una vez se completa este proceso, un operario las conducirá hasta el secadero, en el que entran con una humedad del 40% y donde permanecerán durante aproximadamente 5 días, por lo que ésta disminuirá hasta el 10%, momento en el cual se llevarán al almacén antes de introducirlas de nuevo en el apilador, ya que necesitan enfriar durante un tiempo.



Figura 41: Buffer externo de tabla de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 42: Buffer externo de pavia. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 43: Apilador de piezas de madera. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 44: Separadores de madera para el apilado. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 45: Introducción de piezas previamente apiladas en el secadero. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 46: Almacén. (Fuente: Elaboración propia)

Una vez transcurrido dicho tiempo, un operario las trasladará de nuevo al apilador, donde se volverán a agrupar ordenadamente, pero esta vez ya como madera seca en formato embalaje. Por último, se transportarán de nuevo hasta el almacén, donde figurarán como stock para finalmente introducir las en el mercado.



Figura 47: Almacén de productos en stock. (Fuente: Elaboración propia)

3.2. Análisis de datos:

A la hora de la simulación de cualquier tipo de proceso industrial, es fundamental el acopio de datos necesarios y su análisis para la correcta caracterización del sistema. La calidad y precisión de los mismos, influirá en gran medida en los resultados obtenidos posteriormente en el modelo diseñado, por lo que esta etapa dentro del proceso de simulación, suele ser la más costosa (Skoogh y Johansson, 2008).

En primer lugar, se ha realizado una primera visita para familiarizarse con el proceso de fabricación y tener una primera visión del aserradero, además de hacer numerosas anotaciones sobre el funcionamiento del mismo. Más tarde, y durante todo el período de ejecución de este proyecto, se han realizado con bastante frecuencia más visitas con el fin de comprender a la perfección la organización de todo el sistema, sus problemáticas, detalles que a primera vista pueden no ser obvios para el modelador, así como entender mejor las preocupaciones y las expectativas del cliente. En este punto, quiero agradecer la ayuda recibida por parte de Javier Lamas Vigo, socio principal de *Asimov Efficiency S.L.*, por haberme facilitado diversas explicaciones del proceso, así como algunos de los datos que constan en el modelo de simulación. Además, aparte de apuntar cualquier dato relevante sobre el proceso de producción, se han obtenido numerosas fotografías que resultarán prácticas a la hora de la modelización, las cuales se incluyen a lo largo de todo este documento. Finalmente, se disponen a continuación, todos los datos relativos al proceso llevado a cabo en la línea de corte, tales como los tiempos de ciclo de la maquinaria, longitudes, velocidades, frecuencias, capacidades, etc.

Para empezar, se adjuntan los tiempos de las máquinas y demás actividades pertenecientes a la zona de corte, empezando por las dos máquinas serradoras que hay en el aserradero.

Tabla 1: Tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Sierra 4m	Mínutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	55	48	55.48	0.924666667
2	1	53	1	113.01	1.8835
3	1	10	25	70.25	1.170833333
4	0	59	68	59.68	0.994666667
5	0	56	17	56.17	0.936166667
6	1	25	30	85.3	1.421666667
7	3	4	98	184.98	3.083
8	0	59	18	59.18	0.986333333
9	3	17	45	197.45	3.290833333
10	1	46	81	106.81	1.780166667
11	1	20	47	80.47	1.341166667
12	1	0	78	60.78	1.013
13	1	1	37	61.37	1.022833333
14	1	17	86	77.86	1.297666667
15	1	58	29	118.29	1.9715
16	3	43	2	223.02	3.717
17	1	32	88	92.88	1.548
18	1	7	31	67.31	1.121833333
19	1	5	81	65.81	1.096833333
20	1	22	45	82.45	1.374166667

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Pareto(0.925, 2.23)	98.9	do not reject
Lognormal(0.91, -1.15, 1.4)	97.4	do not reject
Inverse Gaussian(0.87, 0.322, 0.728)	94.1	do not reject
Pearson 5(0.834, 1.26, 0.37)	92.7	do not reject
Inverse Weibull(0.836, 1.12, 3.58)	92.	do not reject
Pearson 6(0.925, 2.69, 0.925, 4.44)	88.5	do not reject
Gamma(0.925, 0.843, 0.8)	82.5	do not reject
Weibull(0.925, 0.685, 0.543)	81.3	do not reject
Beta(0.925, 3.72, 0.63, 2.08)	64.9	do not reject
LogLogistic(0.925, 0.982, 0.298)	62.9	do not reject
Exponential(0.925, 0.674)	43.6	do not reject
Power Function(0.925, 3.81, 0.385)	36.6	do not reject
Chi Squared(0.925, 1.08)	28.5	do not reject
Erlang(0.925, 1., 0.8)	19.6	do not reject
Rayleigh(0.414, 1.01)	0.966	do not reject
Triangular(0.925, 3.96, 0.925)	1.96e-003	reject
Uniform(0.925, 3.72)	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 48: Ajuste de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

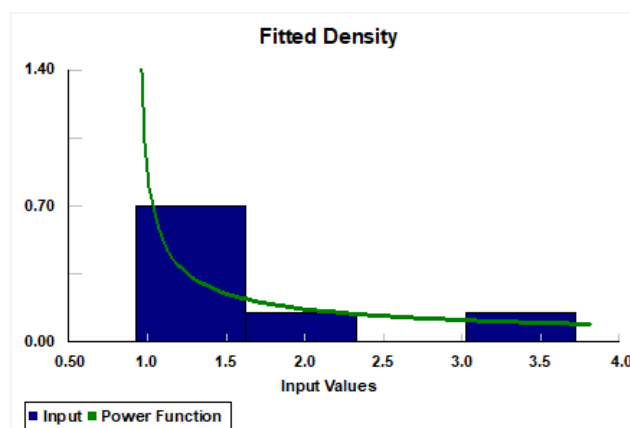


Figura 49: Función de densidad de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

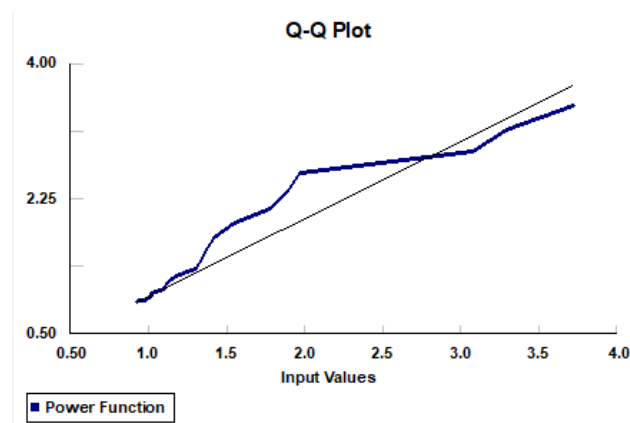


Figura 50: Gráfico Q-Q de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 2: Tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Sierra 2m	Minutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	1	17	18	77.18	1.286333333
2	1	33	19	93.19	1.553166667
3	1	22	53	82.53	1.3755
4	1	2	57	62.57	1.042833333
5	1	21	53	81.53	1.358833333
6	1	18	47	78.47	1.307833333
7	1	24	16	84.16	1.402666667
8	1	18	99	78.99	1.3165
9	1	27	1	87.01	1.450166667
10	1	56	48	116.48	1.941333333
11	1	24	84	84.84	1.414
12	1	0	36	60.36	1.006
13	1	13	54	73.54	1.225666667
14	0	59	98	59.98	0.999666667
15	1	19	62	79.62	1.327
16	1	16	10	76.1	1.268333333
17	1	13	54	73.54	1.225666667
18	1	24	92	84.92	1.415333333
19	1	24	0	84	1.4
20	1	45	12	105.12	1.752

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
LogLogistic(-0.383, 15.3, 1.72)	100	do not reject
Pearson 5(-6.51e-002, 45.8, 64.4)	70.3	do not reject
Lognormal(0.262, 6.84e-002, 0.197)	69.2	do not reject
Gamma(0.654, 10.2, 6.87e-002)	66.5	do not reject
Erlang(0.654, 10., 6.99e-002)	64.8	do not reject
Beta(0.72, 21.7, 7.7, 248)	58.5	do not reject
Weibull(0.927, 2.01, 0.479)	46.1	do not reject
Rayleigh(0.928, 0.338)	45.6	do not reject
Inverse Gaussian(0.245, 28.9, 1.11)	36.2	do not reject
Pearson 6(1., 1.26e+004, 1.8, 6.09e+004)	10.2	do not reject
Triangular(0.885, 2.01, 1.31)	6.8	do not reject
Power Function(1., 2.01, 0.577)	2.08	do not reject
Exponential(1., 0.354)	0.211	reject
Pareto(1., 3.44)	4.38e-002	reject
Chi Squared(1., 0.992)	2.18e-002	reject
Uniform(1., 1.94)	1.5e-002	reject
Inverse Weibull	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 51: Ajuste de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

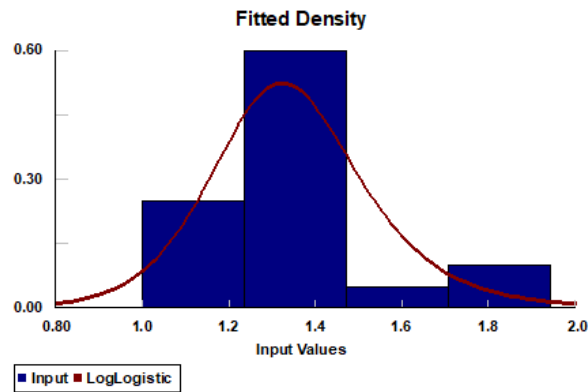


Figura 52: Función de densidad de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

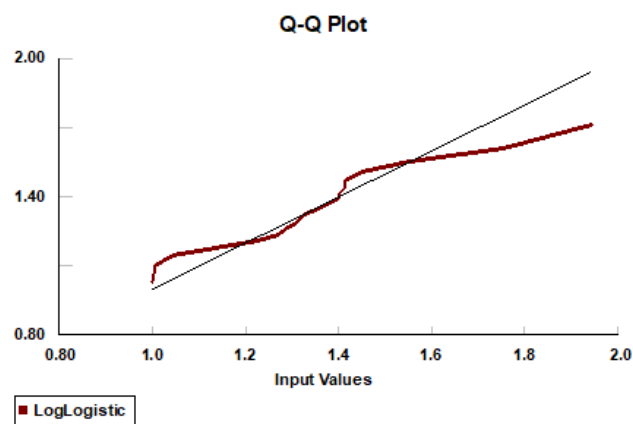


Figura 53: Gráfico Q-Q de los tiempos de ciclo de la máquina serradora de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

El ajuste de los tiempos de ciclo de cada máquina se ha realizado con la herramienta “Stat Fit” la cual viene incorporada en el software de simulación *ExtendSim*. Ésta se encargará de ajustar el conjunto de datos obtenidos a una distribución conocida con unos parámetros determinados, además de que permitirá obtener los gráficos correspondientes a las funciones de densidad y a los cuartiles, “Q-Q plot”, el cual compara la distribución elegida como mejor ajuste con la ideal, de forma que cuanto más se aproxime nuestra función a una recta dada, menos error estaremos cometiendo.

En las tablas que se adjuntarán posteriormente, ya no se incluirán estas gráficas, ya que resulta redundante y tampoco son necesarias a la hora de realizar el modelo de simulación.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que los tiempos de ciclo de las máquinas serradoras, tanto de 4 como de 2 metros, no son adecuados en cuanto a aportar información útil de cara al modelado. Esto es debido a que, en realidad, a medida que el tronco es cortado por las sierras en distintas piezas, éstas saldrán de la misma hacia sus correspondientes *conveyors* con unos tiempos determinados por el tipo de pieza, los cuales a su vez presentan cierta variabilidad que también habrá que tener en cuenta. De ahí que se haya realizado un ajuste para cada tipo de pieza en cada una de las máquinas serradoras, con el fin de tener en cuenta este aspecto y prestando atención a que los tiempos de corte de las tablas de 2 metros y de pavia en una de las sierras son similares, al igual que sucede con los de todos los tablonos de 4 metros que se obtienen de la otra máquina.

Tabla 3: Tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y del tablón de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Sierra 4m Tabla 2m	Minutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	14	0	14	0.233333333
2	0	16	50	16.5	0.275
3	0	13	20	13.2	0.22
4	0	16	15	16.15	0.269166667
5	0	17	83	17.83	0.297166667
6	0	19	27	19.27	0.321166667
7	0	12	69	12.69	0.2115
8	0	13	19	13.19	0.219833333
9	0	13	64	13.64	0.227333333
10	0	13	50	13.5	0.225
11	0	13	46	13.46	0.224333333
12	0	18	97	18.97	0.316166667
13	0	18	13	18.13	0.302166667
14	0	15	3	15.03	0.2505
15	0	19	33	19.33	0.322166667
16	0	13	0	13	0.216666667
17	0	16	16	16.16	0.269333333
18	0	16	76	16.76	0.279333333
19	0	12	70	12.7	0.211666667
20	0	12	63	12.63	0.2105
21	0	16	90	16.9	0.281666667
22	0	15	82	15.82	0.263666667
23	0	17	85	17.85	0.2975
24	0	13	97	13.97	0.232833333
25	0	13	29	13.29	0.2215
26	0	12	90	12.9	0.215
27	0	13	29	13.29	0.2215
28	0	14	3	14.03	0.233833333
29	0	16	35	16.35	0.2725
30	0	12	55	12.55	0.209166667

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Power Function(0.209, 0.322, 0.577)	77.3	do not reject
Beta(0.209, 0.322, 0.656, 1.02)	51.1	do not reject
Pearson 6(0.209, 10.6, 1.08, 267)	42.7	do not reject
Gamma(0.209, 1., 4.25e-002)	41.8	do not reject
Erlang(0.209, 1., 4.25e-002)	41.8	do not reject
Exponential(0.209, 4.25e-002)	41.8	do not reject
Weibull(0.209, 0.903, 4.09e-002)	36.3	do not reject
Pareto(0.209, 5.72)	29.8	do not reject
Lognormal(0.206, -3.54, 1.06)	25.8	do not reject
Inverse Gaussian(0.202, 4.73e-002, 4.96e-002)	18.9	do not reject
Pearson 5(0.197, 1.95, 6.17e-002)	18.6	reject
LogLogistic(-0.184, 20.1, 0.432)	8.8	reject
Triangular(0.209, 0.344, 0.209)	4.19	do not reject
Rayleigh(0.191, 5.04e-002)	2.25	do not reject
Uniform(0.209, 0.322)	5.87e-003	reject
Chi Squared(0.209, 0.485)	3.08e-007	reject
Inverse Weibull	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 54: Ajuste de los tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y del tablón de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4: Tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Sierra 4m Leña	Minutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	21	51	21.51	0.3585
2	0	25	50	25.5	0.425
3	0	22	76	22.76	0.379333333
4	0	29	13	29.13	0.4855
5	0	20	40	20.4	0.34
6	0	22	96	22.96	0.382666667
7	0	22	37	22.37	0.372833333
8	0	28	85	28.85	0.480833333
9	0	25	9	25.09	0.418166667
10	0	28	56	28.56	0.476
11	0	18	81	18.81	0.3135
12	0	22	55	22.55	0.375833333
13	0	23	88	23.88	0.398
14	0	24	17	24.17	0.402833333
15	0	19	60	19.6	0.326666667
16	0	23	37	23.37	0.3895
17	0	20	89	20.89	0.348166667
18	0	23	99	23.99	0.399833333
19	0	26	74	26.74	0.445666667
20	0	29	89	29.89	0.498166667
21	0	25	52	25.52	0.425333333
22	0	22	60	22.6	0.376666667
23	0	30	43	30.43	0.507166667
24	0	23	71	23.71	0.395166667
25	0	22	40	22.4	0.373333333
26	0	23	45	23.45	0.390833333
27	0	19	74	19.74	0.329
28	0	23	13	23.13	0.3855
29	0	19	99	19.99	0.333166667
30	0	19	63	19.63	0.327166667

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Pearson 5(0.182, 17.3, 3.49)	91.4	do not reject
LogLogistic(-0.169, 19.2, 0.559)	89.3	do not reject
Rayleigh(0.3, 7.73e-002)	89.1	do not reject
Lognormal(0.24, -1.92, 0.342)	86.8	do not reject
Inverse Gaussian(0.242, 1.21, 0.153)	82.3	do not reject
Weibull(0.308, 1.67, 9.77e-002)	74.8	do not reject
Gamma(0.295, 3.34, 3.02e-002)	73.8	do not reject
Pearson 6(0.314, 3.23e+003, 2.29, 8.74e+004)	72.7	do not reject
Erlang(0.295, 3., 3.36e-002)	59.1	do not reject
Beta(0.314, 0.507, 1.3, 1.71)	46.3	do not reject
Triangular(0.308, 0.539, 0.327)	31.4	do not reject
Power Function(0.312, 0.508, 0.843)	16.4	do not reject
Uniform(0.314, 0.507)	0.821	do not reject
Exponential(0.314, 8.18e-002)	0.424	reject
Pareto(0.314, 4.48)	8.86e-002	reject
Chi Squared(0.314, 0.618)	0.	reject
Inverse Weibull	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 55: Ajuste de los tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 5: Tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y de la pavia. (Fuente: Elaboración propia)

Sierra 2m Tabla 2m	Minutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	9	71	9.71	0.161833333
2	0	7	75	7.75	0.129166667
3	0	7	31	7.31	0.121833333
4	0	10	19	10.19	0.169833333
5	0	10	56	10.56	0.176
6	0	7	73	7.73	0.128833333
7	0	6	3	6.03	0.1005
8	0	9	47	9.47	0.157833333
9	0	6	53	6.53	0.108833333
10	0	7	22	7.22	0.120333333
11	0	8	56	8.56	0.142666667
12	0	9	33	9.33	0.1555
13	0	7	75	7.75	0.129166667
14	0	6	33	6.33	0.1055
15	0	6	37	6.37	0.106166667
16	0	7	74	7.74	0.129
17	0	5	54	5.54	0.092333333
18	0	8	53	8.53	0.142166667
19	0	8	6	8.06	0.134333333
20	0	10	8	10.08	0.168
21	0	6	62	6.62	0.110333333
22	0	7	64	7.64	0.127333333
23	0	7	42	7.42	0.123666667
24	0	10	16	10.16	0.169333333
25	0	8	96	8.96	0.149333333
26	0	10	97	10.97	0.182833333
27	0	8	52	8.52	0.142
28	0	10	43	10.43	0.173833333
29	0	6	53	6.53	0.108833333
30	0	11	52	11.52	0.192

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Rayleigh(8.69e-002, 4.12e-002)	97.	do not reject
Weibull(8.57e-002, 2.1, 5.98e-002)	91.3	do not reject
Lognormal(4.78e-004, 1.99, 0.193)	82.4	do not reject
Triangular(8.47e-002, 0.203, 0.128)	77.8	do not reject
Beta(9.23e-002, 0.192, 1.66, 1.93)	67.7	do not reject
Gamma(-9.58e-002, 75.4, 3.11e-003)	66.5	do not reject
Erlang(-9.58e-002, 76., 3.09e-003)	66.2	do not reject
Pearson 6(9.23e-002, 664, 2.94, 4.07e+004)	61.3	do not reject
Power Function(9.15e-002, 0.193, 0.964)	60.7	do not reject
Pearson 5(6.16e-002, 6.25, 0.409)	58.	do not reject
Inverse Gaussian(1.18e-002, 2.76, 0.127)	45.5	do not reject
LogLogistic(-0.582, 48.4, 0.721)	35.	do not reject
Uniform(9.23e-002, 0.192)	27.4	do not reject
Exponential(9.23e-002, 4.63e-002)	0.389	reject
Pareto(9.23e-002, 2.58)	3.07e-002	reject
Chi Squared(9.23e-002, 0.539)	0.	reject
Johnson SB(9.36e-002, 9.76e-002, 0.167, 0.814)	0.	reject
Inverse Weibull	no fit	reject

Figura 56: Ajuste de los tiempos de ciclo de la tabla de 2 metros y de la pavia. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 6: Tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Sierra 2m Leña	Minutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	11	29	11.29	0.188166667
2	0	21	18	21.18	0.353
3	0	14	58	14.58	0.243
4	0	16	15	16.15	0.269166667
5	0	15	96	15.96	0.266
6	0	13	5	13.05	0.2175
7	0	14	86	14.86	0.247666667
8	0	14	17	14.17	0.236166667
9	0	16	56	16.56	0.276
10	0	12	37	12.37	0.206166667
11	0	17	67	17.67	0.2945
12	0	11	45	11.45	0.190833333
13	0	13	56	13.56	0.226
14	0	11	16	11.16	0.186
15	0	12	5	12.05	0.200833333
16	0	17	29	17.29	0.288166667
17	0	17	36	17.36	0.289333333
18	0	20	60	20.6	0.343333333
19	0	12	91	12.91	0.215166667
20	0	19	65	19.65	0.3275
21	0	12	8	12.08	0.201333333
22	0	19	26	19.26	0.321
23	0	13	5	13.05	0.2175
24	0	16	99	16.99	0.283166667
25	0	19	70	19.7	0.328333333
26	0	19	18	19.18	0.319666667
27	0	14	35	14.35	0.239166667
28	0	11	53	11.53	0.192166667
29	0	16	69	16.69	0.278166667
30	0	16	75	16.75	0.279166667

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Johnson SB(0.185, 0.169, 0.253, 0.483)	99.5	do not reject
Power Function(0.186, 0.354, 0.685)	94.5	do not reject
Beta(0.186, 0.353, 0.712, 0.904)	85.3	do not reject
Erlang(-0.163, 71., 5.92e-003)	63.3	do not reject
Gamma(-0.163, 71., 5.92e-003)	63.1	do not reject
Lognormal(8.88e-002, -1.82, 0.304)	57.	do not reject
Pearson 5(8.25e-002, 10.5, 1.69)	56.9	do not reject
Rayleigh(0.167, 7.33e-002)	56.1	do not reject
Inverse Gaussian(0.113, 1.05, 0.144)	48.2	do not reject
LogLogistic(-1.05, 46.9, 1.31)	41.1	do not reject
Weibull(0.184, 1.33, 7.97e-002)	32.	do not reject
Triangular(0.186, 0.383, 0.186)	30.6	do not reject
Pearson 6(0.186, 325, 1.42, 6.23e+003)	30.6	do not reject
Uniform(0.186, 0.353)	13.9	do not reject
Exponential(0.186, 7.15e-002)	8.96	do not reject
Pareto(0.186, 3.26)	2.77	reject
Chi Squared(0.186, 0.571)	1.24e-007	reject
Inverse Weibull	no fit	reject

Figura 57: Ajuste de los tiempos de ciclo de la leña procedente de la sierra de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 7: Tiempos de ciclo de la troceadora. (Fuente: Elaboración propia)

Troceadora	Minutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	5	23	5.23	0.087166667
2	0	5	89	5.89	0.098166667
3	0	5	55	5.55	0.0925
4	0	5	50	5.5	0.091666667
5	0	5	49	5.49	0.0915
6	0	5	40	5.4	0.09
7	0	5	36	5.36	0.089333333
8	0	5	58	5.58	0.093
9	0	5	60	5.6	0.093333333
10	0	5	53	5.53	0.092166667
11	0	5	55	5.55	0.0925
12	0	5	90	5.9	0.098333333
13	0	5	99	5.99	0.099833333
14	0	5	65	5.65	0.094166667
15	0	5	64	5.64	0.094
16	0	5	47	5.47	0.091166667
17	0	5	90	5.9	0.098333333
18	0	5	70	5.7	0.095
19	0	5	69	5.69	0.094833333
20	0	6	0	6	0.1

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Pearson 6(8.08e-002, 5.02e-002, 13.1, 51.)	96.3	do not reject
Pearson 5(7.27e-002, 35.6, 0.732)	92.2	do not reject
Inverse Gaussian(6.83e-002, 1.37, 2.55e-002)	87.6	do not reject
Lognormal(6.78e-002, -3.66, 0.133)	82.3	do not reject
Gamma(6.34e-002, 74.4, 4.09e-004)	82.1	do not reject
Weibull(8.55e-002, 2.61, 9.44e-003)	82.1	do not reject
Rayleigh(8.65e-002, 5.77e-003)	80.5	do not reject
Erlang(6.34e-002, 76., 4.01e-004)	79.6	do not reject
Triangular(8.62e-002, 0.102, 9.25e-002)	70.5	do not reject
LogLogistic(9.40e-003, 43.1, 6.43e-002)	66.4	do not reject
Uniform(8.72e-002, 0.1)	26.2	do not reject
Beta(8.72e-002, 0.102, 1.31, 1.76)	20.5	do not reject
Power Function(8.72e-002, 0.1, 1.41)	4.1	do not reject
Exponential(8.72e-002, 6.68e-003)	0.147	reject
Pareto(8.72e-002, 13.7)	9.96e-002	reject
Chi Squared(8.72e-002, 0.367)	0.	reject
Inverse Weibull	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 58: Ajuste de los tiempos de ciclo de la troceadora. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 8: Tiempos de ciclo de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)

Canteadora	Mínutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	8	68	8.68	0.144666667
2	0	8	65	8.65	0.144166667
3	0	8	53	8.53	0.142166667
4	0	10	87	10.87	0.181166667
5	0	8	97	8.97	0.1495
6	0	10	19	10.19	0.169833333
7	0	9	16	9.16	0.152666667
8	0	7	6	7.06	0.117666667
9	0	6	54	6.54	0.109
10	0	7	9	7.09	0.118166667
11	0	10	3	10.03	0.167166667
12	0	8	77	8.77	0.146166667
13	0	7	96	7.96	0.132666667
14	0	7	7	7.07	0.117833333
15	0	10	8	10.08	0.168
16	0	7	31	7.31	0.121833333
17	0	8	56	8.56	0.142666667
18	0	8	23	8.23	0.137166667
19	0	5	96	5.96	0.099333333
20	0	5	93	5.93	0.098833333
21	0	8	14	8.14	0.135666667
22	0	7	36	7.36	0.122666667
23	0	9	70	9.7	0.161666667
24	0	6	28	6.28	0.104666667
25	0	8	83	8.83	0.147166667
26	0	7	70	7.7	0.128333333
27	0	9	66	9.66	0.161
28	0	7	30	7.3	0.121666667
29	0	8	39	8.39	0.139833333
30	0	6	54	6.54	0.109

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Erlang[-0.456, 627, 9.45e-004]	100	do not reject
Gamma[-0.456, 626, 9.47e-004]	99.7	do not reject
Johnson SB[9.48e-002, 9.09e-002, 0.183, 0.772]	95.7	do not reject
Weibull[8.66e-002, 2.48, 5.62e-002]	95.1	do not reject
Lognormal[-0.285, -0.865, 5.16e-002]	91.1	do not reject
Inverse Gaussian[-0.243, 115, 0.38]	84.7	do not reject
Pearson 5[3.49e-002, 17.2, 1.66]	80.5	do not reject
Rayleigh[9.28e-002, 3.44e-002]	76.9	do not reject
LogLogistic[-1.59, 141, 1.72]	65.9	do not reject
Triangular[9.12e-002, 0.191, 0.122]	59.8	do not reject
Pearson 6[9.88e-002, 98.2, 1.75, 4.42e+003]	21.	do not reject
Uniform[9.88e-002, 0.181]	16.	do not reject
Power Function[9.88e-002, 0.183, 0.736]	15.9	do not reject
Beta[9.88e-002, 0.181, 0.815, 1.]	14.7	do not reject
Exponential[9.88e-002, 3.76e-002]	0.364	do not reject
Pareto[9.88e-002, 3.23]	4.49e-002	reject
Chi Squared[9.88e-002, 0.501]	0.	reject
Inverse Weibull	no fit	reject

Figura 59: Ajuste de los tiempos de ciclo de la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 9: Tiempos de ciclo de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)

Retestadora	Minutos	Segundos	Centésimas	Tiempo de ciclo (s)	Tiempo de ciclo (min)
1	0	4	64	4.64	0.077333333
2	0	4	57	4.57	0.076166667
3	0	4	13	4.13	0.068833333
4	0	4	2	4.02	0.067
5	0	4	23	4.23	0.0705
6	0	4	55	4.55	0.075833333
7	0	4	1	4.01	0.066833333
8	0	4	85	4.85	0.080833333
9	0	4	63	4.63	0.077166667
10	0	4	40	4.4	0.073333333
11	0	4	7	4.07	0.067833333
12	0	4	94	4.94	0.082333333
13	0	4	53	4.53	0.0755
14	0	4	55	4.55	0.075833333
15	0	4	72	4.72	0.078666667
16	0	4	70	4.7	0.078333333
17	0	4	75	4.75	0.079166667
18	0	4	3	4.03	0.067166667
19	0	4	65	4.65	0.0775
20	0	4	35	4.35	0.0725
21	0	4	70	4.7	0.078333333
22	0	4	50	4.5	0.075
23	0	4	90	4.9	0.081666667
24	0	4	73	4.73	0.078833333
25	0	4	49	4.49	0.074833333
26	0	4	50	4.5	0.075
27	0	4	53	4.53	0.0755
28	0	4	10	4.1	0.068333333
29	0	4	86	4.86	0.081
30	0	4	75	4.75	0.079166667

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Weibull(3.92e-004, 20.6, 7.77e-002)	100	do not reject
Triangular(6.37e-002, 8.34e-002, 7.87e-002)	81.9	do not reject
Lognormal(102, 5.2, 2.52e-005)	21.9	do not reject
LogLogistic(2.22e-002, 20.9, 5.36e-002)	20.2	do not reject
Pearson 5(1.69e-002, 142, 8.24)	8.12	do not reject
Uniform(6.68e-002, 8.23e-002)	5.	do not reject
Rayleigh(6.53e-002, 7.71e-003)	1.61	do not reject
Beta(6.68e-002, 8.23e-002, 0.959, 1.07)	0.632	reject
Power Function(6.68e-002, 8.24e-002, 0.843)	0.292	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 60: Ajuste de los tiempos de ciclo de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 10: Tiempos de ciclo, velocidades y capacidades de otras actividades. (Fuente: Elaboración propia)

Actividad	Longitud (m)	Velocidad (m/s)	Velocidad (m/min)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	Capacidad
Descortezadora	6.2	0.16	9.6	38.75	0.645833333	1
Tándem	4	0.266666667	16	15	0.25	1

Tabla 11: Tiempos de ciclo, longitudes, velocidades y capacidades de los conveyors. (Fuente: Elaboración propia)

Conveyor	Longitud (m)	Velocidad (m/s)	Velocidad (m/min)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	Longitud Pieza	Capacidad máxima
Conveyor Entrada Principal	9.6	0.16	9.6	60	1	0.2	48
Conveyor Descortezadora 2m	7.8	0.16	9.6	48.75	0.8125	2	1
Conveyor Tablón 4m Troceadora	5	1	60	5	0.083333333	4	1
Conveyor Tabla 2m Troceadora	4	1	60	4	0.066666667	2	2
Conveyor Tabla 2m Tándem	5	0.2	12	25	0.416666667	0.141421356	35
Conveyor Tablón 4m	13	1.5	90	8.666666667	0.144444444	4	3
Conveyor Leña 4m 1	2.5	0.1	6	25	0.416666667	0.141421356	18
Conveyor Leña 4m 2	18.5	0.5	30	37	0.616666667	4	5
Conveyor Tabla 2m	15	1	60	15	0.25	2	7
Conveyor Pavia	2	1	60	2	0.033333333	2	1
Conveyor Leña 2m	14.5	0.5	30	29	0.483333333	2	8
Conveyor Leña Común 1	4	0.2	12	20	0.333333333	0.141421356	29
Conveyor Leña Común 2	3	0.5	30	6	0.1	2	2
Conveyor Tabla 2m Canteadora	7	1	60	7	0.116666667	2	3
Conveyor Leña 2m Retestadora	5	0.5	30	10	0.166666667	2	1

Tabla 12: Tamaños y longitudes de los buffers. (Fuente: Elaboración propia)

Buffer fijo	Longitud (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	Tamaño máximo	Tamaño mínimo
Buffer Troncos 4m y 2m	-	-	-	Infinity	-
Buffer Troncos 4m	-	-	-	Infinity	-
Buffer Troncos 2m	-	-	-	Infinity	-
Paleadora	-	-	-	1	-
Paleadora 4m	-	-	-	1	-
Paleadora 2m	-	-	-	1	-
Buffer Piezas 4m	-	-	-	Infinity	-
Buffer Piezas 2m	-	-	-	Infinity	-
Buffer Canteadora	-	-	-	15	-
Buffer (Buzón) Tablón 4m	-	-	-	100	-
Buffer (Buzón) Tabla 2m	-	-	-	140	-
Buffer (Buzón) Pavia	-	-	-	100	-
Buffer variable	Longitud (m)	Diámetro mínimo (m)	Diámetro máximo (m)	Tamaño máximo	Tamaño mínimo
Buffer Entrada Principal	-	-	-	5	2
Buffer Entrada 4m	-	-	-	4	2
Buffer Entrada 2m	-	-	-	5	2
Buffer Sierra 4m	10.5	0.2	0.6	52	18
Buffer Sierra 2m	7	0.2	0.6	35	12

Tabla 13: Frecuencia de llegada de troncos en cada una de las entradas del sistema. (Fuente: Elaboración propia)

Llegada de troncos	Cantidad mínima	Cantidad máxima	Frecuencia (min ⁻¹)
Principal	2	5	0.333333333
Secundaria 4m	2	4	0.033333333
Secundaria 2m	2	5	0.04

Tabla 14: Tiempos de ida y vuelta y capacidad de la paleadora. (Fuente: Elaboración propia)

Paleadora	Tiempo Ida (min)	Tiempo Vuelta (min)	Capacidad mínima	Capacidad máxima
Entrada Principal	1.5	1.5	2	5
Entrada Secundaria 2m	1	1	2	5
Entrada Secundaria 4m	1	1	2	4

Tabla 15: Probabilidad y frecuencia de parada en algunas actividades. (Fuente: Elaboración propia)

Actividad principal	Probabilidad de parada	Frecuencia (min ⁻¹)	Tiempo de parada (min)	Dependencia
Descortezadora	10.0%	10	1	-
Sierra 2m	20.0%	5	1.5	-
Tándem	10.0%	10	1.5	-
Canteadora	5.0%	20	1	-
Retestadora	7,5%	15	1.5	-
Actividad secundaria	Probabilidad de parada	Frecuencia (min ⁻¹)	Tiempo de parada	Dependencia
Transporte Descortezadora 2m	10.0%	10	1	Descortezadora
Sierra 4m	10.0%	10	1.5	Tándem
Troceadora	10.0%	10	1.5	Tándem

Tabla 16: Número y distribución de trabajadores en el aserradero. (Fuente: Elaboración propia)

Actividad	Nº Trabajadores	Carácter
Paleadora	1	Variable
Sierra 4m	1	Fijo
Sierra 2m	1	Fijo
Canteadora	1	Fijo
Apilador	1	Fijo
Carretilla 1	1	Variable
Carretilla 2	1	Variable

3.3. Desarrollo del modelo:

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para comprender profundamente el funcionamiento del sistema de producción se procede a desarrollar un modelo en el software de simulación de eventos discretos *ExtendSim*.

Inicialmente aparecen en el modelo 3 bloques "Create" en los cuales se especificará el tiempo transcurrido entre la llegada de los troncos al sistema en cada una de las entradas. Este tiempo, al no estar automatizado el proceso de introducción de troncos en la línea de corte, si no que éstos son transportados por un operario mediante una paleadora, puede modificarse posteriormente para conseguir optimizar el proceso, de forma que se obtengan el mayor número de piezas posibles. Asimismo, una vez que llegan habrá un *buffer* de entrada, el cual realmente no existe, pero que es necesario incluirlo ya que en un mismo instante solamente pueden introducirse los troncos por una de las tres entradas. A continuación, se colocan varios bloques "Information"

para extraer información útil, como el tiempo entre llegadas de cada uno de los troncos o la tasa de producción.

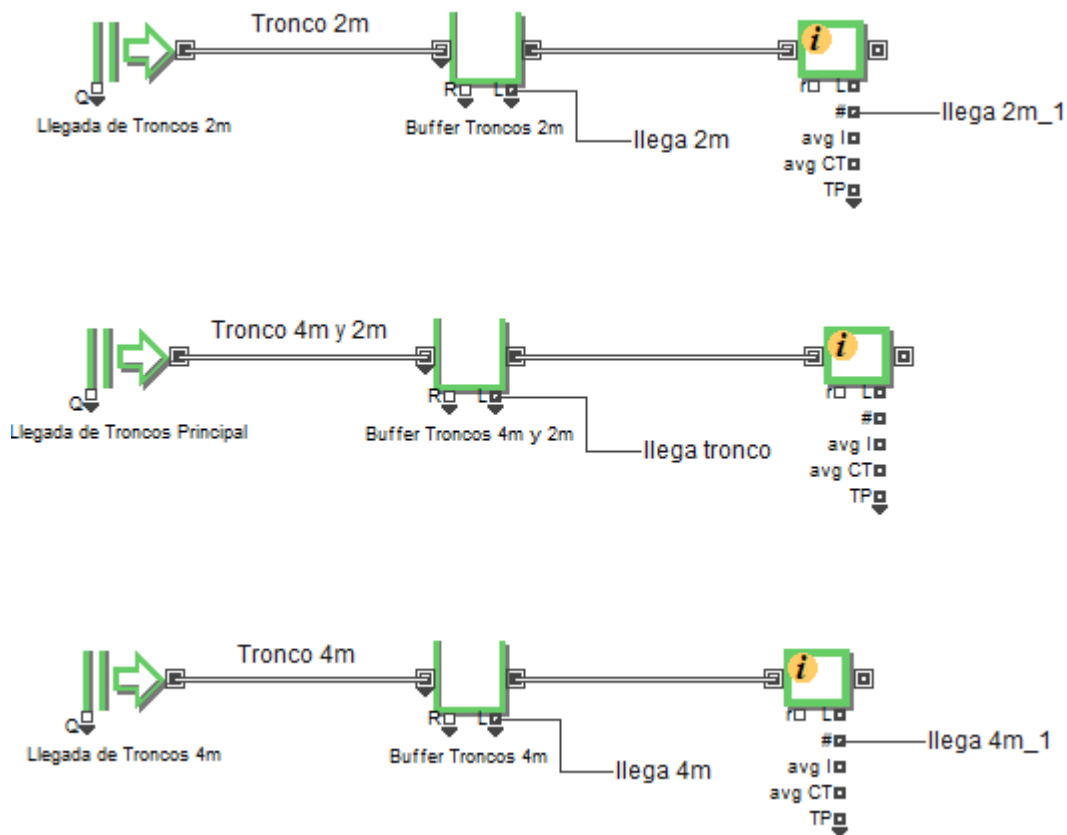


Figura 61: Llegada de troncos al sistema. (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, en el momento en el que una de las paleadoras esté disponible, se llevarán los troncos a su respectiva entrada, para lo cual es necesario el bloque “Batch”, donde la paleadora y el tronco se agruparán en un mismo lote, el cual posteriormente mediante un bloque “Unbatch”, se dividirá por un lado en dicha paleadora y por otro, en el número de troncos que transportaba ésta última. El número de troncos será variable, por lo que es necesario un bloque “Random Number” para poder tener en cuenta este aspecto.

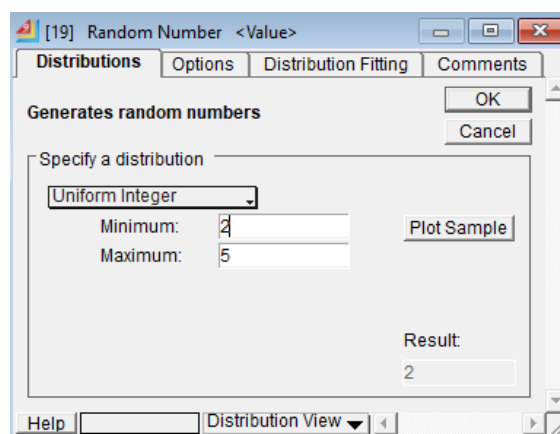


Figura 62: Bloque “Random Number” mediante el cual se generará un número aleatorio. (Fuente: Elaboración propia)

Además, hay que introducir un *buffer* intermedio representando el cazo de la paleadora, ya que mientras que ésta no se vacíe, no podrá retornar para recoger más troncos. Estos procesos de ida y vuelta han sido modelados con bloques “*Transport*”, los cuales dependerán del bloque “*Resource Item*” donde se muestran las paleadoras disponibles.

Por otro lado, destacar que, debido a que solo puede producirse la introducción de troncos en el sistema mediante una de las tres entradas en un mismo momento, ya que solo se dispone de una paleadora, habrá que modelar este comportamiento mediante una serie de ecuaciones recogidas en un bloque “*Equation*”. Finalmente, el proceso de entrada de troncos en la línea de corte quedaría representado de la siguiente manera.

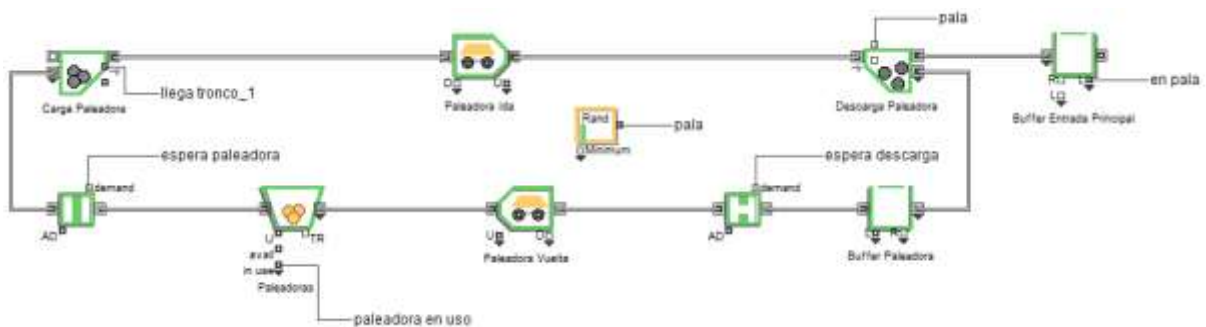


Figura 63: Proceso de introducción de troncos a través de la entrada principal. (Fuente: Elaboración propia)

```
espera2=0;
if((llega2n_1==llega2n_2 || usopaleadora2n==0 || llega2n==0 || usopaleadora==0) || (llega2n>0 || llega2n_3>0))
{
espera2=1;
}

espera=0;
if((llega2n_1==llega2n_2 || llega2n==0 || llega2n_1==llega2n_2 || llega2n==0 || usopaleadora2n==0 || usopaleadora2n==0) || (llegatronco>0 || llegatronco_1>0))
{
espera=1;
}

if(usopaleadora>0)
{
espera2=0;
}

if(usopaleadora>0 || usopaleadora2n>0)
{
espera4=0;
}
else
{
espera4=1;
}
}
```

Figura 64: Ecuaciones que reúnen la restricción de introducir troncos por una de las entradas. (Fuente: Elaboración propia)

Justo después de haberse introducido un tronco en la línea de corte, se le asignarán dos atributos, como son la longitud y el diámetro con la ayuda de un bloque “*Get*”. En el caso de los troncos que vayan por la entrada principal, serán conducidos por medio de un “conveyor” hasta la descortezadora, y posteriormente se llevarán a su *buffer* correspondiente. La descortezadora tendrá asociada una probabilidad de parada, ya que normalmente se producen bastantes atascos en ella, que suponen un cierto retraso en la producción final. Hay que destacar, que estos tienen un tamaño variable, ya que el número de troncos que pueden almacenar en un determinado momento no es constante, ya que su diámetro variará. Por ello, es necesario, plantear unas ecuaciones mediante las cuales se restrinja la introducción de troncos a través de cualquiera de las entradas, hasta que el *buffer* admita algún tronco más.

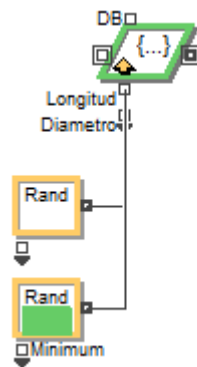


Figura 65: Bloque "Get" mediante el cual se asignarán los atributos de longitud y diámetro. (Fuente: Elaboración propia)

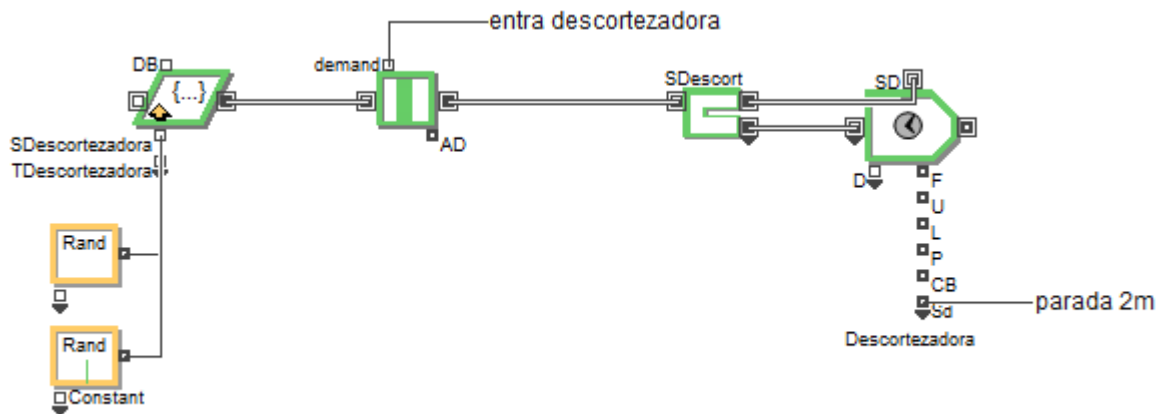


Figura 66: Caracterización de la probabilidad de parada en la descortezadora. (Fuente: Elaboración propia)

```

if(buffer2m>=7)
{
entrabuffer2m_1=0;
entrabuffer2m_2=0;
}
else
{
entrabuffer2m_1=1;
entrabuffer2m_2=1;
}

if(buffer4m>=10.5)
{
entrabuffer4m_1=0;
entrabuffer4m_2=0;
}
else
{
entrabuffer4m_1=1;
entrabuffer4m_2=1;
}

if(enpala2m>0 && buffer2m<7)
{
entrabuffer2m_1=0;
entrabuffer2m_2=1;
entrabuffer4m_2=0;
}

if(enpala4m>0 && buffer4m <10.5)
{
entrabuffer4m_1=0;
entrabuffer4m_2=1;
}
    
```

Figura 67: Conjunto de ecuaciones que restringen la entrada de troncos a los buffers. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 68: Recuento de la longitud total ocupada por los troncos en un instante determinado. (Fuente: Elaboración propia)

Más tarde, se introducirán cada uno de ellos en las máquinas serradoras a partir de las cuales se obtendrán distintas piezas. Como se comentó anteriormente, éstas tienen un tiempo de salida distinto, por lo que habrá que tenerlo en cuenta también en nuestro modelo.

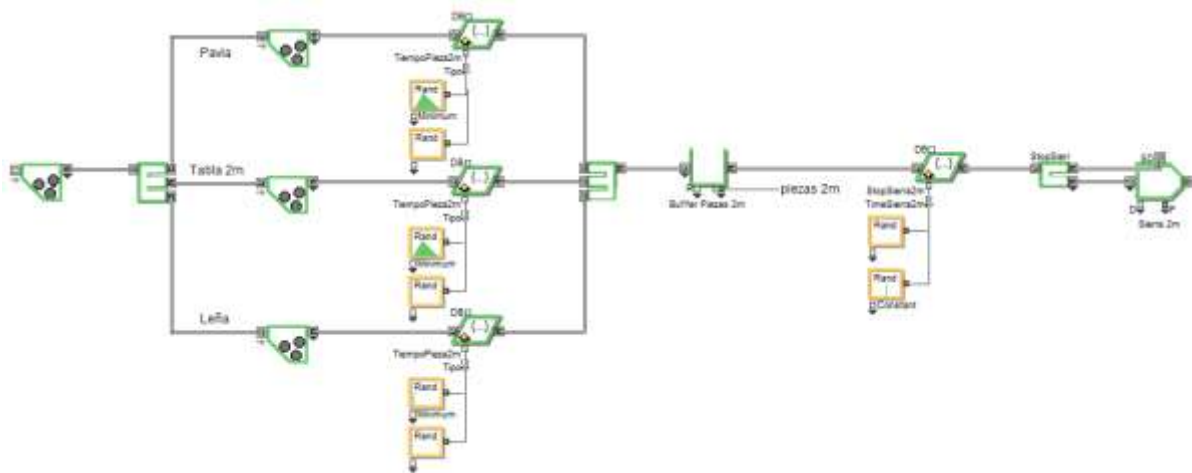


Figura 69: Proceso de obtención de distintas piezas a partir de las máquinas serradoras. (Fuente: Elaboración propia)

Llegados a este punto, el resto del modelo se explicará simplemente a partir de las imágenes, por estar ya caracterizado en el apartado anterior.

```

if(piezas2m>0)
{
    abre_sierra2m=0;
}
else
{
    abre_sierra2m=1;
}

if(piezas4m>0)
{
    abre_sierra4m=0;
}
else
{
    abre_sierra4m=1;
}
    
```

Figura 70: Ecuaciones que impiden cortar un tronco hasta que no salgan las piezas anteriores. (Fuente: Elaboración propia)

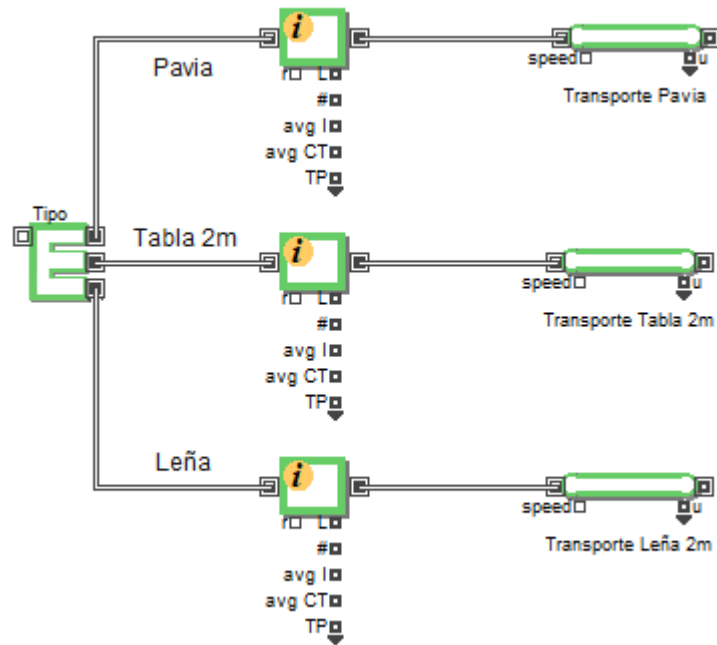


Figura 71: Dirección de las piezas de 2 metros según su tipo. (Fuente: Elaboración propia)

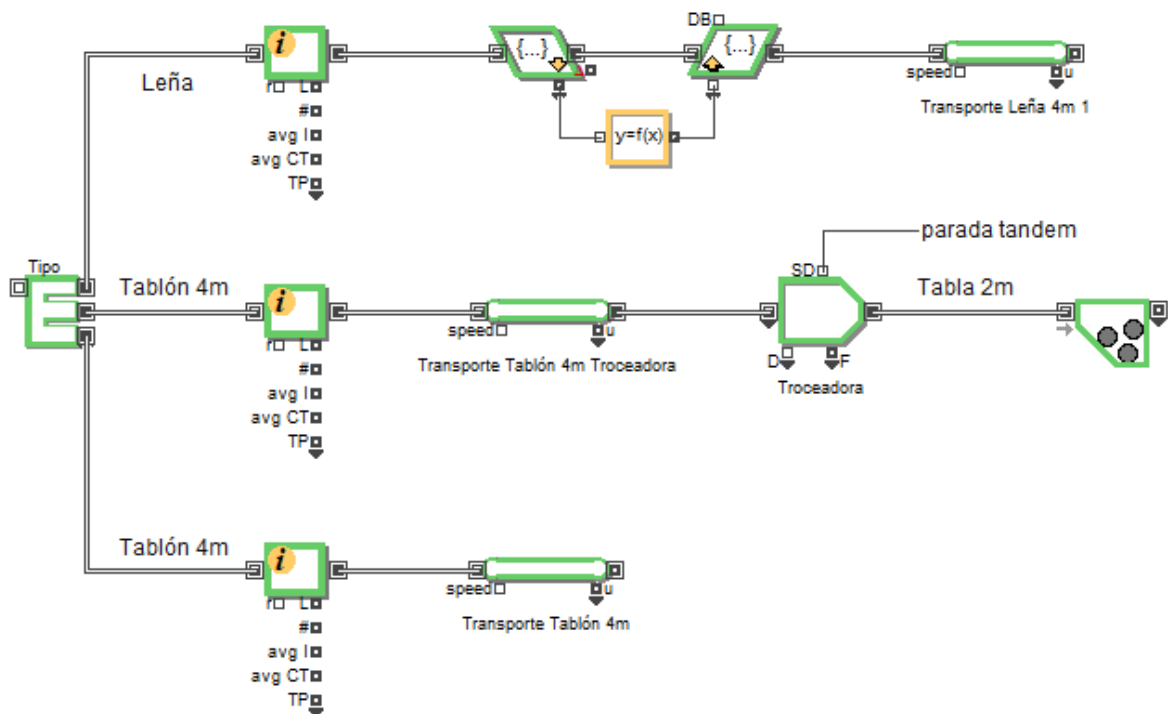


Figura 72: Dirección de las piezas de 4 metros según su tipo. (Fuente: Elaboración propia)

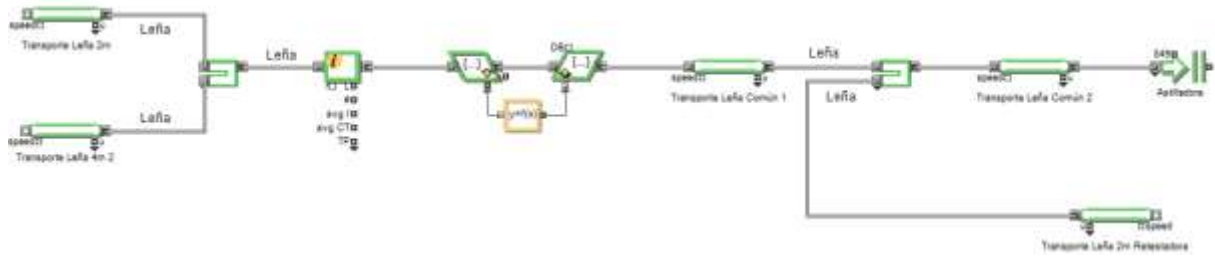


Figura 73: Camino seguido por la leña antes de llegar a la astilladora. (Fuente: Elaboración propia)

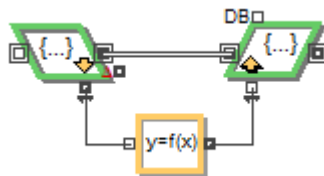


Figura 74: Creación del atributo "ancho" para emplearlo en el conveyor siguiente. (Fuente: Elaboración Propia)

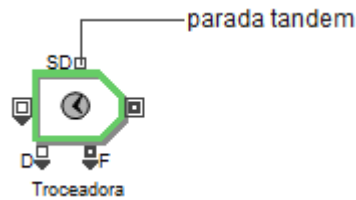


Figura 75: Influencia de las paradas del tándem en la troceadora. (Fuente: Elaboración propia)

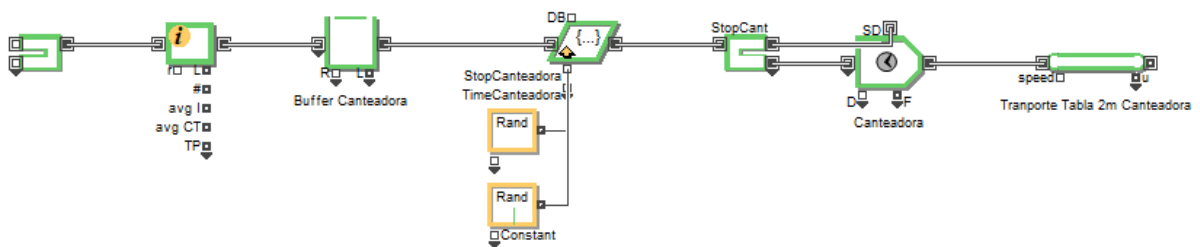


Figura 76: Proceso seguido por las tablas de 2 metros que confluyen en la canteadora. (Fuente: Elaboración propia)

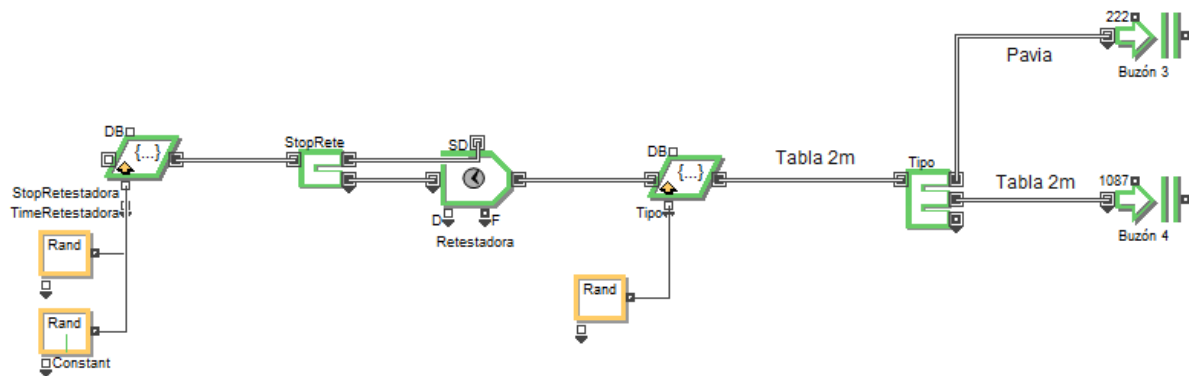


Figura 77: Introducción de piezas de 2 metros en la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)

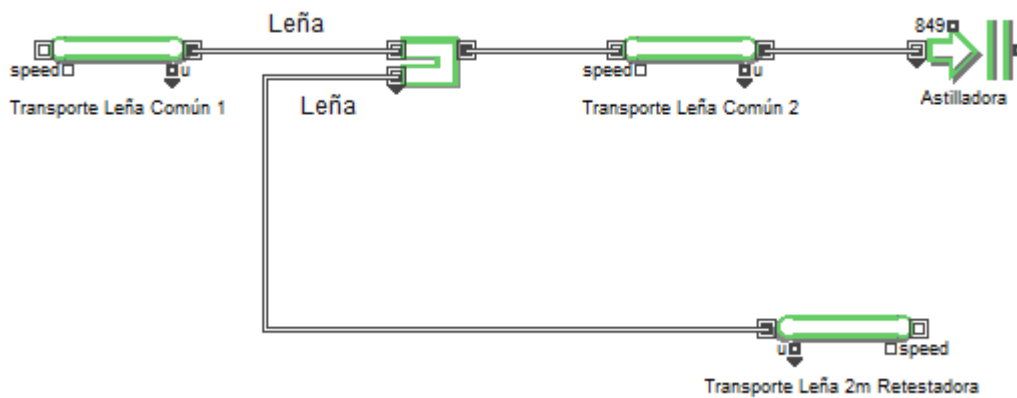


Figura 78: Circulación de la leña procedente de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)

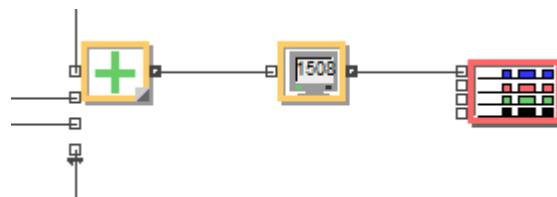


Figura 17: Contabilización del número de piezas totales producidas. (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, una vez descrito detalladamente todo el modelo de la línea de corte, se adjunta un diagrama del proceso en general para terminar de comprender la organización global del aserradero, así como también de la parte de secado y apilado, de la cual no es de especial interés modelar, debido a que la principal actividad y posterior margen de mejora se encuentra en la zona de corte.

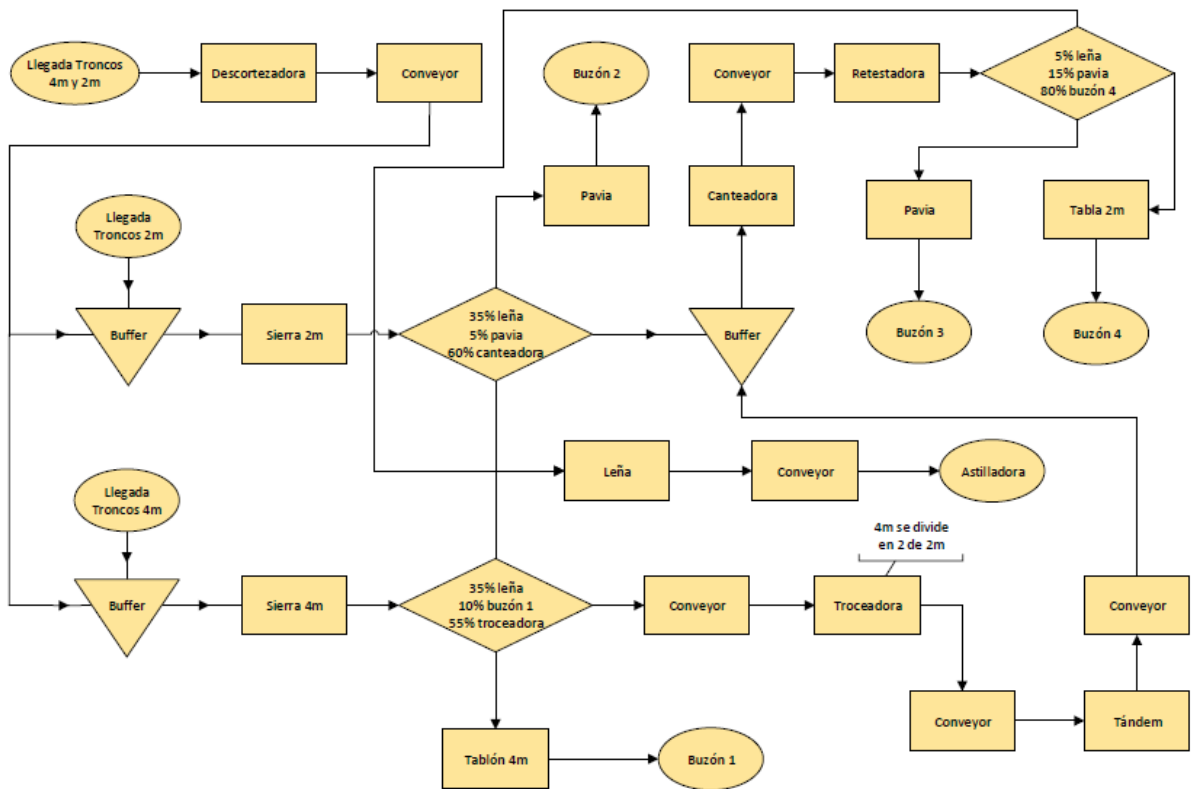


Figura 79: Diagrama de proceso de la línea de corte. (Fuente: Elaboración propia)

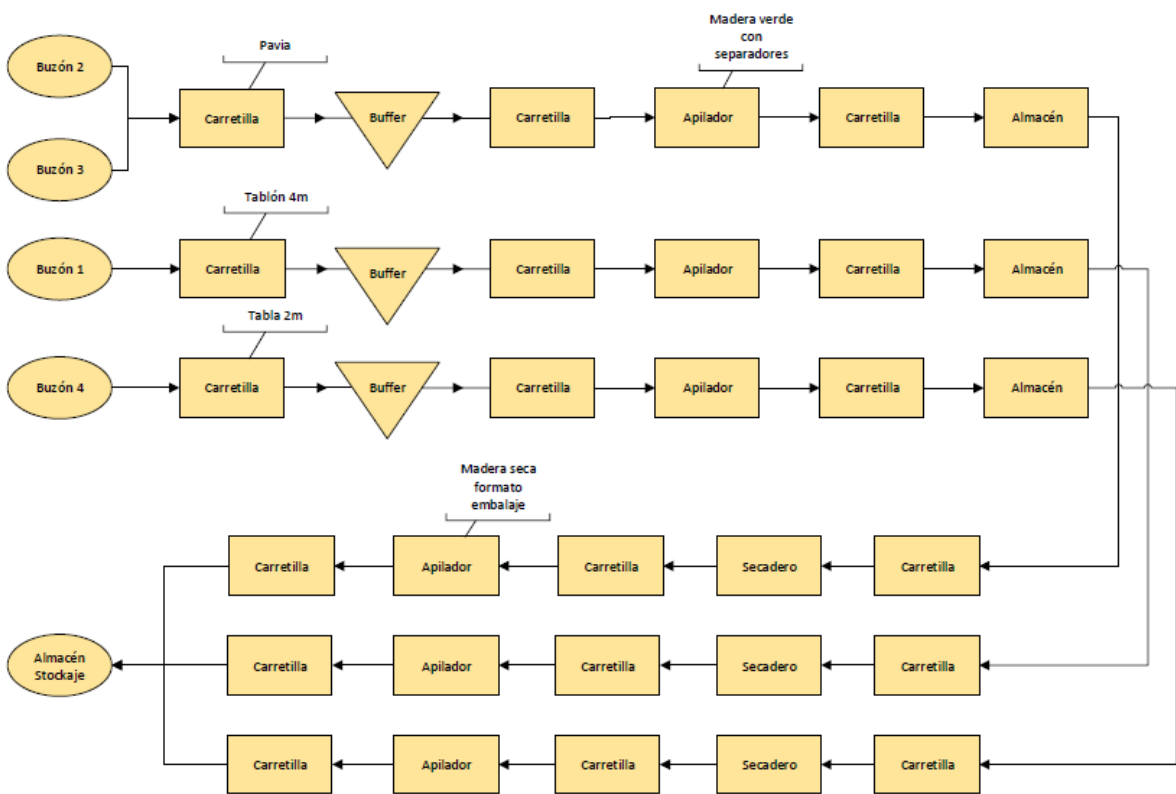


Figura 80: Diagrama de proceso de la zona de secado y apilado. (Fuente: Elaboración propia)

Por último, se adjunta una vista en 3D de la zona de corte, con el fin de hacerse una idea de la distribución de maquinaria dentro de la planta.

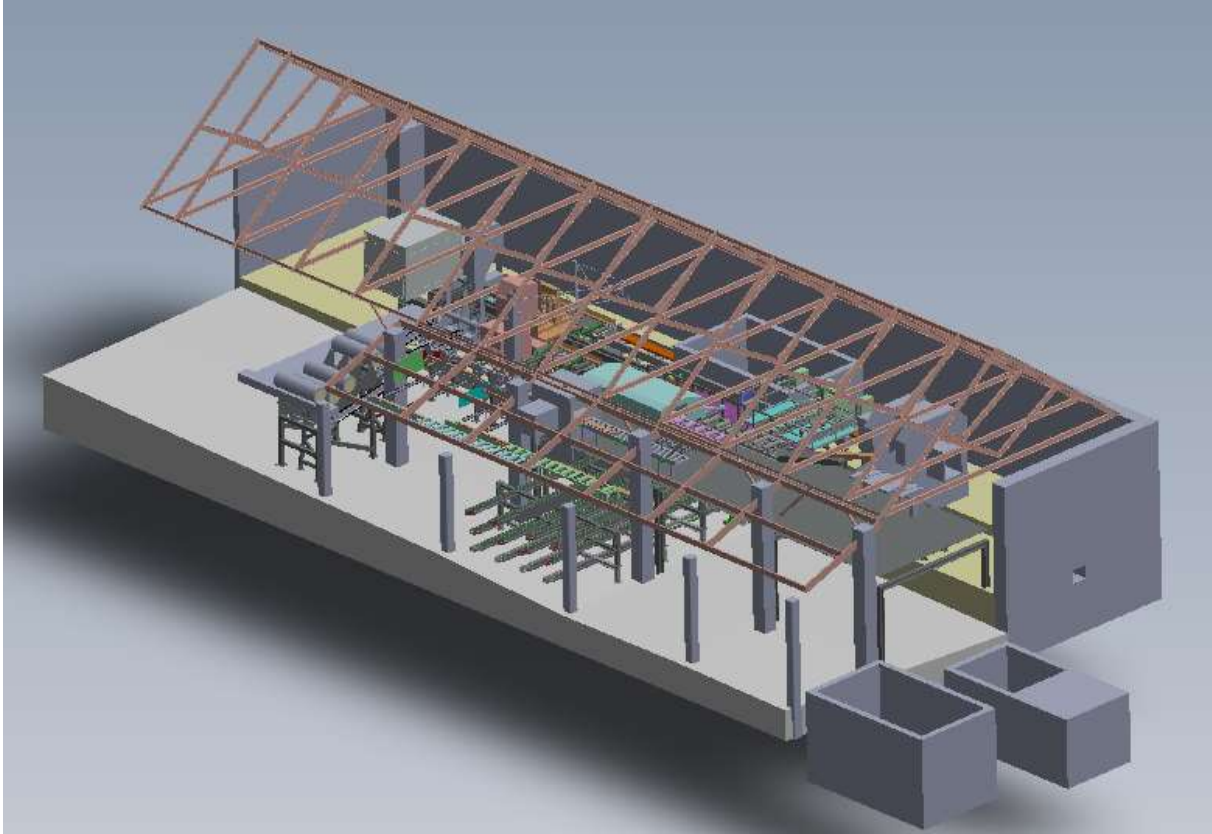


Figura 81: Vista 3D de la zona de corte del aserradero. (Fuente: Elaboración propia a partir de Asimov Efficiency S.L.)

Capítulo 4. Simulación de escenarios y optimización

4.1. Resultados del modelo actual

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos al ejecutar el modelo con los datos y parámetros con los que se está trabajando actualmente en el aserradero.

En primer lugar, podemos ver que el *buffer* que contiene los troncos de 4 metros está muy saturado, de forma que no permitirá entrar más troncos y conllevará una disminución de la producción final.



Figura 82: Utilización del buffer de troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 83: Utilización del buffer de troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Asimismo, observamos también que el buffer que contiene los troncos de 2 metros está algo infrautilizado, ya que su utilización apenas llega al 75%.

Además, las máquinas serradoras también estarán bastantes saturadas, ya que su ocupación total, es decir, el tiempo en el que están operando y en el que están paradas debido a un atasco o algo similar es bastante alto, casi de 100% en la de 4 metros y en torno a 80% en la de 2 metros.

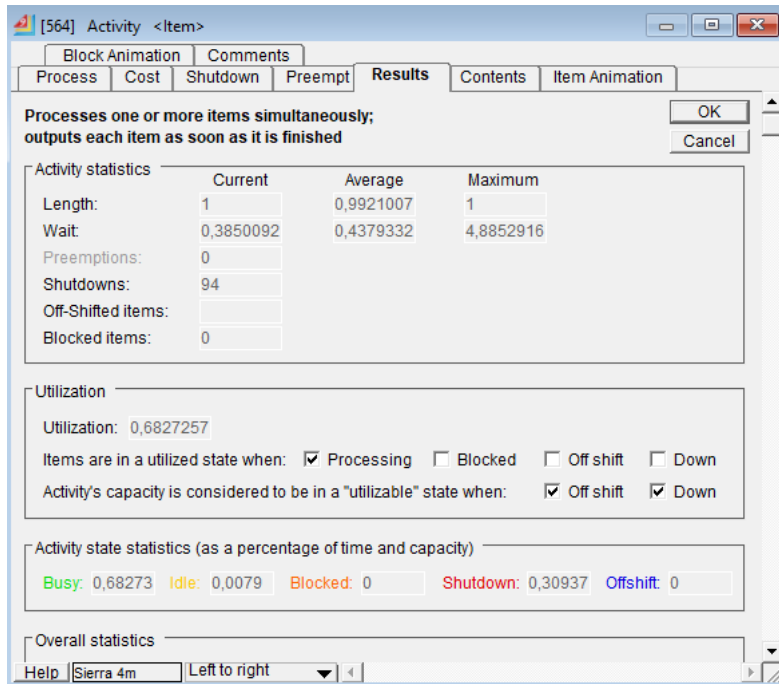


Figura 84: Utilización de la máquina serradora que opera con troncos de 4 metros. (Fuente: Elaboración propia)

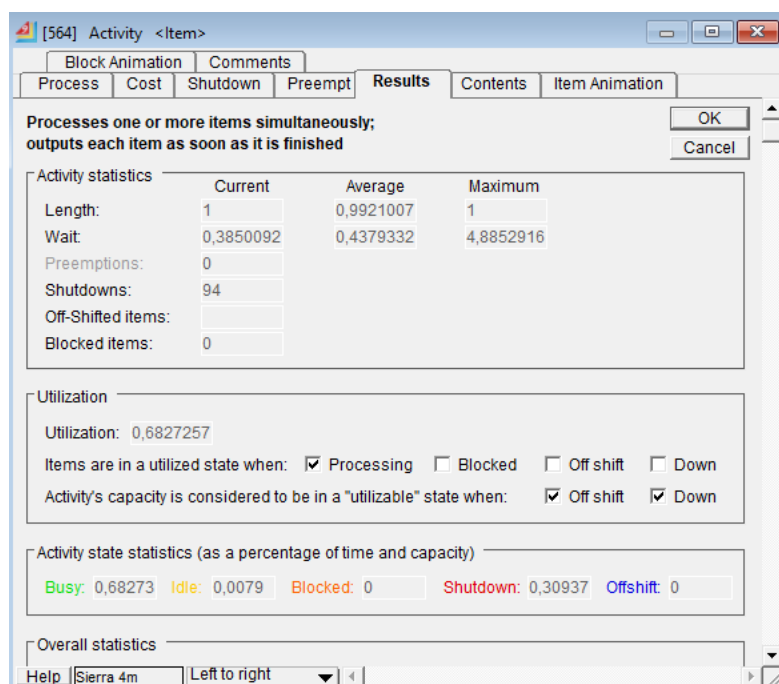


Figura 85: Utilización de la máquina serradora que opera con troncos de 2 metros. (Fuente: Elaboración propia)

Otra de las actividades en las que la utilización es relativamente elevada es el tándem.



Figura 86: Utilización del tándem. (Fuente: Elaboración propia)

Sin embargo, en cuanto a la troceadora, a la canteadora y a la retestadora, éstas se encuentran libres la mayor parte de su tiempo, debido principalmente a su corto tiempo de ciclo.

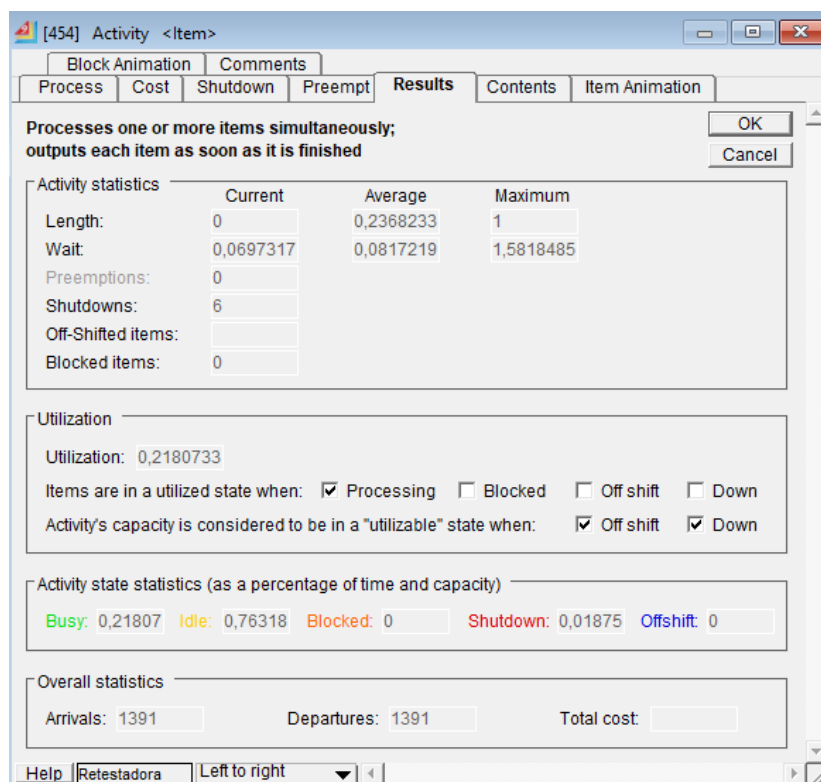


Figura 87: Utilización de la retestadora. (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, en cuanto a las piezas producidas, teniendo en cuenta un turno de trabajo de 8 horas, se obtienen aproximadamente 1130 tablas de 2 metros, 98 tablones de 4 metros y 100 y 215 piezas de pavia en los buzones correspondientes al 2 y al 3 respectivamente.

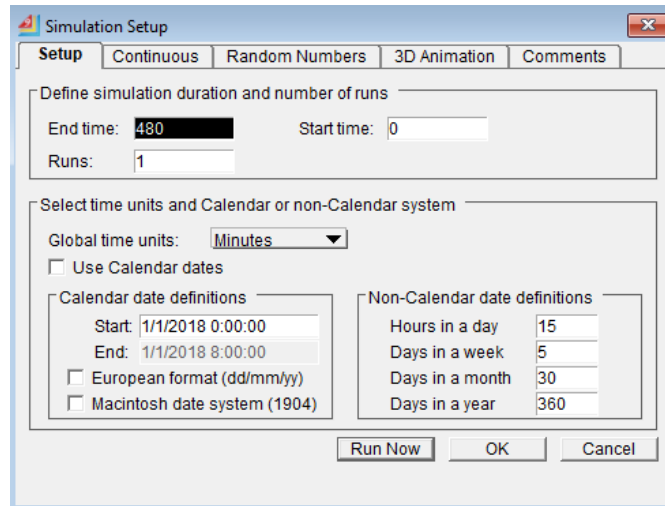


Figura 88: Indicación del tiempo real de simulación. (Fuente: Elaboración propia)

4.2. Optimización:

En primer lugar, gracias a la herramienta “*Scenario Manager*” se han podido optimizar los tiempos de llegada de los troncos, de forma que ahora ya conocemos la frecuencia con la que el operario debe introducir con la ayuda de la paleadora los troncos en el sistema.

El mejor resultado obtenido en cuanto a producción ha sido de 3 minutos para la entrada principal, 30 minutos para la de los de 4 metros y 15 para los de 2 metros. En un principio esto puede parecer extraño, ya que los tiempos de ida y vuelta de la paleadora son de 1,5 minutos, por lo que ésta estaría siempre ocupada operando en la entrada principal. Sin embargo, las ecuaciones del modelo han sido planteadas de forma que cuando tenga lugar una llegada de troncos desde una entrada secundaria, ésta tendrá preferencia respecto a la principal. A su vez, la entrada de troncos de 4 metros, va a tener preferencia respecto a la de 2 metros, ya que probablemente (el número de troncos ronda entre 2 y 4, a diferencia de la otra en la que pueden ser hasta 5) la paleadora no pueda transportar tantos como en el caso de los de 2 metros, por lo que terminará antes el proceso de carga y descarga sin producir retraso alguno. Aun así, la mejor solución sería 7 minutos para la entrada principal, 30 minutos para la de los de 4 metros y 21 para los de 2 metros, ya que a pesar de obtenerse unas pocas piezas menos (1769 frente a las 1780 anteriores), el coste de maquinaria va a ser mucho más bajo debido a la cantidad de viajes que se van a tener que realizar.

Por otro lado, en cuanto a las paradas, muchas veces cuando una máquina sufre un problema y se atasca, el operario que va a intentar solucionarlo, no es el correcto. Así, por ejemplo, cuando el tándem se atasca, es necesario parar toda la línea de producción que está aguas arriba, es decir la troceadora y la máquina serradora de troncos de 4 metros, por lo que el operario que se sitúa en dicha máquina, aprovechando que no puede seguir cortando debería de ver que ha sucedido y

arreglar el problema cuanto antes. Sin embargo, en numerosas ocasiones es el operario que trabaja en la canteadora el que se mueve para poner solución al problema, perdiendo un tiempo muy útil en que podría seguir canteando las tablas.

Esta situación también sucede cuando surge un problema en la descortezadora, y es el operario de la sierra que corta los troncos de 2 metros el que se dirige a solucionar el problema, o incluso el de la de 4 metros, lo que hará que el sistema se sature muy rápidamente ya que justo donde trabaja éste, se sitúa el mayor cuello de botella del proceso.

Scenarios									
	Select	Scenario Name	TBA_Principal	TBA_4m	TBA_2m	(M) 1	(Max) 1	(Min) 1	Details
380	<input type="checkbox"/>	Scenario 381	7	24	15	1692,0000	1692,0000	1692,0000	Show
381	<input type="checkbox"/>	Scenario 382	7	24	18	1676,0000	1676,0000	1676,0000	Show
382	<input type="checkbox"/>	Scenario 383	7	24	21	1516,0000	1516,0000	1516,0000	Show
383	<input type="checkbox"/>	Scenario 384	7	24	24	1521,0000	1521,0000	1521,0000	Show
384	<input type="checkbox"/>	Scenario 385	7	27	3	1274,0000	1274,0000	1274,0000	Show
385	<input type="checkbox"/>	Scenario 386	7	27	6	1444,0000	1444,0000	1444,0000	Show
386	<input type="checkbox"/>	Scenario 387	7	27	9	1589,0000	1589,0000	1589,0000	Show
387	<input type="checkbox"/>	Scenario 388	7	27	12	1579,0000	1579,0000	1579,0000	Show
388	<input type="checkbox"/>	Scenario 389	7	27	15	1699,0000	1699,0000	1699,0000	Show
389	<input type="checkbox"/>	Scenario 390	7	27	18	1607,0000	1607,0000	1607,0000	Show
390	<input type="checkbox"/>	Scenario 391	7	27	21	1652,0000	1652,0000	1652,0000	Show
391	<input type="checkbox"/>	Scenario 392	7	27	24	1478,0000	1478,0000	1478,0000	Show
392	<input type="checkbox"/>	Scenario 393	7	30	3	1206,0000	1206,0000	1206,0000	Show
393	<input type="checkbox"/>	Scenario 394	7	30	6	1333,0000	1333,0000	1333,0000	Show
394	<input type="checkbox"/>	Scenario 395	7	30	9	1368,0000	1368,0000	1368,0000	Show
395	<input type="checkbox"/>	Scenario 396	7	30	12	1664,0000	1664,0000	1664,0000	Show
396	<input type="checkbox"/>	Scenario 397	7	30	15	1742,0000	1742,0000	1742,0000	Show
397	<input type="checkbox"/>	Scenario 398	7	30	18	1735,0000	1735,0000	1735,0000	Show
398	<input type="checkbox"/>	Scenario 399	7	30	21	1769,0000	1769,0000	1769,0000	Show
399	<input type="checkbox"/>	Scenario 400	7	30	24	1725,0000	1725,0000	1725,0000	Show

Figura 89: Optimización de la frecuencia de llegada de troncos a cada una de las entradas. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 90: Luz roja que indica una señal de alarma debido a un atasco en el sistema. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 91: Operario de la canteadora mal situado solucionando problema en el tándem. (Fuente: elaboración propia)



Figura 92: Problema típico donde entran dos troncos a la vez, cuando solo uno puede entrar. (Fuente: Elaboración propia)

Aclarar, por tanto, que la mala organización en la solución de los problemas dentro de la línea de corte supone un claro retraso en la producción, que, a efectos cuantitativos según nuestro modelo, puede suponer la pérdida de aproximadamente 200 piezas al día. Es por ello que podía plantearse la introducción de un operario en la plantilla de trabajadores, para poder resolver estos atascos lo más rápido posible además de realizar operaciones de transporte para acortar tiempos de espera, ya que actualmente existen dos carretillas y una paleadora, pero solamente dos operarios

para manejarlas. Sin embargo, al no proporcionarnos la empresa datos de costes no se puede llevar a cabo este estudio, aunque queda propuesto para futuros análisis.

Por otro lado, existen unas cuantas indicaciones que deberían de seguirse para poder optimizar al máximo la producción. Algunas de ellas son más sofisticadas y otras se pueden percibir a simple vista por medio del sentido común, aunque no por ello son menos importantes.

Para empezar, sería adecuado que antes de empezar el turno de trabajo el operario que se encarga de introducir los troncos en el sistema, adelantase un poco su hora de llegada para que así, una vez que el resto de la lía de corte empezase a funcionar, los troncos ya estarían listos para procesar. Incluso en el resultado óptimo al que hemos llegado, puede verse este aspecto, ya que la entrada principal será alimentada cada 7 minutos, por lo que el sistema aún tardará unos cuantos minutos en alcanzar un “*régimen permanente*”, en el cual no haya que esperar a que se introduzcan más troncos teniendo las máquinas infrautilizadas.

Además, junto a todo lo referente a lo comentado en cuanto a las paradas, puede suceder que algún tronco se atasque cuando se sitúe en los dos *buffers* grandes que hay en el sistema, impidiendo así que entren más troncos o incluso que puedan alcanzar la máquina serradora para cortarlos. Por ello, como comentamos anteriormente, no deben moverse los operarios que se sitúan en las sierras, si no que en este caso debería de hacerlo el de la paleadora cuando vea que ya hay suficientes troncos dentro de la línea, ya que además si sigue introduciendo más, podría agravar el problema. Además, cuando suceda esto último, también puede aprovechar para llevar las astillas y la corteza para utilizarlas como combustible en el secadero. Comentar aquí, que también podría pensarse en construir un *conveyor* bajo tierra que fuese las fuese conduciendo muy lentamente, ya que interesa consumir lo menos posible. Unido a esto, también debe reducirse la velocidad de los *conveyors* que transportan la leña, ya que ésta no es utilizada como producto final en el mercado y tampoco interesa masificar su producción.

Otro aspecto importantísimo, sería automatizar la entrada de troncos en la línea, para que así los operarios no tuviesen que calcular a ojo cuando realizar un viaje con la paleadora y a qué entrada, además de que quedarían libres para realizar otras labores como la solución de atascos en la línea, o directamente prescindir de ellos ahorrando dinero la empresa.

Comentar también la mala distribución global del sistema, ya que está construido de forma que los troncos se introducen por el final del aserradero y luego además tienen que hacerse más recorrido para desplazarlos hasta la zona de secado y apilado, aunque este aspecto es un problema que a estas alturas ya no se puede corregir.

Finalmente, hay que hacer hincapié en las normas de seguridad que son tomadas allí, ya que la mayoría de trabajadores no disponen de chaleco reflectante, botas de seguridad, auriculares para la protección frente al ruido o ni siquiera casco.

Capítulo 5. Conclusiones

- ✓ Sería realmente importante el conseguir automatizar la entrada de los troncos al sistema, evitando que los operarios tengan que predecir indefinidamente cuando deben realizar un viaje con la paleadora.
- ✓ Existen varios cuellos de botella en el proceso, localizados fundamentalmente en la zona de corte, especialmente en la máquina serradora de troncos de 4 metros, que tiende a estar saturada prácticamente la totalidad del tiempo.
- ✓ Deben organizarse de manera adecuada los atascos que se puedan producir en la línea para evitar en la medida de lo posible retrasos en los tiempos de producción.
- ✓ Existen máquinas que están infrautilizadas, como por ejemplo la canteadora, lo que provoca que no se consiga aprovechar del todo la producción.
- ✓ La zona de los troncos de 2 metros está menos saturada, debido principalmente a que en esta etapa de está trabajando más con troncos de 4 metros que de 2 metros, de ahí que en nuestra optimización obtuviésemos una frecuencia de entrada de éstos últimos bastante mayor que los anteriores.
- ✓ Cabría la posibilidad de introducir un nuevo operario en el aserradero con el propósito de solucionar todos aquellos problemas que pudiesen surgir en la línea, a parte de poder introducir troncos por más de una entrada a la vez o simplemente aumentar la frecuencia de los viajes en las carretillas que se dirigen hacia el secadero o la zona de apilado.
- ✓ Respecto a lo anterior, también podría plantearse la construcción de un conveyor bajo tierra que trasladase automáticamente las astillas al secadero, sin tener que perder tiempo un operario en vez de utilizarlo en llevar las tablas producidas el secadero o introducir troncos en el sistema, además de evitar acumularlo en una montaña al aire libre la cual se esparcirá a lo largo de todo el suelo por la acción del viento, provoca así una mala expectativa del aserradero.
- ✓ Existe una mala distribución del sistema ya desde el principio del proceso debido a que la paleadora tiene que moverse más distancia por estar situada la zona de entrada de troncos al fondo del aserradero, mientras que el camión tiene que entrar más adentro de la zona de corte pudiendo interrumpir otros procesos de transporte.
- ✓ Las normas de seguridad son ínfimas, ya que la mayoría de trabajadores no disponen de chaleco reflectante, botas de seguridad, auriculares para la protección frente al ruido o ni siquiera casco, lo que podría tener graves consecuencias legales además de estar expuestos a posibles accidentes.

Capítulo 6. Futuras líneas de investigación

En este apartado se comentarán las principales líneas de investigación que se podrían tener en cuenta en un futuro, así como las posibles modificaciones en la estructura de la planta que permitirían una mejora global del proceso.

En primer lugar, según datos de los socios de *Asimov Efficiency S.L.* en la parte de secado y apilado, el apilador se sustituirá por un clasificador, de forma que ordenará automáticamente las piezas según el tipo, agrupándolas posteriormente entre separadores, evitando así el esfuerzo de tener que seleccionar previamente cada una de ellas.

Por otro lado, aparecerán algunos cambios en la línea de corte en cuanto a la circulación de la pavia, que presentará más de una zona de corte. Así, en el tándem se pueden adaptar estas medidas concretas según la preferencia que se tenga en ese momento, con el fin de adaptarse mejor al mercado. Se tratará también de mejorar las máquinas serradoras, de forma que tengan que consumir menos potencia o simplemente realizar menos cortes.

Asimismo, como se comentó anteriormente, se planteará la posibilidad de automatizar el sistema de entrada, además de evitar que la descortezadora y su posterior *conveyor* sean tan lentos.

Por último, y no por ello menos importante, pero sí mucho más complicado, se está estudiando la optimización del corte de la sección del tronco, para así, realizar los mínimos posibles e incrementar el número de piezas producidas al final del proceso. Sin embargo, para llevar a cabo esta mejora, sería necesario un software específico que realizase la optimización, la cual depende de muchas más variables de las que se piensa en un primer momento. Además, hay que tener en cuenta que el tronco no es un cilindro perfecto, si no que estaría ligeramente abombado o achatado en algunas zonas, lo que modificaría notablemente el proceso de corte.

Referencias bibliográficas:

- [1] Banks, J., II, J. C., & Barry, L. (2005). Discrete-event system simulation fourth edition.
- [2] Brettel, M., Friederichsen, N., & Keller, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective of mechanical industrial.
- [3] Castrillón, J. V. (2008). LA SIMULACIÓN DE PROCESOS, CLAVE EN LA TOMA DE DECISIONES. DYNA.
- [4] Guasch, A., Piera, M. A., Casanovas, J. (Casanovas G., & Figueras, J. (Figueras J. (2003). Modelado y simulación aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. Edicions UPC.
- [5] Peralta Abarca, J. del C. (2011). Simulación de procesos a través de eventos discretos. Inventio, La Génesis de La Cultura Universitaria En Morelos.
- [6] Bangsow, Steffen. "Uses cases of discrete event simulation. Appliance and Research", 2012.
- [7] Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., & Waldner, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting.
- [8] LU, Y., 2017. Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. Journal of Industrial Information Integration.
- [9] Lasi Hans-Georg Kemper, H., Peter Fettke, P., Thomas Feld, D.-I., & Michael Hoffmann, D.-H. (2014). Industry 4.0.
- [10] Law, A. M., McComas, M. G. "Simulation of Manufacturing Systems". Winter Simulation Conference, 1999.
- [11] Pazos Arias J.J, Suárez González A, Díaz Redondo R.P., "Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos", 2003.
- [12] Banks, J. "Introduction to Simulation". Winter Simulation Conference, 1999.
- [13] Nutter, P. "Manufacturing Simulation for Industrial Projects". Ohio Northern University, 2006.
- [14] Miller, S., Pegden, D. "Introduction to manufacturing Simulation". Winter Simulation Conference, 2000.
- [15] McLean, C., Leong S. "The Role of Simulation un Strategic Manufacturing".

[16] SOKOLOWSKI, J.A. y BANKS, C.M., 2010. Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains.

[17] Shannon, R.E. (1975) Systems Simulation: The Art and Science. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

[18] Sterman, J.D. (2000) Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. New York: McGraw-Hill.

[19] Winston, W.L. (1994) Operations Research: Applications and Algorithms, 3rd edn. Belmont, CA: Duxbury Press.

[20] SKOOGH, A. y JOHANSSON, B., 2008. A methodology for input data management in discrete event simulation projects. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference.

[21] Del Valle, Alejandro. "Apuntes Simulación de Procesos Industriales y Optimización".