

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Modelado y Simulación de Variantes de Líneas de Producción para la validación de aproximaciones y elaboración de modelos predictivos.

Autor: Juan Berges Sánchez

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de variantes de líneas de producción para la
validación de aproximaciones y elaboración de
modelos predictivos.

Autor:

Juan Berges Sánchez

Tutor:

José Manuel Framiñán Torres

Catedrático de Universidad

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Grado: Análisis de variantes de líneas de producción para la validación de aproximaciones y elaboración de modelos predictivos.

Autor: Juan Berges Sánchez

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mis padres, por ser mis
ejemplos en todos los aspectos.*

Agradecimientos

A mi madre por depositar en mí desde siempre toda su confianza, haciéndome saber que era capaz de alcanzar aquello que me propusiera, y a mi padre por enseñarme día a día lo que es trabajar por aquello que te hace feliz.

A Ángeles por estar siempre ahí. A mis hermanos y amigos.

Agradezco especialmente a Jose Manuel Framiñán Torres que me haya tutelado en este proyecto, por compartir su tiempo y conocimientos, por su dedicación y, en ocasiones, por su paciencia.

Juan Berges Sánchez

Graduado en Tecnologías Industriales

Sevilla, 2020

Resumen

En este proyecto se ha realizado un estudio sobre el comportamiento de las ecuaciones que modelan las principales variables de un sistema productivo, más concretamente de una línea de producción. Para ello se han elaborado una serie de modelos de simulación resultado de la combinación de una serie de parámetros como son: la congestión máxima del cuello de botella, el número de productos a procesar, el número de estaciones en serie y la discrepancia entre las distintas máquinas de estas estaciones. Estos modelos arrojarán los denominados ‘resultados de simulación’, tomados como representaciones fieles de la realidad y que serán comparados con los ‘resultados analíticos’ procedentes de la herramienta *ShopAnalyzer*.

Para abordar el estudio se hará a modo de introducción un recorrido sobre conceptos clave como el de proceso productivo, sus etapas, tipos y variables que lo definen, así como una descripción de lo que sería un proyecto de simulación y en mayor profundidad de las herramientas utilizadas (Arena Software Simulation).

El objetivo del análisis es concluir bajo qué circunstancias dichas ecuaciones presentan un mejor o peor comportamiento y, adicionalmente, se ha incluido un modelo predictivo basado en aprendizaje simulado de árboles de decisión regresivos, desarrollados en el lenguaje de programación *Python*, capaces de aprender de los resultados obtenidos y predecir el error que tendremos en el cálculo de nuestras variables bajo ciertas circunstancias.

Abstract

In this project a study has been carried out on the behaviour of the equations that model the main variables of a production system, more specifically of a production line. To this end, a series of simulation models have been drawn up as a result of combining a series of parameters such as: maximum bottleneck congestion, the number of products to be processed, the number of stations in series and the discrepancy between the different machines in these stations. These models will give the so-called 'simulation results', taken as faithful representations of reality and which will be compared with the 'analytical results' coming from the ShopAnalyzer tool.

In order to approach the study, an introduction will be made on key concepts such as the productive process, its stages, types and variables that define it, as well as a description of what a simulation project would be and in greater depth of the tools used.

The objective of the analysis is to conclude under which circumstances these equations present a better or worse behavior and, additionally, a predictive model based on simulated learning of regressive decision trees, developed in the Python programming language, capable of learning from the results obtained and predicting the error we will have in the calculation of our variables under certain circumstances, has been included.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
Notación	xxii
1 Objeto del Proyecto	2
1.1 <i>Objeto del Proyecto</i>	2
1.2 <i>Justificación</i>	2
1.3 <i>Sumario</i>	3
2 Descripción del Problema: Aproximaciones en el campo del Diseño de Sistemas Productivos	5
2.1 <i>Caracterización de un Proceso</i>	5
2.1.1 Tipos	6
2.1.2 Elementos del Proceso	6
2.2 <i>Variables del Proceso</i>	7
2.2.1 Variables de la 'caja negra'.	7
2.2.2 Variables internas del proceso	8
2.2.3 Relación entre las variables internas y externas	8
2.2.4 Congestión	9
2.2.5 Fórmula de Little	9
2.2.6 Aproximación de Kingman	10
2.3 <i>Introducción al Diseño de Sistemas Productivos</i>	10
2.3.1 Conceptos Importantes	11
2.3.2 Distribución en Planta	11
2.3.3 Tipos de Distribución en Planta.	12
2.3.4 Ventajas e Inconvenientes	14
2.3.5 Conclusiones	15
3 Descripción de la Metodología	17
3.1 <i>Simulación</i>	18
3.1.1 La necesidad de Simular	18
3.1.2 Ventajas e Inconvenientes	19
3.1.3 Fases de un Estudio de Simulación	19
3.2 <i>Arena Simulation</i>	22
3.2.1 Ventana Principal	23
3.2.2 Elementos Principales	23
3.2.3 Módulos	25
3.3 <i>Conclusiones</i>	27
4 Aplicación de la Metodología	29
4.1 <i>Variables de Interés</i>	29
4.2 <i>Escenarios de Simulación</i>	29
4.3 <i>Tiempos de Proceso</i>	30
4.3.1 Cálculo del Cuello de Botella	31
4.3.2 Cálculo de Tasas de entrada	32

4.4	<i>Funcionamiento de los Modelos</i>	33
4.4.1	Consideraciones del modelo	34
4.4.2	Módulo Entrada al Sistema	35
4.4.3	Módulo Asignación	35
4.4.4	Módulo Operación	36
4.4.5	Módulo Salida del Sistema	36
4.5	<i>ShopAnalyzer</i>	37
4.5.1	Funcionamiento	37
4.6	<i>Modelos Predictivos</i>	40
5	Experimentación y Resultados	43
5.1	<i>Resultados de la Simulación</i>	43
5.1.1	Resultados para procesos de 1 producto	43
5.1.2	Resultados para procesos de 3 productos	45
5.1.3	Resultados para procesos de 5 productos	46
5.2	<i>Resultados Analíticos</i>	48
5.2.1	Resultados para procesos de 1 producto	48
5.2.2	Resultados para procesos de 3 productos	50
5.2.3	Resultados para procesos de 5 productos	51
5.3	<i>Errores</i>	53
5.3.1	Errores para procesos de 1 producto	53
5.3.2	Errores para procesos de 3 productos	56
5.3.3	Errores para procesos de 5 productos	59
6	Análisis de Resultados	63
6.1	<i>Variables de Interés</i>	63
6.1.1	Work In Process	66
6.1.2	Tiempo de Ciclo	68
6.1.3	Tiempos de Espera	70
6.2	<i>Análisis de los errores</i>	73
6.2.1	Error en el WIP	73
6.2.2	Error en el tiempo de ciclo	75
6.2.3	Error en el tiempo de espera	77
6.3	<i>Modelo Predictivo: Árboles de Decisión</i>	79
6.3.1	Árbol de Decisión del WIP	80
6.3.2	Árbol de Decisión del CT	81
6.3.3	Árbol de Decisión del QT	82
6.3.4	Comprobación Funcionamiento de los Modelos Predictivos	83
	Conclusiones	85
	Referencias	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas de las tipologías básicas de procesos.	14
Tabla 2. Desventajas de las tipologías básicas de procesos.	15
Tabla 3. Tiempos de Proceso.	31
Tabla 4. Sumatorio de Tiempos de Proceso	31
Tabla 5. Tiempos de Proceso Medios	31
Tabla 6. Tasas de Entrada para una ρ del 50%.	32
Tabla 7. Tasas de Entrada para una ρ del 65%.	32
Tabla 8. Tasas de Entrada para una ρ del 80%.	32
Tabla 9. Tasas de Entrada para una ρ del 95%.	32
Tabla 10. Resultados de simulación para escenarios con 1 producto y discrepancia alta.	43
Tabla 11. Resultados de simulación para escenarios con 1 producto y discrepancia media.	44
Tabla 12. Resultados de simulación para escenarios con 1 producto y discrepancia baja.	44
Tabla 13. Resultados de simulación para escenarios con 3 productos y discrepancia alta.	45
Tabla 14. Resultados de simulación para escenarios con 3 productos y discrepancia media.	45
Tabla 15. Resultados de simulación para escenarios con 3 productos y discrepancia baja.	46
Tabla 16. Resultados de simulación para escenarios con 5 productos y discrepancia alta.	46
Tabla 17. Resultados de simulación para escenarios con 5 productos y discrepancia media.	47
Tabla 18. Resultados de simulación para escenarios con 5 productos y discrepancia baja.	47
Tabla 19. Resultados analíticos para escenarios con 1 producto y discrepancia alta.	48
Tabla 20. Resultados analíticos para escenarios con 1 producto y discrepancia media.	49
Tabla 21. Resultados analíticos para escenarios con 1 producto y discrepancia baja.	49
Tabla 22. Resultados analíticos para escenarios con 3 productos y discrepancia alta.	50
Tabla 23. Resultados analíticos para escenarios con 3 productos y discrepancia media.	50
Tabla 24. Resultados analíticos para escenarios con 3 productos y discrepancia baja.	51
Tabla 25. Resultados analíticos para escenarios con 5 productos y discrepancia alta.	51
Tabla 26. Resultados analíticos para escenarios con 5 productos y discrepancia media.	52

Tabla 27. Resultados analíticos para escenarios con 5 productos y discrepancia baja.	52
Tabla 28. Errores en el WIP para escenarios con 1 producto.	53
Tabla 29. Errores en el QT para escenarios con 1 producto.	54
Tabla 30. Errores en el CT para escenarios con 1 producto.	55
Tabla 31. Errores en el WIP para escenarios con 3 productos.	56
Tabla 32. Errores en el QT para escenarios con 3 productos.	57
Tabla 33. Errores en el CT para escenarios con 3 productos.	58
Tabla 34. Errores en el WIP para escenarios con 5 productos.	59
Tabla 35. Errores en el QT para escenarios con 5 productos.	60
Tabla 36. Errores en el CT para escenarios con 5 productos.	61
Tabla 37. Unidades producidas con éxito.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo del Proceso como una caja negra.	7
Figura 2. Modelo del Proceso variables internas.	8
Figura 3. Modelo del Proceso variables internas y externas.	9
Figura 4. Esquema básico de Sistema de Producción.	10
Figura 5. Esquema básico Flow Shop.	13
Figura 6. Esquema básico Job Shop.	13
Figura 7. Esquema básico Project Shop.	13
Figura 8. Casos de uso de las tipologías básicas de procesos.	16
Figura 9. Tipos de experimentación sobre un sistema.	17
Figura 10. Pasos de un estudio de simulación.	21
Figura 11. Estructura jerárquica de Arena.	22
Figura 12. Vista de la ventana principal de Arena.	23
Figura 13. Módulos Create genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.).	25
Figura 14. Módulos Dispose genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.).	26
Figura 15. Módulos Process genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.).	26
Figura 16. Módulos Assign genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.).	27
Figura 17. Esquema de elaboración de modelos. 1 Producto.	30
Figura 18. Escenario general.	33
Figura 19. Parámetros del módulo Entrada al Sistema.	35
Figura 20. Parámetros del módulo Asignación.	35
Figura 21. Parámetros del módulo Asignación.	36
Figura 22. Etiquetas ShopAnalyzer. 5 prod 10 est cong. cuello de botella 50%, disc. alta.	39
Figura 23. Código de importación de librerías.	40
Figura 24. Código de Cargar Datos.	41
Figura 25. Código para separar los datos.	41
Figura 26. Buen ajuste frente a sobreajuste.	41

Figura 27. Comando para ejecutar modelo de árbol de decisión.	41
Figura 28. Código para entrenar y hacer predicciones.	42
Figura 29. Calcular y sacar por pantalla los errores.	42
Figura 30. Dibujar árbol de decisión.	42
Figura 31. Evolución uds. producidas con éxito.	64
Figura 32. Evolución uds. producidas con éxito para sistemas de 3 y 5 productos.	65
Figura 33. Evolución del WIP para sistemas de 1 producto.	66
Figura 34. Evolución del WIP para sistemas de 3 productos.	66
Figura 35. Evolución del WIP para sistemas de 5 productos.	67
Figura 36. Evolución del CT para sistemas de 1 producto.	68
Figura 37. Evolución del CT para sistemas de 3 productos.	68
Figura 38. Evolución del CT para sistemas de 5 productos.	69
Figura 39. Evolución del QT para sistemas de 1 producto.	70
Figura 40. Evolución del QT para sistemas de 3 productos.	70
Figura 41. Evolución del QT para sistemas de 5 productos.	71
Figura 42. Evolución del QT para sistemas de 1 producto ShopAnalyzer.	71
Figura 43. Evolución del QT para sistemas de 3 productos ShopAnalyzer.	72
Figura 44. Evolución del QT para sistemas de 5 productos ShopAnalyzer.	72
Figura 45. Evolución del error en el WIP para sistemas de 1 producto.	73
Figura 46. Evolución del error en el WIP para sistemas de 3 productos.	74
Figura 47. Evolución del error en el WIP para sistemas de 5 productos.	74
Figura 48. Evolución del error en el CT para sistemas de 1 producto.	75
Figura 49. Evolución del error en el CT para sistemas de 3 productos.	75
Figura 50. Evolución del error en el CT para sistemas de 5 productos.	76
Figura 51. Evolución del error en el QT para sistemas de 1 producto.	77
Figura 52. Evolución del error en el QT para sistemas de 3 productos.	77
Figura 53. Evolución del error en el QT para sistemas de 5 productos.	78
Figura 54. Ejemplo árbol de decisión.	79
Figura 55. Árbol de Decisión del WIP.	80
Figura 56. Árbol de Decisión del CT.	81

Notación

D.S.P	Diseño de Sistema Productivos
WIP	Work-in-process. Trabajo dentro del proceso
c.d.b	Cuello de Botella
λ	Tasa de llegada en unidades/Ud. de tiempo
ct	Tiempo de ciclo en Ud.de tiempo
qt	Tiempo de espera en Ud. de tiempo
e.o.c.	En cualquier otro caso
Mse	Minimum square error
Mae	Mean absolute error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
→	Por tanto
⇔	Si y sólo si
UNIF [a, b]	Distribución uniforme continua entre los valores a y b
LOGN[media, desv]	Distribución normal-logarítmica

1 OBJETO DEL PROYECTO

En este primer bloque introductorio se tratará de exponer el objetivo del proyecto y su alcance esperado, así como su justificación dentro del marco de su área de conomiento. Se añadirá también un sumario explicativo de la estructura que seguirá el documento para facilitar la tarea del lector.

1.1 Objeto del Proyecto

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar los errores inherentes a las expresiones o aproximaciones que empleamos en el ámbito del diseño de sistemas productivos, centrándonos en líneas de producción. Para ello se hará uso del modelado y simulación de una gran casuística de escenarios resultantes de la combinación de factores clave en el diseño de sistemas productivos (tasa de entrada, congestión de la estación cuello de botella,..) que analizaremos más adelante.

Se analizarán los errores entre los resultados arrojados por el software de simulación, *Arena Simulation Software*®, y los obtenidos por el método analítico mediante la herramienta *ShopAnalyzer* desarrollada por Jose M. Framiñán, Catedrático del Departamento de Organización y Gestión de Empresas I de la Universidad de Sevilla.

A partir de estas discrepancias entre los resultados de simulación y los resultados analíticos se tratarán de obtener conclusiones valiosas acerca de cómo y cuándo funcionan mejor las aproximaciones que se emplean.

En última instancia se plantea la posibilidad de elaborar, a partir de la información recabada, una serie de modelos de Regresión No Lineales. La idea es que dichos modelos sirvan como herramienta para saber de antemano el error que el sistema va a acarrear en los cálculos de variables importantes como el WIP o el tiempo de ciclo, y poder así realizar los ajustes previos necesarios. Para ello se programará un modelo de regresión basado en árboles de decisión, con el leguaje de programación *Python*, siguiendo los fundamentos del Machine Learning.

1.2 Justificación

El proceso de diseño y construcción de un sistema de producción, como por ejemplo una línea de montaje, puede suponer en algunas ocasiones un proyecto millonario, por lo que resulta de gran importancia un estudio que facilite la minimización de posibles errores.

En el ámbito de estudio del diseño de sistemas productivos (en adelante D.S.P), el funcionamiento de cualquier entorno de producción ya sea del tipo *Job Shop* (taller) o del tipo *Flow Shop* (de flujo), se modela con una serie de ecuaciones matemáticas. Dichas ecuaciones no son más que unas aproximaciones al comportamiento real de una instalación, por lo que para mayor fidelidad recogen factores cómo la variabilidad, desviaciones típicas, etc. Sí bien estas aproximaciones presentan buenos resultados, existe una enorme casuística en cuanto al funcionamiento de un entorno productivo procedente de la combinación de todas sus características de diseño. Dicha incertidumbre ha servido de motivación para llevar acabo este estudio, con el objetivo de establecer bajo qué circunstancias las ecuaciones ofrecen un mejor ó peor resultado.

1.3 Sumario

Este estudio ha sido estructurado en una serie de bloques organizados para conducir al lector desde lo más simple como conceptos básicos e introductorios, hasta lo más complejo como el análisis final de los resultados y las conclusiones. Por medio de esta cohesión que cada bloque tiene con los anteriores se consigue dar linealidad y dinamismo al trabajo.

En el primer bloque, compuesto por los capítulos 1 y 2, se plantea y describe el problema a resolver. Servirá para introducir conceptos que serán clave para la comprensión del estudio y para situarnos en el marco de actuación adecuado. Comenzaremos definiendo lo que es un proceso industrial o proceso productivo, sus etapas y elementos, posteriormente veremos como se modelan cada uno de los componentes de ese proceso y las ecuaciones que rigen su comportamiento.

El segundo bloque formado únicamente por el capítulo 3, servirá para la descripción de la metodología a seguir en la resolución de nuestro problema y la consecución de nuestro objetivo. En él expondremos la necesidad de recurrir a la simulación para abordar un problema como el nuestro, sus ventajas e inconvenientes, así como las fases que ha de tener un proyecto de simulación. Una vez haya quedado patente que la mejor opción en nuestro caso es operar sobre sistemas simulados, profundizaremos en la herramienta principal de la que hemos hecho uso, el software de simulación ARENA.

El tercer bloque (capítulo 4) corresponde a la aplicación de la metodología. Se describe en profundidad el proceso llevado a cabo en la resolución del problema, la creación y validación de los modelos de simulación, la elección de tiempos de proceso e identificación de los cuellos de botella para cada configuración, los cálculos de tasas de entrada y una serie de consideraciones y restricciones que se han tenido en cuenta. En cuanto al diseño de los modelos y la configuración de su funcionamiento se dedica un subapartado completo en el que se detalla el uso de cada uno de los módulos empleados. Una vez hemos concluido con el software Arena, describimos el uso que se ha hecho de la herramienta ShopAnalyzer. Por último presentamos el código Python debidamente comentado y explicado para la comprensión de su funcionamiento y de los posteriores resultados.

El cuarto y último bloque, compuesto por los capítulos 5 y 6, servirá para la exposición y análisis de los resultados. Se expondrán los resultados de simulación y los resultados analíticos, el cálculo de los errores existentes entre ambos y representaciones gráficas que muestren su evolución y ayuden a la comprensión de su comportamiento, acompañadas de breves conclusiones obtenidas de las mismas. Se expondrán también los resultados del modelo predictivo desarrollado, los árboles de decisión.

Para terminar se analizará el trabajo en su conjunto y se extraerán conclusiones generales.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA: APROXIMACIONES EN EL CAMPO DEL DISEÑO DE SISTEMAS PRODUCTIVOS

En este bloque se va a tratar de describir en profundidad y al detalle el problema que nos ocupa. Haciendo un breve recorrido por este campo de la ingeniería hasta las ecuaciones que son objeto de este estudio, pasando por algunas definiciones importantes, yendo desde los conceptos más generales hasta los más particulares.

Según ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology) la ingeniería es:

“The creative application of scientific principles to design or develop structures, machines, apparatus, or manufacturing processes, or works utilizing them singly or in combination; or to construct or operate the same with full cognizance of their design; or to forecast their behavior under specific operating conditions; all as respects an intended function, economics of operation or safety to life and property”

Traducción: *“La aplicación creativa de principios científicos para **diseñar** o desarrollar estructuras, máquinas, aparatos o **procesos de fabricación**, o trabajos que los utilicen individualmente o en combinación; o para construir u operar los mismos con pleno conocimiento de su diseño; o **para predecir su comportamiento** bajo condiciones operativas específicas; todo ello en lo que respecta a una función prevista, economía de operación o seguridad para la vida y la propiedad.”*

Y más concretamente, la ingeniería industrial es una disciplina de la ingeniería que se encarga de analizar, interpretar, comprender, diseñar, programar, controlar y optimizar los sistemas de transformación de bienes y servicios. Su finalidad es la gestión, implementación y establecimiento de estrategias de optimización para lograr el máximo rendimiento en los **procesos productivos** (Salazar López, B., 2019).

Pero, ¿qué es un proceso (industrial) o proceso de fabricación?

2.1 Caracterización de un Proceso

Según la norma ISO 9000:2005 un **proceso** es “un conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados”, dichos resultados u *outputs* son conocidos como **productos** y cuentan con un valor añadido respecto a las entradas o *inputs*, atendiendo también a aspectos cruciales como la calidad, los plazos de entrega y costes.

Las principales características de un proceso son (Gómez Rojo, B., 2006; Luengo; 2010; Rincón, 2012; Framiñán, 2018a):

- **Estocástico:** El comportamiento de sus variables está sujeto al azar, no viene predeterminado por sus condiciones iniciales pues contiene algún componente con características probabilísticas.
- **Dinámico:** Los valores que toman sus variables de estado cambian a lo largo del tiempo.
- **Complejo:** Un proceso está compuesto de múltiples sub-procesos, los cuales a su vez formados por numerosas variables y elementos.

- **Discretos:** Se procesa un número de unidades medible por unidad de tiempo. Por lo general resultan más complejos de modelar y optimizar.

2.1.1 Tipos

Existen numerosas formas de clasificar un proceso. Según el producto final encontramos los siguientes tipos de procesos de fabricación (Torrents, A. S., Vilda, F. G., & Postils, I. A., 2010; Espinoza, D., 2013; López, 2016):

- Producción por proyecto:** Empleada para productos con características únicas, supone la fabricación de un producto individualizado por lo que cada proyecto conllevará un proceso específico. Se considera un proceso de mano de obra intensiva resultado de la combinación de fabricación manual con interacción de máquinas y/o equipos. Por ejemplo la fabricación de un barco.
- Producción por lotes:** Caracterizada por la fabricación de pequeñas cantidades idénticas de un producto. Esta modalidad no es tan intensiva en cuanto a mano de obra pues se emplean plantillas o modelos que agilizan la producción y que pueden ser sustituidas fácilmente cuando sea necesario.
- Producción en masa:** Modelo productivo altamente mecanizado y automatizado. Procesa miles de unidades idénticas entre sí con lo que se consigue reducir los costes unitarios a pesar de que la inversión en maquinaria y personal es muy elevada. Por lo general el modelo empleado es la línea de fabricación.
- Producción de flujo continuo:** Se procesan varios miles de unidades. Modelo idéntico al anterior pero con la peculiaridad de que el flujo de producción nunca se interrumpe, funcionando las 24 horas del día los 7 días de la semana. De esta manera se consigue maximizar la producción eliminando los costes de *Set-up* asociados a detener y volver a iniciar el proceso. Es el modelo que cuenta con el mayor grado de automatización y con menos necesidades de personal, haciéndolo el más eficiente.

2.1.2 Elementos del Proceso

Por elementos entendemos los componentes que físicamente conforman el proceso. Estos son (Framiñán, 2018a):

- **Trabajos:** Es la unidad a transformar y cuyo valor añadido va a ser incrementado a lo largo de todo el proceso de fabricación. Dependiendo de su situación dentro del proceso estos trabajos pueden ser materias primas (antes de iniciar el proceso), trabajo en proceso (WIP) y producto terminado. Es habitual medir los trabajos en tasas, cuyas unidades son trabajos por unidad de tiempo. Estas tasas serán definidas más adelante.
- **Estaciones:** También denominadas puestos de trabajo, unidades o células de fabricación. Constituyen cada una de las etapas de transformación en las que se descompone el proceso. Es un lugar específico en el que se realizan una o varias operaciones en un tiempo determinado conocido como *tiempo de ciclo*.
- **Máquinas:** Unidad capaz de realizar una operación sobre un trabajo. Puede haber una o varias máquinas por estación.
- **Buffers:** Elementos cuya función principal es servir de punto de espera para los trabajos antes o después de una máquina. Pueden también cumplir simultáneamente funciones de transporte. Aunque generalmente están destinados a trabajos, puede haber buffers de materiales o suministros necesarios para llevar a cabo las operaciones. Su funcionamiento es el mismo.

Una vez vistos los elementos pasamos a analizar las variables y ecuaciones que gobiernan y relacionan dichos elementos.

2.2 Variables del Proceso

En este subapartado se van a definir las principales variables que encontramos en un proceso productivo, así como las relaciones o ecuaciones que los relacionan y que son, en definitiva, el objeto de este estudio. La información que este subapartado refleja ha sido obtenida, sintetizada y expresada en base a los apuntes teóricos realizados por José M. Framiñán para la asignatura ‘Diseño de Procesos’ del Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.

2.2.1 Variables de la ‘caja negra’.

Entendiendo el proceso como una caja negra con unas entradas y unas salidas de materiales, podemos definir las siguientes variables (Framiñán, 2018a).

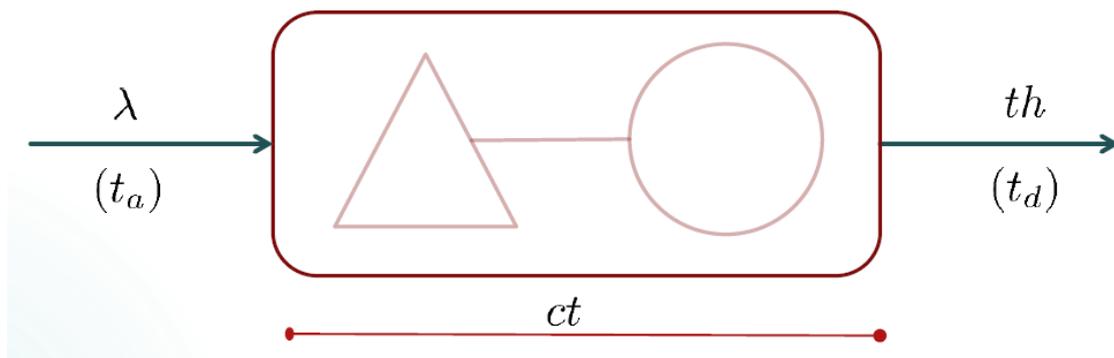


Figura 1. Modelo del Proceso como una caja negra [Fuente: Framiñán 2018]

- t_a : Tiempo entre llegadas (time between arrivals).
- t_d : Tiempo entre salidas (time between departures).
- λ : Tasa de entrada. Número de trabajos/ud. de tiempo que entran en el sistema en promedio y a largo plazo.
- th : Tasa de salida o *Throughput*. Número de trabajos/ud. de tiempo que salen del sistema en promedio y a largo plazo.
- ct : Tiempo de ciclo. Unidades de tiempo que pasan los trabajos en el sistema en promedio y a largo plazo.

Tenemos que $\lambda = \frac{1}{t_a}$; y que $th = \frac{1}{t_d}$. Por lo tanto por el principio de conservación de las tasas medias que implica que, en promedio, las uds. que entran en un sistema **estable** es igual al número de unidades que salen por ud. de tiempo tendríamos que: $\lambda = th$.

Otra forma de escribirlo sería: $t_a = t_d$

2.2.2 Variables internas del proceso

Ahora, si analizamos el interior de dicha caja negra que es el proceso, vemos que el trabajo sufre una transformación, ya sea física, química o de información. Esta transformación es llevada a cabo por las máquinas y se denomina **servicio**. Al igual que en el caso anterior, es posible definir unas variables internas del proceso con un comportamiento medio y a la largo plazo (Framiñán, 2018a).

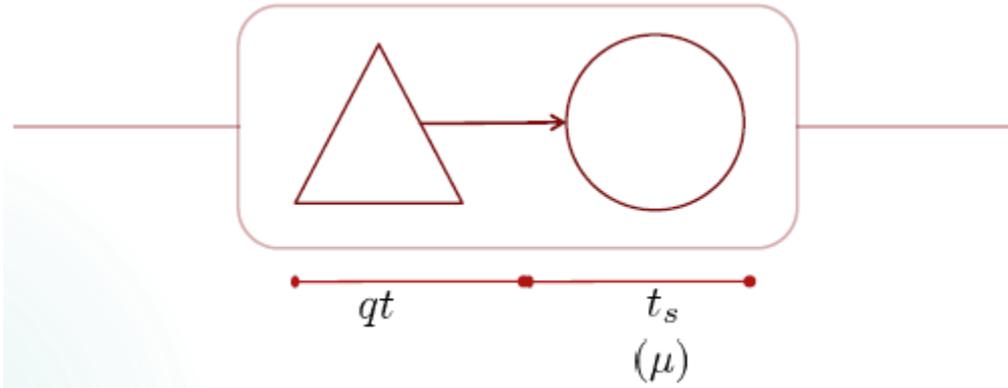


Figura 2. Modelo del Proceso variables internas [Fuente: Framiñán 2018]

- qt : Tiempo de espera. Unidades de tiempo que esperan los trabajos dentro del sistema, en promedio y a largo plazo.
- t_s : Tiempo de servicio. Unidades de tiempo que tardan los trabajos en ser procesados en la máquina, en promedio y a largo plazo.
- μ : Tasa de servicio. Medida en unidades procesadas por ud. de tiempo, encontramos que es la inversa del tiempo de servicio anteriormente definido. $\mu = \frac{1}{t_s}$

2.2.3 Relación entre las variables internas y externas

Una vez vistas las variables internas y externas del proceso, podemos presentar las relaciones entre ellas y las ecuaciones a las que dan lugar (Framiñán, 2018a).

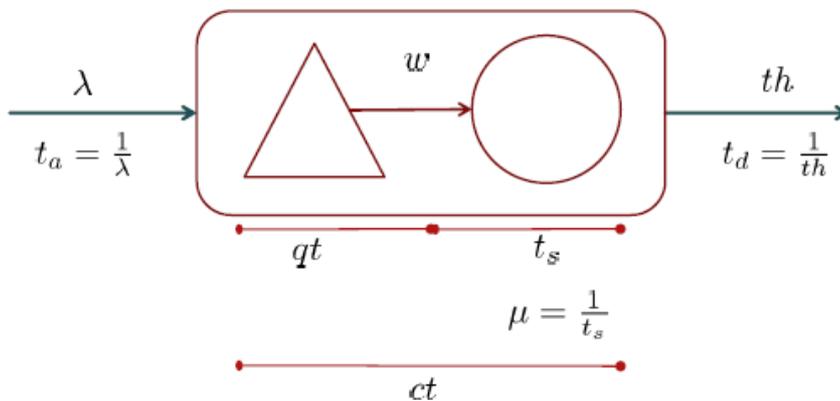


Figura 3 . Modelo del Proceso variables internas y externas [Fuente: Framiñán 2018]

1. El tiempo de ciclo del proceso (ct) es la suma de los tiempos de servicio (t_s) y de espera (qt):

$$ct = qt + t_s$$

2. Ha de cumplirse que, en promedio, por ud. de tiempo no pueden salir del sistema más unidades de las que entran ni más unidades de las que se procesan:

$$th = \min(\lambda; \mu)$$

3. El trabajo en proceso (w), el tiempo de ciclo (ct) y la tasa de entrada (λ) están relacionadas según la formula de Little:

$$w = \lambda \cdot ct$$

2.2.4 Congestión

Vamos a definir el término congestión de una estación, que como veremos está estrechamente ligado a la estabilidad ya mencionada.

La **congestión**, representada por la letra ρ , indica el grado de saturación de una estación en relación a las unidades. Queda definida por tanto como: $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_s}{t_a}$

A raíz del hecho de que $th = \min(\lambda; \mu)$ ya definido, pueden presentarse los siguientes dos casos:

- $\lambda < \mu \rightarrow \rho < 1$. En este caso se produce la conservación de las tasas medias ($th = \lambda$) y nos encontramos ante un proceso estable.
- $\lambda > \mu \rightarrow \rho > 1$. En esta situación por el contrario tenemos que las unidades entran al proceso más rápido de lo que son procesadas por lo que se producirá una acumulación ilimitada de unidades, el sistema es inestable.

La congestión juega un papel crucial en el diseño de cualquier sistema de fabricación, pues fijándola en un valor deseado nos permitirá controlar el ritmo de fabricación de nuestra planta, y con él el número de unidades procesadas (Campos, E. B., 2009).

2.2.5 Fórmula de Little

La ley de Little, definida al final del subapartado 2.2.3, establece que a largo plazo existe una relación entre el tiempo de espera de las unidades que entran en un sistema (qt), la tasa de entrada de unidades al sistema (λ) y el número de unidades en el interior del sistema (w) (Chase, R., Jacobs, R., et al. Aquilano, N., 2009).

$$w = \lambda \cdot ct$$

Aunque parece intuitivo, es un resultado bastante notable ya que la relación "no está influenciada por el proceso de distribución de la llegada, el servicio de distribución, la orden de servicio, o prácticamente cualquier otra cosa"¹.

El teorema se puede aplicar a cualquier sistema, y en particular funciona también en subsistemas, sistemas dentro de sistemas, como puede ser una estación dentro de una línea de producción. El resultado obtenido para dicho subsistema puede ser aplicado a los demás. El requisito es que el sistema sea estable y no preventivo (puesta en marcha inicial y apagado)

¹ Cuevas César. «Regla de Little», El Círculo, 2014

2.2.6 Aproximación de Kingman

En teoría de colas, la fórmula de Kingman es una aproximación del tiempo medio de espera (qt). También conocida como fórmula VUT ya que es la multiplicación de estos tres términos: utilización (U), la variabilidad (V) y el tiempo de servicio (T) (Kingman J., 1961; Köllerström, J., 1979; Framiñán, 2018b). Esta aproximación es muy precisa, sobre todo en sistemas próximos a la saturación (congestión próxima a 1).

$$qt = V \cdot U \cdot T = \frac{\theta_a + \theta_s}{2} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot t_s$$

- V de variabilidad: $V = \frac{\theta_a + \theta_s}{2}$ (variabilidad media del proceso)
- U de utilización: $U = \frac{\rho}{1 - \rho}$ (ratio probabilidad proceso ocupado/ probabilidad proceso ocioso)
- T de tiempo de proceso: $T = t_s$

2.3 Introducción al Diseño de Sistemas Productivos

Al conjunto de procesos que se llevan a cabo, junto con los elementos organizados que lo hacen posible y el flujo de información entre ellos lo conocemos como **sistema**. (Arias Coello, A., 2008).

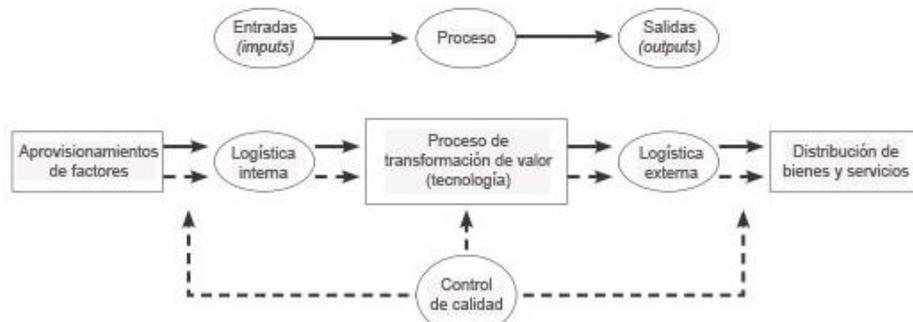


Figura 4. Esquema básico de Sistema de Producción [Fuente: Bueno 2004]

Por tanto un buen diseño será la selección ideal u óptima de los elementos (personal, maquinaria, etc) así como su disposición (layout) que logre alcanzar los objetivos de producción preestablecidos manteniendo los estándares fijados (plazos, calidad y costes).

El problema surge de la gran cantidad de factores a tener en cuenta en la fase de diseño así como de las relaciones a modelar entre ellos. Otro agravante sería la poca información de la que se dispone y su dudosa calidad; pues están basadas en previsiones de demanda, tiempos de proceso estimados, mantenimientos correctivos y averías impredecibles, objetivos empresariales y demandas del mercado variables, avances tecnológicos que podrían dejar obsoletas nuestras instalaciones y colocarnos en una situación de desventaja competitiva. Por ello contamos con un alto grado de incertidumbre en nuestros cálculos.

A todo esto debemos sumarle que cualquier modificación en el diseño supone un importante desembolso (maquinaria, personal, instalaciones,..) por lo que deben ser decisiones con una visión a medio/largo plazo.

2.3.1 Conceptos Importantes

Antes de profundizar más en algunos aspectos del diseño de procesos productivos es importante sentar las bases del conocimiento recordando algunos conceptos clave:

- **Capacidad:** Entendida cómo la cantidad de productos que un sistema es capaz de producir en un determinado periodo de tiempo teniendo en cuenta las limitaciones tecnológicas y de diseño (Heizer, J., Render, B., & Parra, J. L. M., 2015). . Es común caer en el error de que *producir más es mejor*, y en cierto modo puede ser cierto, en cuánto a que un mayor número de unidades conducen a un mayor número de ventas, y éstas a mayores beneficios. Sin embargo en los mercados actuales tan competitivos y con demandas tan ajustadas esta lógica no siempre se cumple, lo que obliga a tomar un cambio de rumbo sacrificando *capacidad* por reducción de costes, mejor empleo de recursos, *productividad*.
- **Productividad:** Si la capacidad mide lo que podemos producir, la productividad mide lo que consumimos para ello, lo eficientemente que somos capaces de producir (Fajardo, C., 1995). Para incrementar nuestra productividad y conseguir costes competitivos podemos optar por una orientación de entrada u orientada a recursos (mantener nuestra capacidad disminuyendo los recursos consumidos), o una orientación de salida u orientada a productos (aumentar nuestra capacidad con los mismos recursos).
- **Takt Time:** Es el ritmo al que las unidades deberían ser producidas para cumplir con nuestras exigencias de demanda. Es fijado por el cliente y a partir de éste debemos fijar un ritmo de producción estable.
- **Cuello de Botella:** Es la estación con la congestión más alta, constituye una limitación en la línea para el balance y la producción.
- **Inventario o existencias:** Entendido como el conjunto de productos terminados disponibles para satisfacer las fluctuaciones de la demanda.

2.3.2 Distribución en Planta

El concepto de distribución en planta o *Layout* (De la Fuente García, D., & Quesada, I. F., 2005). Distribución en planta hace referencia a la forma de organizar físicamente las máquinas, equipos y departamentos. Una distribución óptima que logre la mayor coordinación y eficiencia de una planta productiva puede suponer la mejora física más importante, ya sea para un proyecto en fase de diseño o una fábrica ya existente.

2.3.2.1 Principios de la Distribución en Planta según R. Muther

Richar Muther en 1981 definió en su obra "*Distribución en Planta*" una serie de principios que se han convertido en símbolo de optimización de espacios para la industria.

Formuló los siguientes 6 principios (Muther R., 1981):

1. **Principio de la mínima distancia recorrida:** La mejor distribución es la que integra a los hombres, materiales, maquinaria, actividades auxiliares y cualquier otro factor, de modo que resulte el compromiso mejor entre todas estas partes.
2. **Principio de la circulación o flujo de materiales:** En igualdad de condiciones, es mejor aquella distribución que ordene las áreas de trabajo de modo que cada operación o proceso esté en el mismo

orden o secuencia en que se transformen, tratan o montan los materiales.

3. **Principio del espacio cúbico:** La economía se obtiene utilizando de un modo efectivo todo el espacio disponible, tanto en horizontal como en vertical.
4. **Principio de la flexibilidad:** A igualdad de condiciones será siempre más efectiva la distribución que pueda ser ajustada o reordenada con menos costo o inconvenientes.
5. **Principio de la satisfacción y de la seguridad:** A igualdad de condiciones, será siempre más efectiva la distribución que haga el trabajo más satisfactorio y seguro para los trabajadores.

2.3.2.2 Factores que afectan a la Distribución en Planta

En la misma obra Richar Muther afirma que para un correcto diseño de distribución en planta es necesario: un conocimiento ordenado de los diversos elementos o particularidades implicadas en una distribución, y un conocimiento de los procedimientos y técnicas de como se debe proceder para integrar cada uno de estos elementos. Por lo que es importante conocer todos los factores que intervienen y las interrelaciones entre ellos. La importancia de cada factor dependerá de cada proceso y compañía en concreto (Muther R., 1981; Drezner, 1995).

- Factor Material
- Factor Maquinaria
- Factor Espera (almacenamiento)
- Factor Movimiento
- Factor mano de obra
- Los servicios auxiliares
- El edificio
- Los cambios

Tan sólo mencionaremos estos factores pues una mayor profundidad no es relevante para este estudio. Esto es debido a que la elaboración de nuestros entornos productivos serán mediante el software de simulación mencionado y en el que ninguno de estos factores intervienen.

2.3.3 Tipos de Distribución en Planta.

Anteriormente en el subapartado 2.1.2 vimos una clasificación de los distintos tipos de procesos según el producto final, ahora vamos a describir las distintas tipologías básicas de series de procesos (Drezner, 1995; Fernández y De la Fuente, 2005).

- **Distribución por Producto:** Procesos de Flujo o *Flow Shop*. La más conveniente cuando la producción está organizada de forma continua o repetitiva, siendo el caso más característico las líneas de montaje. Un aspecto clave en el diseño de este tipo de distribución es el equilibrado de la línea, con el fin de evitar los problemas derivados de los cuellos de botella.

Las máquinas se colocan una a continuación de otra a lo largo de una línea en el orden en el que van a ser utilizadas y se hace pasar el producto por cada una de ellas a medida que va sufriendo las

transformaciones necesarias.

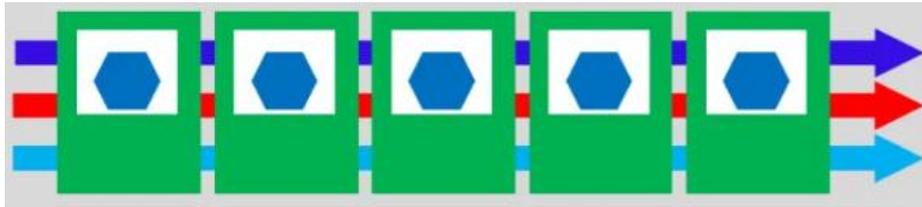


Figura 5. Esquema básico Flow Shop [Fuente: By Christoph Roser at AllAboutLean.com under the free [CC-BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.]

- **Distribución por Proceso:** Procesos de Taller o *Job Shop*. La planta está organizada en torno a los procesos o recursos, el personal y los equipos que realizan una misma función general se agrupan en la misma área. Los productos se moverán por estas áreas según la secuencia de operaciones requerida para su fabricación, con lo que se tendrá una gran variedad de productos con diversas secuencias. A esta gran variedad hay que sumarle las variaciones introducidas por la propia demanda, lo que hace que este tipo de distribuciones cuenten con una baja eficiencia en transporte y operaciones en comparación con los flow shop.

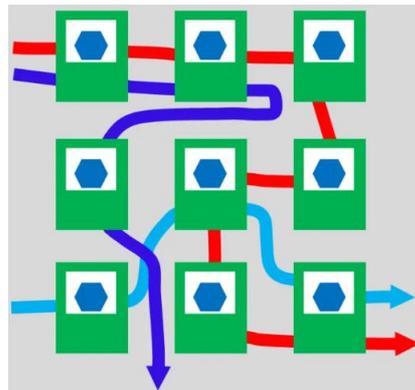


Figura 6. Esquema básico Job Shop [Fuente: By Christoph Roser at AllAboutLean.com under the free [CC-BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.]

- **Distribución por Posición Fija:** O por proyecto. El producto es único y la distribución del proceso de fabricación viene dictada por dichas características. El material permanece en una posición fija y los operarios y máquinas fluyen en torno a él.

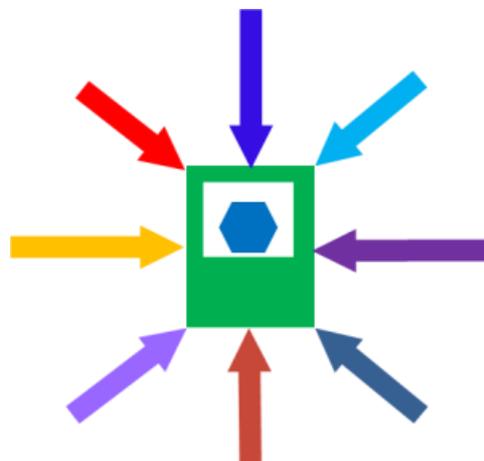


Figura 7. Esquema básico Project Shop [Fuente: By Christoph Roser at AllAboutLean.com under the free [CC-BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.]

2.3.4 Ventajas e Inconvenientes

A continuación se expondrá una comparativa entre los distintos tipos de distribución en planta previamente definidos.

VENTAJAS		
FLOW SHOP	JOP SHOP	PROJECT SHOP
Manejo de materiales reducido	Gran flexibilidad de producción (número de referencias)	Amplia versatilidad, se adapta con facilidad a cualquier variación
Escasa existencia de trabajos en curso	Flexibilidad de programación.	La mano de obra no necesariamente muy cualificada
Mínimos tiempos de fabricación	Menor inversión en equipos	Flexibilidad en el diseño
Simplificación de los sistemas de planificación y control de la producción.	Permite supervisión especializada	Flexibilidad en la secuenciación de productos
Simplificación de tareas.	Mejor utilización de las máquinas	
Grandes volúmenes de producción.		

Tabla 1. Ventajas de las tipologías básicas de procesos [Fuente: Elaboración propia]

DESVENTAJAS		
FLOW SHOP	JOP SHOP	PROJECT SHOP
Ausencia de flexibilidad en el proceso y en tiempos de fabricación	Altos tiempos de preparación	Inestabilidad en los tiempos de procesos
Inversión muy elevada	Se requiere alto nivel de WIP para mantener flujo.	Inestabilidad en las cargas de trabajo
Todos dependen de todos (un error puede parar la línea entera)	Volumen de operación variable y bajo.	Inversión elevada en equipos específicos
Trabajos muy monótonos.	Precisa trabajadores altamente cualificados	

Ciclo productivo determinado por el cuello de botella	Planificación de la producción compleja	
	Mayores tiempos de proceso	

Tabla 2. Desventajas de las tipologías básicas de procesos [Fuente: Elaboración propia]

A grandes rasgos observamos que los dos factores clave que diferencian estas tres tipologías son: el volumen de producción y la variedad de productos a procesar (Framiñán, 2018c).

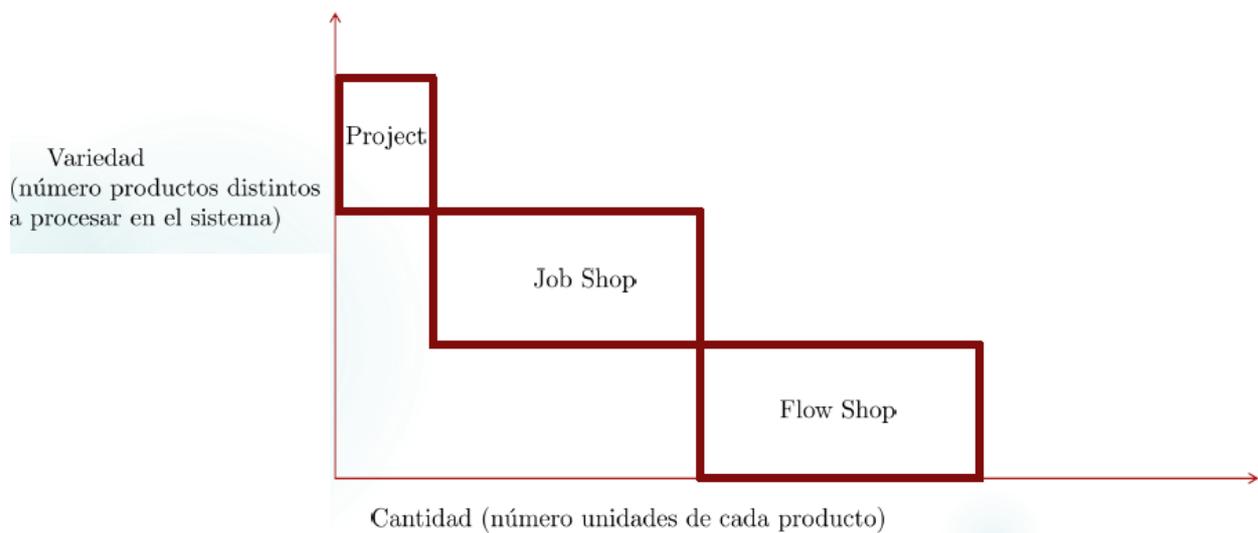


Figura 8. Casos de uso de las tipologías básicas de procesos [Fuente: Framiñán, 2018]

En este estudio nos centraremos en el análisis de entornos tipo *Flow Shop* o líneas de producción. Cómo muestra la gráfica anterior su uso es aconsejable cuando tenemos un alto volumen de productos con características muy similares (prácticamente las mismas operaciones, tiempos de proceso parecidos, etc).

2.3.5 Conclusiones

En resumen, en este bloque de descripción de la metodología hemos hecho un recorrido introductorio a través de los aspectos más relevantes del Diseño de Sistemas Productivos enfocados a la comprensión de este estudio. Desde conceptos básicos como las definiciones de **proceso** ó **sistema**, descripción de las variables y ecuaciones cuyo comportamiento vamos a estudiar y por último el entorno que vamos a modelar.

Con todo ello podemos hacernos una idea más clara y concreta de la utilidad de este proyecto. Del análisis de los errores de las ecuaciones y variables podremos obtener una información valiosa y de gran potencial si se aplica en la fase analítica o de diseño del proceso. Como hemos visto, la instalación y ajuste de una línea de producción supone una enorme inversión, y errores en las estimaciones de producción con respecto a la demanda podría ser catastrófico por lo que servirse de esta información podría marcar una gran diferencia.

3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Toda actividad industrial previa a su puesta en marcha requiere ser sometida a estudio en búsqueda de alcanzar un funcionamiento óptimo y con él, perseguir el fin último de cualquier actividad empresarial: obtener el mayor beneficio posible.

A la hora de llevar a cabo dicho estudio existen básicamente dos formas de proceder, experimentar con un sistema real o experimentar con un modelo del sistema. La experimentación con un sistema real conlleva varios problemas causados por el alto coste de las pruebas correspondientes a la logística del propio proceso. Por tanto la alternativa más usada es elaborar y experimentar con un modelo de nuestro sistema.

Los modelos con los que experimentar pueden ser de dos tipos, Modelos Físicos ó **Modelos Matemáticos** (Forte, J. F., 2005). Estos últimos son empleados para predecir o determinar las relaciones cuantitativas del sistema mediante algoritmos, fórmulas y cálculos, por lo que han de ser muy precisos. Los modelos matemáticos pueden ser analíticos, aunque debido a la complejidad del proceso pueden presentar dificultad para encontrar las ecuaciones que representan al sistema real e implicar mucho tiempo y recursos, como sucede en este estudio. Como alternativa viable tenemos la **simulación**.

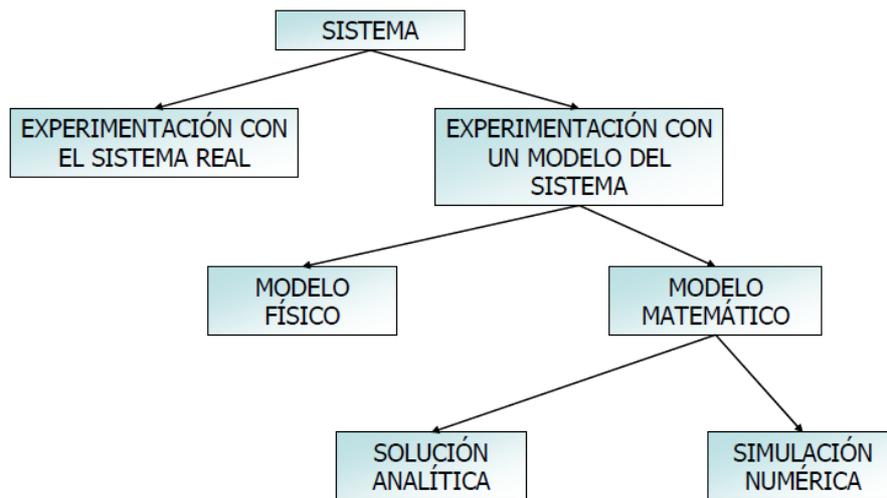


Figura 9. Tipos de experimentación sobre un sistema [Fuente: García A., Ortega M., 2006]

En este bloque se presentará a la simulación como herramienta de resolución y análisis de este estudio, más concretamente al software *Arena Software Simulation*. Mediante este software se construirán y simularán los distintos escenarios objetos de análisis. Posteriormente para la obtención de una solución analítica se hará uso de la herramienta *Shop Analyzer*, un programa prototipo diseñado para para calcular las variables de estado en régimen permanente de un proceso productivo general con varios productos desarrollado por Jose M. Framiñán, Catedrático del Departamento de Organización y Gestión de Empresas I de la Universidad de Sevilla y tutor de este Proyecto de Fin de Grado. Se calculará el error entre los resultados devueltos por ambos programas con el fin de evaluar a las ecuaciones empleadas y obtener información acerca de su comportamiento en cada situación.

Como valor añadido, una vez recopilados todos los resultados se elaborarán unos **modelos predictivos** basados en los principios del *Machine Learning* o Aprendizaje Automático empleando el lenguaje de programación Python. El objetivo de estos modelos, como ya se describirá más adelante, es ser entrenado y

aprender de nuestros resultados y así construir un árbol de decisión que permita conocer de antemano el error que nuestra configuración de línea tendrá en ciertas variables clave.

3.1 Simulación

La **simulación** es la imitación de un sistema real a través de la utilización de un modelo lógico construido en un ordenador. Un **modelo** es una descripción abstracta del sistema a imitar, que a través de relaciones lógicas y matemáticas lo representa. El objetivo de la simulación es conocer cómo se comporta el sistema, ya sea para compararlo con otro sistema o con otra configuración del mismo sistema (Eumekian, M., 2009).

Según *Kelton et al. (2007)*², en un paso previo a la simulación, la construcción del modelo puede ser en sí misma un proceso enriquecedor, ya que nos vemos obligados a entender el sistema a estudiar y a formalizar y documentar su funcionamiento. A partir de este proceso se suelen generar alternativas para su configuración y optimización.

3.1.1 La necesidad de Simular

Como se ha comentado anteriormente, la resolución del modelo matemático que representa nuestro sistema a estudiar presenta una gran complejidad en cuanto al cálculo y no resultaría rentable la inversión de tiempo y recursos. Esta complejidad puede deberse principalmente a dos causas (García A., Ortega M., 2006):

- En los sistemas continuos, en los que sus variables de estado cambian continuamente de valor es frecuente que representen la tasa o velocidad de cambio de otras variables de estado. La formulación matemática de estos modelos lleva a la aparición de ecuaciones diferenciales que indican las relaciones anteriormente mencionadas. Si el sistema tiene una cierta complejidad, puede ocurrir que las ecuaciones diferenciales sean no lineales y, por tanto, de difícil o imposible resolución analítica.
- En los sistemas discretos, en los que la variación del valor de sus variables de estado se produce instantáneamente en ciertos momentos puntuales, pueden aparecer fenómenos aleatorios que sólo se pueden representar en términos probabilistas. En este caso, la formulación matemática del modelo implica relaciones donde aparecen funciones de distribución o de densidad de probabilidad, que dificultan o impiden su resolución analítica

Que un sistema sea continuo o discreto depende del objetivo del estudio y de las variables de estado predominantes, un mismo sistema puede tener simultáneamente variables continuas y otras discretas. Por lo tanto, es frecuente que se de alguna de las dos causas anteriores incluso es normal encontrar modelos en los que coexisten ecuaciones diferenciales complejas con variables aleatorias, lo que, evidentemente, complica aún más la resolución analítica (Luengo, 2010).

Por todo ello la simulación se ha convertido en una de las herramientas más empleadas actualmente en ingeniería para el análisis de áreas productivas. Es utilizada normalmente para representar un proceso real mediante otro mucho más simple y entendible.

² Kelton, D., Sadowsky, R., Sturrock, D.: «Simulation with Arena», 4ta. edición, Mc Graw Hill (2007)

3.1.2 Ventajas e Inconvenientes

Describir sistemas complejos reales con elementos estocásticos (comportamiento aleatorio) con suficiente precisión mediante un modelo la simulación presenta otras **ventajas** (Forte, J. F., 2005; García A., Ortega M., 2006; Kelton, W., D., Sadowski, R., P., Sturrock, D. T., 2008; Luengo, 2010):

- Permite estimar el comportamiento de un sistema existente bajo un conjunto previsto de condiciones operativas.
- Se pueden comparar diseños alternativos (o políticas de operación alternativas para un determinado diseño) para especificar cuál es el que cumple de forma más adecuada con los objetivos formulados.
- Mayor control de las condiciones del experimento que si se realizase sobre el propio sistema.
- Permite estudiar un sistema cuya evolución se prolonga en el tiempo en periodos de tiempo reducidos.
- Permite incluir elementos de incertidumbre

La simulación también puede conllevar algunos **inconvenientes** (Azarang Esfandiari, M. R., 1996; Piera, M. À., 2004; García A., Ortega M., 2006) como pueden ser:

- Cada ejecución de un modelo estocástico de simulación da como resultado únicamente una estimación de las características o comportamiento del modelo para un conjunto particular de parámetros de entrada. Por lo tanto, no bastará con la ejecución del modelo una sola vez, sino que habrá que realizar una serie de repeticiones para obtener una *muestra representativa* del funcionamiento del sistema.
- Los modelos de simulación, por regla general, consumen una cantidad elevada de recursos técnicos y humanos durante un tiempo prolongado.
- La gran cantidad de información que proporcionan los modelos de simulación en ocasiones induce a que se confíe en exceso en los resultados que proporcionan. Si un modelo de simulación no proporciona una representación “válida” del sistema real, la información que suministra puede no ser válida o, incluso, puede conducir a decisiones erróneas.

3.1.3 Fases de un Estudio de Simulación

En la ejecución de un proyecto de modelado, simulación y optimización de procesos habitualmente se siguen Nueve Fases como parte de una metodología que facilite el éxito del trabajo (Forte, J. F., 2005; García A., Ortega M., 2006; Torres, P., 2013):

1. **Definición del problema:** En este paso debe quedar perfectamente establecido el objeto de la simulación. Primero, definir un problema y formular un objetivo acorde con dicho problema y, luego, crear un modelo 100 % diseñado para solucionarlo. Se debe tener cuidado para no hacer una suposición errónea en el momento de definir el problema.
2. **Formulación de un objetivo y definición de las medidas de acción del sistema:** En primer lugar, se deben especificar claramente los objetivos que se pretenden alcanzar con el estudio de simulación. Se deben traducir los objetivos cualitativos a términos cuantitativos, establecer las preguntas que deben ser contestadas, las hipótesis a contrastar, y los efectos a estimar. La descripción del sistema se irá definiendo en base al objetivo perseguido con el proyecto. El objetivo debe ser claro,

inequívoco y factible ya que determinará qué suposiciones pueden ser hechas, qué tipo de información y qué cantidad de datos deben ser recopilados

3. **Descripción del sistema y establecimiento de todas las suposiciones posibles :** Hay que definir claramente los elementos que componen el modelo: los recursos, los productos de flujo (los tipos de productos, los clientes o la información), las rutas de procesos, las transformaciones del producto, el control del flujo, las veces de proceso, etc. Además, será necesario especificar algunas de las suposiciones que son realizadas en la representación del sistema.
4. **Enumeración de las posibles soluciones alternativas:** Es importante determinar al principio del estudio de simulación las posibles soluciones alternativas que se presenten para que el modelo comience a funcionar. Esto tendrá una influencia en cómo se diseña el modelo. Al tomar alternativas al principio de la simulación, el modelo puede ser diseñado de tal modo que fácilmente puede ser transformado en otro sistema alternativo.
5. **Recopilación de datos e información necesaria:** Además de recoger los datos e información necesaria para introducir los parámetros de entrada al modelo, es preciso validarlo y poder comparar datos reales con los resultados de aplicar el modelo. El problema es que estas fuentes existentes de datos no están siempre disponibles y que la recopilación de datos por medidas puede tener un coste excesivo además del tiempo consumido. Por lo tanto se emplean estimaciones hasta que un análisis más sensible pueda ser realizado sobre el modelo para señalar aquellos parámetros que requieren unos datos más fiables.
6. **Diseño del modelo en el ordenador:** El modelo de simulación se diseña teniendo principalmente los objetivos de partida en mente. Se construye por fases, que ajustándolas nos permitirá hacer varios modelos del mismo sistema, así, por lo tanto, se podrán contemplar diferentes escenarios. En la construcción es aconsejable encontrar un equilibrio entre la sencillez del propio modelo y el realismo con que representa al sistema real, debe tener únicamente el grado necesario de detalle que refleje la esencia del funcionamiento del sistema bajo el punto de vista del propósito para el que se utiliza dicho modelo.
7. **Verificación y validación del modelo:** En la **verificación** se comprueba que no se hayan cometido errores durante la implementación del modelo. Para ello, se utilizan las herramientas de *debugging* (depuración) provistas por el entorno de programación.
Para la **validación** se comprueba la exactitud del modelo desarrollado. Esto se lleva a cabo comparando las predicciones del modelo con: mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares. Como resultado de esta etapa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o recolectar datos adicionales.
8. **Experimentación de alternativas: simulación propiamente dicha de posibilidades y búsqueda de la solución óptima:** Para cada uno de ellos es necesario determinar las condiciones iniciales, la longitud de la simulación, el número de repeticiones y los resultados que se deben registrar. Para analizar los resultados de los distintos experimentos se utilizan técnicas estadísticas. Los análisis típicos pueden ser el establecimiento de límites de confianza para los valores obtenidos de ciertas variables de estado o la comparación y determinación del mejor de los resultados obtenidos en la simulación de varias alternativas.

9. **Análisis de las diferentes soluciones:** Toda la información recogida procedente de los informes, las gráficas y los argumentos de los intervalos de confianza, formarán parte del análisis de datos de salida del modelo. Las técnicas estadísticas se usan para analizar los datos de salida de cada una de las simulaciones alternativas del escenario. Al analizar resultados y conclusiones del modelo, se interpretan los resultados relacionándolos con los objetivos iniciales.



Figura 10. Pasos de un estudio de simulación. [Fuente: Law, 2007]

Un estudio de simulación no es una secuencia simple de pasos. En algunos proyectos se pueden dar casos en los que sea necesario retroceder en el proyecto para obtener una mejor comprensión del sistema. Los pasos de verificación y validación pueden ser aplicados tras cada fase del proyecto.

3.2 Arena Simulation

Arena es una aplicación (creada por Rockwell Software) del sistema operativo Windows de Microsoft (totalmente compatible con otros software de Windows) que permite la realización de modelos de simulación con un elevado nivel de detalle, tanto conceptualmente como con el uso de animaciones. Arena consigue combinar la facilidad de los simuladores de alto nivel con la flexibilidad de los lenguajes de programación (como lenguaje C o Microsoft), consiguiendo la correcta adecuación del nivel de programación necesario dentro del mismo modelo (Allende, 2000).

Proporciona *plantillas* alternativas e intercambiables de modelación de simulación gráfica y *módulos* de análisis que se pueden combinar para desarrollar una amplia variedad de modelos de simulación en forma de diagramas de flujo, de manera que se tiene una representación gráfica del proceso.

Arena funciona construido sobre el lenguaje de programación para simulaciones SIMAN. Esto proporciona una combinación de facilidad de uso por su interfaz y la versatilidad de un lenguaje de programación, pero esta combinación se explota de manera más interesante para el usuario gracias a su estructura jerárquica. Esta estructura permite armar construcciones de nivel bajo y combinarlas para formar una de complejidad y funcionalidad mayor. Esto permite al usuario básico usar construcciones de alto nivel sin la necesidad de conocer como funciona internamente y al usuario experimentado generar nuevos comportamientos y funcionalidades. De la misma manera el sistema trae incluidas construcciones de casi todos los niveles para dar una muy alta flexibilidad a los modelos sin la necesidad de codificar para generarlos (Gómez C., 2012).

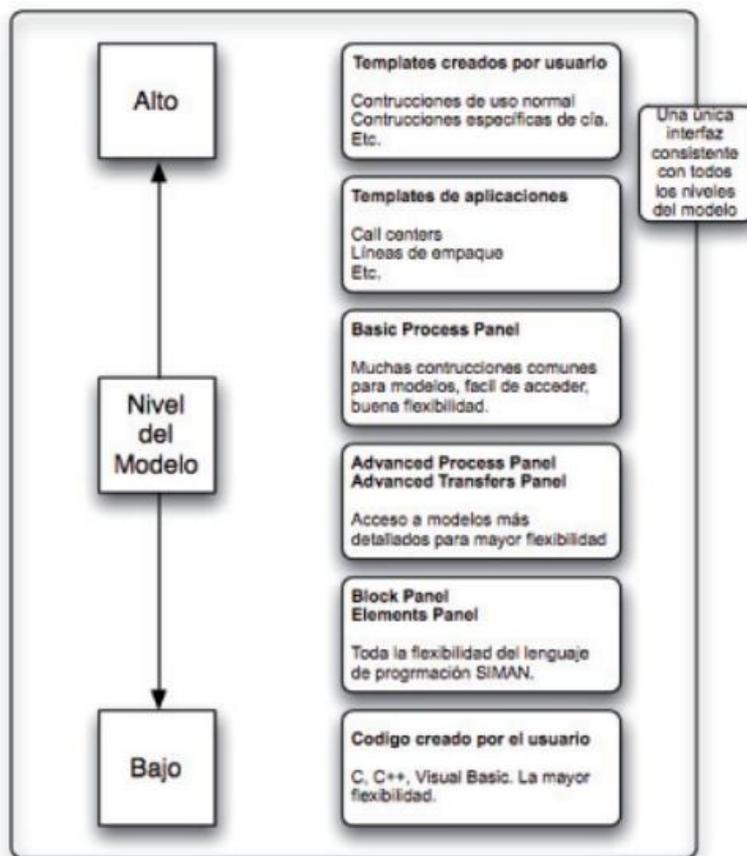


Figura 11. Estructura jerárquica de Arena. [Fuente: Kelton, 2007]

3.2.1 Ventana Principal

Vamos a ver la configuración del entorno de modelado de Arena, que consta de tres zonas diferenciadas:

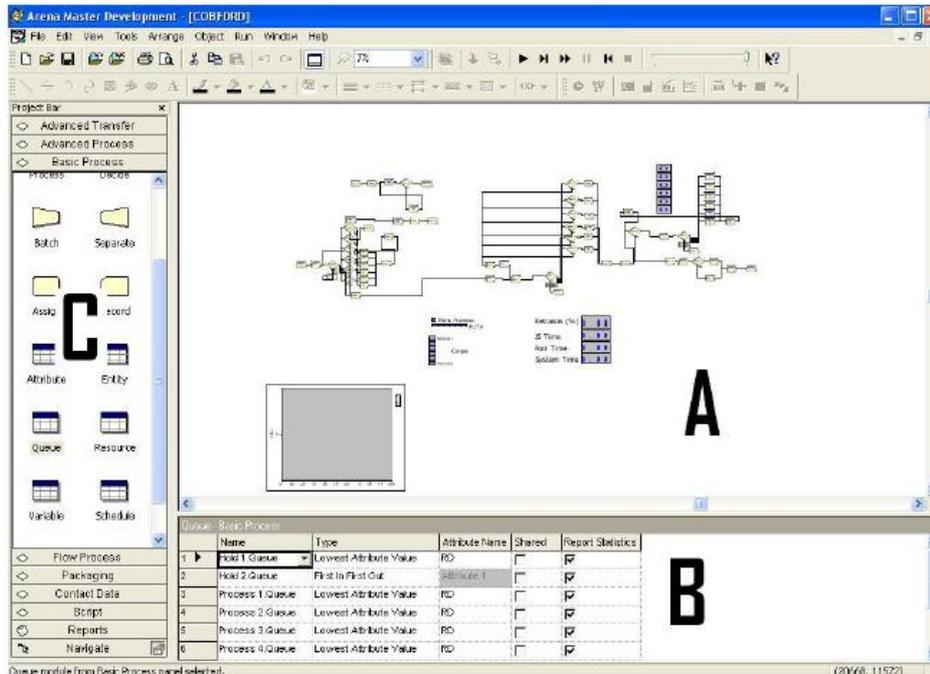


Figura 12. Vista de la ventana principal de Arena. [Fuente: Martin Land, 2004]

- A. **Ventana del diagrama de flujo del modelo** (Model window flowchart view): En este espacio se construye el diagrama de bloques que conforman el modelo de simulación del proceso. En esta ventana pueden observarse también los elementos gráficos y animaciones de las simulaciones.
- B. **Ventana de hoja de cálculo** (Model window spreadsheet view): En esta ventana se pueden comprobar y modificar los parámetros correspondientes a los bloques (procesos) y a las entidades.
- C. **Barra de Proyectos** (Project Bar): Este espacio tiene varios paneles desplegable que permiten diseñar el modelo. Dichos paneles contienen los módulos necesarios para construir el modelo, así como otros elementos como los informes estadísticos de las simulaciones o un panel de navegación que facilita la localización del modelo de la ventana A.

3.2.2 Elementos Principales

Hagamos un breve resumen de los principales componentes de una simulación en el programa empleado (Kelton et al. 2008):

- **Entidades:** Son objetos dinámicos que, por lo general, son creados, se mueven alrededor del sistema durante un tiempo y finalmente son desechados, aunque en ocasiones se mantienen circulando por el sistema. La mayoría de las entidades representan cosas “reales” en una simulación, en nuestro estudio serán elementos genéricos a procesar.
- **Atributos:** Para individualizar las entidades, se requiere la asignación de atributos. Estos son

características comunes de todas las entidades, pero que poseen valores específicos que permiten diferenciarlas entre ellas. Por ejemplo, como en el caso de nuestro proyecto, si se tienen dos productos (entidades) y el atributo *tipo* asignado, se podrán diferenciar los productos al establecer que uno es de tipo 1 y otro de tipo 2, 3,4 ó 5. Lo más importante con respecto a los atributos es que estos se encuentran unidos a entidades específicas.

- **Variables:** Información que refleja alguna característica del sistema (no se ve afectada por la cantidad o tipo de entidades). Existen dos tipos de variables: las incorporadas en Arena (numero en la cola, numero de servidores ocupadas, tiempo en el reloj de la simulación actual, entre otros) y las definidas por el usuario (Tiempo de servicio, tiempo de transporte, turno actual, entre otros). Las variables pueden ser usadas para muchos propósitos y también pueden ser vectores o matrices.
- **Recursos:** Con frecuencia las entidades compiten entre ellas por el servicio de los recursos que representan cosas, como personal, equipo o espacio en el área de almacenaje de tamaño limitado. Una entidad se aprovecha de una cantidad de unidades de un recurso cuando esta disponible y lo liberará una vez que finalice. Por ejemplo, la entidad producto con el atributo tipo consume el recurso máquina en cualquiera de las estaciones cuando está siendo procesada.
- **Colas:** Cuando una entidad no puede seguir adelante (quizá porque requiere de un recurso inmovilizado por otra entidad), se requiere de un lugar para esperar, esto se define como cola o *buffer*. En Arena, las colas tienen nombres y pueden tener también capacidades de representación.
- **Acumuladores estadísticos:** Son las variables que permiten obtener las mediciones de desempeño de resultados. Se puede obtener una vez finalizada la simulación o conforme progresa la misma.
- **Eventos:** Se define como algo que sucede en un instante de tiempo que tiene el poder de cambiar atributos, variables o acumuladores estadísticos. En Arena, el registro y almacenamiento de eventos se realiza en el *calendario de eventos*, el cual permite establecer instantes en el que ocurrirán cambios en el modelo, como pueden ser llegadas salidas o fin.
- **Reloj de simulación:** Se refiere a la variable que almacena el valor actual del tiempo en la simulación. Este permite detectar cuándo se aproxima la ocurrencia de algún evento o la finalización de la simulación.

Otro factor muy importante en un modelo de simulación es el horizonte temporal, definir las condiciones de inicio y final de la misma. Se puede procesar una cantidad fija de entidades, funcionar hasta que se de una determinada condición de salida ó recorrer un tiempo establecido (simulado), esta última opción sería la empleada en este estudio.

3.2.3 Módulos

En este subapartado vamos a describir los principales módulos de flujo y de datos del programa empleados en este estudio siguiendo la guía de usuario (Bradley, 2007):

- **Create:** Este módulo representa la llegada de entidades al modelo de simulación. Las entidades se crean usando una planificación o basándose en el tiempo entre llegadas. En este módulo se especifica también el tipo de entidad de que se trata. Podemos configurar los siguientes parámetros:
 - Name: identificador único del módulo
 - Entity Type: nombre del tipo de entidad a ser generada.
 - Type: tipo de flujo de llegada a generar. Los tipos incluidos son: Random (usa una distribución exponencial y hay que indicar la media), Schedule (usa una distribución exponencial pero la media se determina a partir del módulo Schedule especificado), Constant (se especifica un valor constante), o Expresión (se puede elegir entre distintas distribuciones).
 - Value: determina la media de la distribución exponencial (si se usa Random) o el valor constante (si se usa Constant) para el tiempo entre llegadas.
 - Schedule Name: identifica el nombre de la planificación a usar. La planificación define el formato de llegada para las entidades que llegan al sistema. Sólo se aplica cuando se usa en Type, Schedule.
 - Expression: cualquier distribución o valor que especifique el tiempo entre llegadas. Se aplica sólo cuando en Type se usa Expression.
 - Units: unidades de tiempo que se usan para los tiempos entre llegadas y de la primera creación.
 - Entities per Arrival: número de entidades que se introducirán en el sistema en un momento dado con cada llegada.
 - Max Arrivals: número máximo de entidades que generará este módulo.
 - First Creation: momento de inicio en el que llega la primera entidad al sistema.

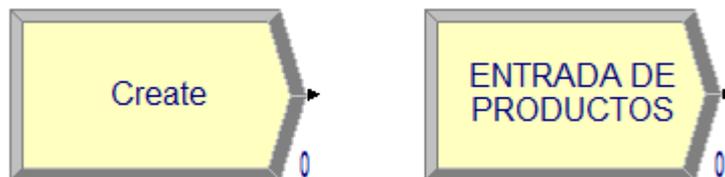


Figura 13. Módulos Create genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.)
[Fuente: Elaboración Propia]

- **Dispose:** Este módulo representa el punto final de entidades en un modelo de simulación. Las estadísticas de la entidad se registrarán antes de que la entidad se elimine del modelo. En este caso tan sólo podemos configurar dos parámetros:
 - Name: identificador único del módulo.
 - Record EntityStatistics: determina si las estadísticas de las entidades entrantes se registrarán o no. Estas estadísticas incluyen value-added time, nonvalue-added time, wait time, transfer time, other time, total time, valueadded cost, non-value-added cost, wait cost, transfer cost, other cost, y total cost.

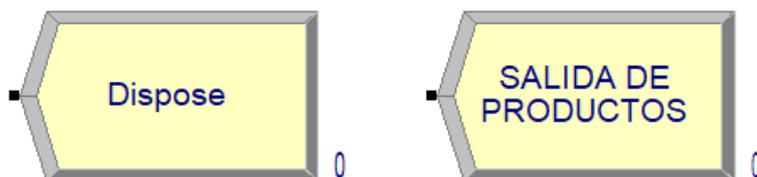


Figura 14. Módulos Dispose genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.)
[Fuente: Elaboración Propia]

- **Process:** Este módulo corresponde a la principal forma de procesamiento en simulación. Se dispone de opciones para ocupar y liberar un recurso. Adicionalmente, existe la opción de especificar un “submodelo” y especificar jerárquicamente la lógica definida por el usuario. El tiempo de proceso se le añade a la entidad y se puede considerar como valor añadido, valor no-añadido, transferencia, espera u otros. Una vez se introduce en el modelo, aparece un número en la parte inferior del símbolo que indica el número de entidades que actualmente están procesándose. En nuestro estudio es empleado como estaciones de trabajo, incluyendo la máquina y el operario. Los parámetros que nos interesan son:
 - Name : identificador único del módulo
 - Type: método que especifica la lógica dentro del módulo. Standard, toda la lógica se guardará dentro de un módulo Process y se definirá por una acción (Action) particular y, Submodel indica que la lógica se definirá jerárquicamente en un “submodelo”.
 - Action: tipo de proceso que tendrá lugar dentro del módulo. Existen cuatro tipos: Delay (proceso de retardo sin que existan restricciones de recursos), Seize Delay (un recurso será asignado en este módulo, habrá un retardo y la liberación del recurso ocurrirá más tarde), Seize Delay Release (un recurso seguido por un retardo y luego, se liberará el recurso reservado) y Delay Release (un recurso ha sido reservado previamente y que la entidad se retardará simplemente, y luego se liberará el recurso especificado).
 - Resources: lista del recurso o conjunto de recursos utilizados para procesar la entidad. No se aplica cuando Action tiene el valor de Delay o cuando Type es submodel.
 - Delay Type: tipo de distribución o método de especificar los parámetros del retardo. Constant y Expression requieren valores simples, mientras que Normal, Uniform, y Triangular requieren varios parámetros.
 - Units: unidades de tiempo para los parámetros de retardo.
 - Minimum: valor mínimo en el caso de una distribución uniforme o triangular.
 - Value: valor medio para una distribución normal, el valor constante para un retardo de tiempo constante, o la moda para una distribución triangular.
 - Maximum: valor máximo para una distribución uniforme o triangular.
 - Std Dev: desviación estándar para una distribución normal.
 - Expression: expresión cuyo valor se evalúa y se usa para el procesado del retardo de tiempo.

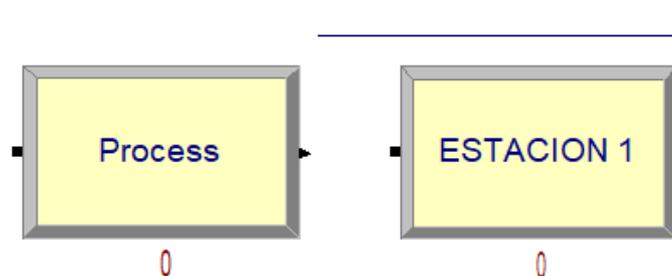


Figura 15. Módulos Process genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.)
[Fuente: Elaboración Propia]

- **Assign:** Este modulo se usa para asignar valores nuevos a las variables, a los atributos de las entidades, tipos de entidades, figuras de las entidades, u otras variables del sistema. Se pueden hacer múltiples asignaciones con un único módulo Assign. En nuestros modelos la función de este módulo es asignar aleatoriamente a las entidades que van llegando el tipo de productos que son. Parámetros de interés:

- Name: identificador único del módulo.
- Assignments: especifica la o las asignaciones que se llevarán a cabo cuando la entidad ejecute el módulo.
- Type: tipo de asignación que se va a realizar. Other, puede incluir variables del sistema, tales como capacidad de los recursos o tiempo de finalización de la simulación.
- Variable Name: nombre de la variable a la que se asignará un nuevo valor.
- Attribute Name: nombre del atributo de la entidad al que se le asignará un nuevo valor.
- Entity Type: nuevo tipo de entidad que se le asignará a la entidad cuando entre en el módulo.
- Entity Picture: nueva imagen de la entidad que se le asignará.
- Other: Identifica la variable del sistema especial a la que se le asignará un nuevo valor.
- New value: Valor asignado al atributo, variable, u otras variables del sistema.

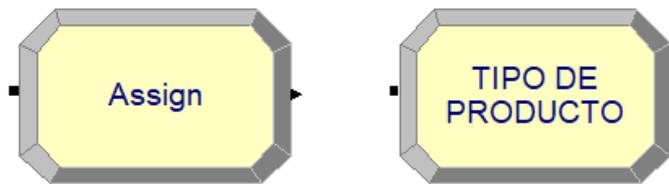


Figura 16. Módulos Assign genérico (izq.) y empleado en nuestra simulación (dcha.)
[Fuente: Elaboración Propia]

Estos módulos empleados son todos de flujo de la sección *Basic Process*, así mismo también han sido empleados módulos de datos como son el Entity, Queue, Resource y Variable. Vamos a omitir su descripción detallada por ser, en mayor o menor medida, deducible a partir de su nombre y para evitar una gran densidad en el texto.

3.3 Conclusiones

En este capítulo se ha descrito la manera en la que se va a abordar el objeto de este estudio. Se han definido una serie de herramientas que serán empleadas, profundizando en aquella se jugará un papel principal, el software de simulación Arena Simulation, por permitir la elaboración y simulación de los eventos discretos deseados. El resto de herramientas empleadas como ShopAnalyzer y los modelos de elaboración propia con Python serán explicadas en profundidad viendo el uso particular que hemos hecho de ellas, es decir, no tendría mucho sentido hacer una descripción del lenguaje de programación Python entero, con sus librerías, reglas de programación, etc, sí tan solo nos interesan los commands y librerías que hemos aplicado en este proyecto.

Una vez entendida al detalle la metodología aplicada, en el siguiente capítulo veremos en profundidad los modelos construidos y su funcionamiento, así como sus variables, restricciones, consideraciones y demás.

4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se tratará de explicar los modelos de simulación en profundidad, su funcionamiento, variables y consideraciones iniciales, así como sus limitaciones con el objetivo de comprender los resultados obtenidos. Se definirá también en profundidad el uso de las herramientas complementarias ShopAnalyzer y los modelos de aprendizaje automático en Python.

4.1 Variables de Interés

A continuación se definirán las principales variables que hemos considerado a la hora de diseñar los modelos de las líneas de producción.

- **Número de estaciones:** La cantidad de puestos de trabajo o unidades de fabricación dispuestas en serie en el sistema. Cada estación representa una operación diferente en la línea de producción por la que todas las entidades han de pasar para su transformación y que les aporta un valor añadido.
- **Número de productos:** Número de referencias distintas que se van a procesar.
- **Tasa de entrada:** Número de trabajos que entran en el sistema por unidad de tiempo. La tasa de entrada debe ser adecuada para que se produzca un inventario en proceso constante y unos niveles altos de utilización de las estaciones, sin llegar a saturar. Una tasa de entrada demasiado elevada llevaría a la saturación del sistema.
- **Discrepancia entre Máquinas:** Es frecuente que en una línea de producción no todas las máquinas funcionen al mismo ritmo en regimen permanente, salvo en plantas totalmente automatizadas. Esto es debido a averías, paradas, tiempos de preparación distintos, antigüedad de las máquinas, etc.

Cada uno de estos factores descritos introducen en nuestro sistema una **variabilidad**, lo que dificulta prever su comportamiento y hace más necesario este tipo de simulaciones.

4.2 Escenarios de Simulación

Para este proyecto se han considerado una serie de modelos resultantes de la combinación de las variables definidas en el subapartado anterior con el objetivo de hacer el estudio lo más amplio y próximo a la realidad posible. Las **consideraciones** son las siguientes:

- Se procesarán un total de **5 tipos de productos** distintos (tipo 1,2,3,4 y 5) de tres maneras diferentes lo que dará lugar a tres grandes grupos de modelos: Los que procesan un solo producto (sera de tipo 1), los que procesan tres tipos de productos (serán de los tipos 1 ,2 y 3) y por último los que procesan todos los productos al mismo tiempo. No se ha considerado un número de productos distintos mayor de 5 por la gran variabilidad que introduce y por no ser algo que se suele dar en una planta real.
- El **número de estaciones** dispuestas en serie variará desde 1 hasta 10, agrupándose los modelos en cuatro grandes grupos: modelos con 1 estación, modelos con 3 estaciones, con 7 y por último modelos con 10.

- También se jugará con la carga de la línea a través de la **congestión en el cuello de botella**. Para ello, como explicaremos posteriormente se relacionará la tasa de entrada y la congestión del cuello de botella para hacer 4 grupos de modelos: aquellos cuya tasa de entrada hace que la congestión en la estación cuello de botella sea del 50%, 65%, 80% y 95%.
- Se jugará con la **discrepancia** que existen entre las máquinas de distintas estaciones mediante su coeficiente de variación. Para ello se le dará a las estaciones un coef. de 0,25; 0,75 ó 1,25; y se crearán 3 grupos de modelos. Aquellos modelos denominados con discrepancia ‘alta’ tendrán estaciones con los tres tipos de coeficientes de variación distintos, en el segundo grupo, con discrepancia ‘media’, las estaciones alternarán entre coeficientes de 0,25 y 0,75; y por último el grupo con discrepancia ‘baja’ tan solo tendrá estaciones con el coef. igual a 0,25.

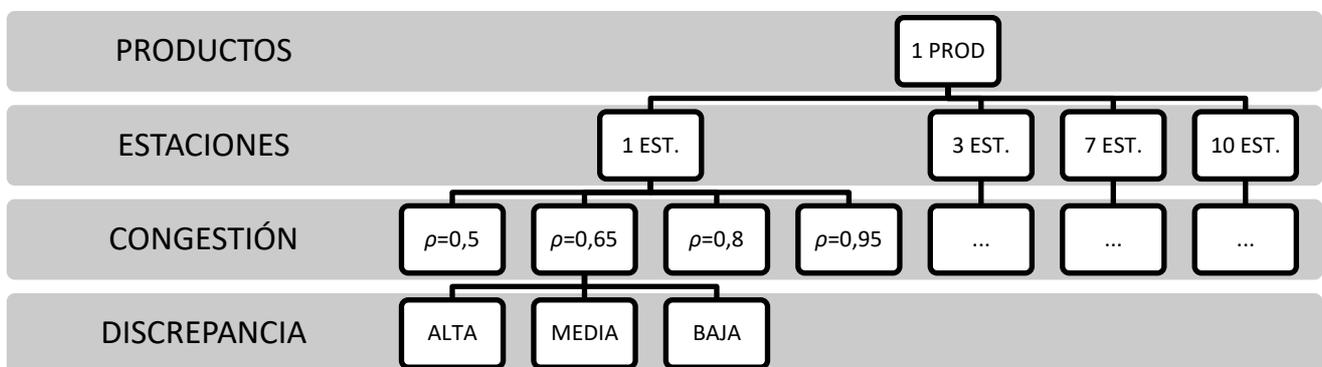


Figura 17. Esquema de elaboración de modelos. 1 Producto [Fuente: Elaboración Propia]

En la figura anterior se ha representado de forma gráfica el proceso seguido a la hora de elaborar los modelos para. En primer lugar, en el primer nivel del árbol jerárquico se encuentra el número de referencias distintas a procesar, es lógico pensar que para tres y cinco tipos de prod. el procedimiento es el mismo dando lugar al mismo árbol y a la misma cantidad de modelos. El número total de modelos a simular es de **144**.

4.3 Tiempos de Proceso

Para los tiempos de proceso se ha generado una matriz aleatoria siguiendo una distribución unifrome de 1 a 5 unidades de tiempo, **UNIF[1,5]**, lo que significa que asignará aleatoriamente a cada producto en cada estación un valor entero con la misma probabilidad comprendido entre 1 y 5.

Posteriormente en el programa de simulación se le asignará a cada máquina (ó estación, pues tan solo contamos con una máquina por estación) una distribución Normal-Logarítmica de la forma **LOGN (Media, coef. variación)**, dónde la media es el valor de la tabla anteriormente generada UNIF[1,5] y el coeficiente de variación depende de si es un modelo del tipo discrepancia ALTA, MEDIA ó BAJA como ya hemos visto.

Esta asignación será detallada más adelante cuando veamos en profundidad el funcionamiento de los modelos. A continuación se muestra la tabla generada de tiempos de proceso u operación.

Tipo de Producto	Tiempos de Proceso UNIF[1,5]									
	Estación 1	Est.2	Est.3	Est.4	Est.5	Est.6	Est.7	Est.8	Est.9	Est.10
1	1	2	3	2	5	1	3	4	5	3
2	4	4	3	3	4	2	2	1	2	4
3	5	2	2	1	1	2	1	5	5	4
4	3	2	5	5	3	2	1	4	4	2
5	4	3	1	3	5	5	3	5	1	4

Tabla 3. Tiempos de Proceso [Fuente: Elaboración Propia]

4.3.1 Cálculo del Cuello de Botella

Como ya se definió brevemente en el subapartado 2.3.1 de conceptos importantes, el cuello de botella (*bottleneck*) es la estación de nuestro proceso productivo que ralentiza el sistema por tener la mayor congestión.

Una vez que hemos definido el concepto de tiempo de proceso y explicado cómo han sido generados podemos proceder al cálculo de los cuellos de botella.

Nº de productos	Suamtorio de Tiempos de Proceso									
	Estación 1	Est.2	Est.3	Est.4	Est.5	Est.6	Est.7	Est.8	Est.9	Est.10
1	1	2	3	2	5	1	3	4	5	3
3	10	8	8	6	10	5	6	10	12	11
5	17	13	14	14	18	12	10	19	17	17

Tabla 4. Sumatorio de Tiempos de Proceso [Fuente: Elaboración Propia]

El procedimiento que se ha seguido para el cálculo del cuello de botella es, en primer lugar agrupar por grupos de 1, 3 ó 5 productos haciendo el sumatorio por estación (por columna), resultando tres filas como puede verse en tabla 4. Después se ha recorrido cada fila de izquierda a derecha marcando en un tono de rojo progresivamente más intenso aquellos números mayores que el anterior cuello de botella ‘provisional’, de tal manera que para cada configuración de modelos tenemos indicada la estación que haría de cuello de botella.

Nº de productos	Tiempos de Proceso Medios									
	Estación 1	Est.2	Est.3	Est.4	Est.5	Est.6	Est.7	Est.8	Est.9	Est.10
1	1	2	3	2	5	1	3	4	5	3
3	3,33	2,67	2,67	2	3,33	1,67	2,00	3,33	4	3,67
5	3,4	2,6	2,8	2,8	3,6	2,4	2	3,8	3,4	3,4

Tabla 5. Tiempos de Proceso Medios [Fuente: Elaboración Propia]

Veámoslo con un **ejemplo**. Si nos encontramos ante un modelo que cuenta con 7 estaciones y procesa los 5 tipos de productos distintos, la estación cuello de botella sería la operación número 5. Entraríamos por la columna *Est. 7* y el primer número marcado de la tercera fila sería 3,6 correspondiente a la columna *Est. 5*.

4.3.2 Cálculo de Tasas de entrada

Haremos que las tasas de entrada de nuestros modelos estén relacionadas con la congestión de la estación que, según el razonamiento anterior, es su cuello de botella. Para ello aplicaremos las fórmulas que se muestran a continuación, ya definidas con anterioridad en el subapartado 2.2 (Variables del Proceso) y que relacionan la congestión con las tasas de entrada y de servicio.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{t_s}{t_a} \qquad \mu = \frac{1}{t_s}$$

Sabemos además que la tasa de servicio es la inversa de nuestro tiempo de servicio. Tomando como t_s los promedios de la tabla 5, el cálculo de la λ necesaria en cada caso no supone más que despejarla de la de la ecuación anterior.

El resultado de dichos cálculos se ha recogido en las siguientes tablas.

		Tasa de entrada [ud./s] para $\rho= 0,5$			
prod.	est.	1	3	7	10
1		0,500	0,167	0,100	0,100
3		0,150	0,150	0,150	0,125
5		0,147	0,147	0,139	0,132

Tabla 6. Tasas de Entrada para una ρ del 50% [Fuente: Elaboración Propia]

		Tasa de entrada [ud./s] para $\rho= 0,65$			
prod.	est.	1	3	7	10
1		0,650	0,217	0,130	0,130
3		0,195	0,195	0,195	0,163
5		0,191	0,191	0,181	0,171

Tabla 7. Tasas de Entrada para una ρ del 65% [Fuente: Elaboración Propia]

		Tasa de entrada [ud./s] para $\rho= 0,8$			
prod.	est.	1	3	7	10
1		0,800	0,267	0,160	0,160
3		0,240	0,240	0,240	0,200
5		0,235	0,235	0,222	0,211

Tabla 8. Tasas de Entrada para una ρ del 80% [Fuente: Elaboración Propia]

		Tasa de entrada [ud./s] para $\rho= 0,95$			
prod.	est.	1	3	7	10
1		0,950	0,317	0,190	0,190
3		0,285	0,285	0,285	0,238
5		0,279	0,279	0,264	0,250

Tabla 9. Tasas de Entrada para una ρ del 95% [Fuente: Elaboración Propia]

4.4 Funcionamiento de los Modelos

Una vez que se han definido todas las variables que intervienen y los cálculos pertinentes pasamos a analizar los modelos elaborados.

En este apartado se va a hacer una descripción muy visual y detallada del funcionamiento de los modelos implementados. Se va a presentar un modelo general, a partir del cual veremos cada módulo en profundidad. Cabe señalar que los modelos de este estudio son relativamente sencillos, pues el objetivo que se busca es el análisis de los errores de las ecuaciones que rigen de forma genérica las líneas de producción, no es un estudio de simulación de escenarios concretos o comparativa de distintas configuraciones.

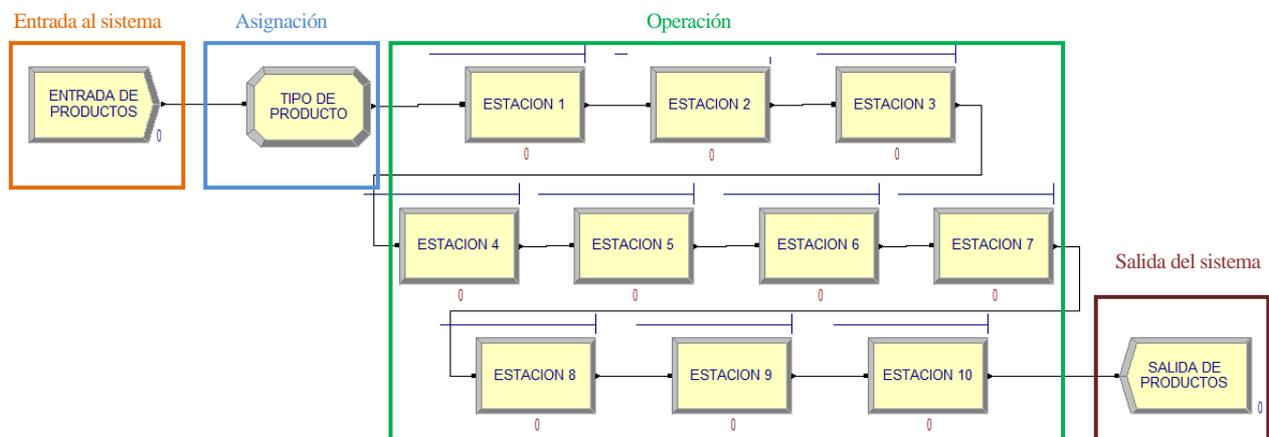


Figura 18. Escenario general [Fuente: Elaboración Propia]

Este modelo genérico nos ayudará a comprender mejor el funcionamiento de los distintos sistemas. En particular, el modelo mostrado procesa cinco tipos de productos distintos, cuenta con diez estaciones de trabajo, una congestión del cuello de botella de 0,5 y una discrepancia entre las máquinas de las distintas estaciones alta. La forma de construir el resto de modelos es análoga, sean cuales sean sus parámetros principales, se elaboran de la misma manera.

4.4.1 Consideraciones del modelo

Antes de pasar a la descripción de los módulos señalados en la figura anterior vamos a ver una serie de consideraciones o decisiones de diseño que se han tenido en cuenta y que ayudan a completar la explicación del funcionamiento:

- El **tiempo de transporte** entre estaciones, el paso de las entidades que fluyen por el sistema de una estación a otra se ha considerado **instantáneo**. Esto es debido a que no podemos suponer un tiempo de transporte 'x' que luego no se corresponda con la planta que se vaya a servir de los resultados de este estudio, los tiempos entre llegadas o la variabilidad del sistema se verían modificadas. Si se conocen los tiempos de transporte no conlleva una gran dificultad añadirlo al tiempo de ciclo de nuestros resultados.
- Las paradas del sistema no se van a tener en cuenta como tales en el modelado. Ya sean paradas planificadas, o imprevistas como reprocesados y averías. Estas paradas introducen también una variabilidad extra y ha sido introducida en el sistema a través de los coeficientes de variación de las máquinas, los cuales hacen que los tiempos de proceso se desvíen de su media en mayor o menor medida como lo harían estas paradas.
- Los **buffers intermedios** han sido considerados **infinitos**. Esto es equivalente a decir que han sido diseñados de manera que ninguna estación sufra un bloqueo. Al igual que con los tiempos de transporte en el primer punto, esta decisión se debe a que, introduciendo una probabilidad de bloqueo específica para nuestros sistemas no estaríamos ajustándonos lo máximo posible a un caso genérico y no lograríamos el objetivo de nuestro estudio, que es que sea cual sea la configuración de línea puedan servirse de nuestros resultados. Además se entiende que en un buen diseño los buffers, aunque lógicamente no pueden ser infinitos, se les da una capacidad suficiente para que no ocurra el colapso de alguna estación.
- Por el mismo motivo que no se han considerado los tiempos de transporte ni de paradas, tampoco se han considerado los tiempos de **set-up** o preparación de las máquinas que también sería específico para cada operación y sencillo de incluir en los cálculos posteriores.
- Con el fin de alcanzar un régimen permanente de funcionamiento se ha simulado cada modelo estableciendo **horizonte temporal** de 20.000 unidades de tiempo, con un **warm-up** o tiempo de puesta a punto de 2.000 unidades de tiempo necesario para comenzar a recabar datos estadísticos una vez estemos seguros de que se ha alcanzado un comportamiento estable del sistema. Además se ha simulado cada modelo un total de 30 **réplicas**, esto es necesario debido a que los modelos contienen variables aleatorias así el programa puede simular todas las opciones y devolver un resultado promedio.

4.4.2 Módulo Entrada al Sistema

En este primer módulo, del tipo *Create* ya definido, se ha modelado la entrada de trabajos a la línea de producción. Para ello se ha introducido la inversa de la tasa de entrada deseada, tiempo entre llegadas, para cada configuración y creado la entidad 'PRODUCTO'.

Figura 19. Parámetros del módulo Entrada al Sistema [Fuente: Elaboración Propia]

4.4.3 Módulo Asignación

La función de este módulo de tipo *Assign* es definir las entidades que van pasando como de un tipo u otro, esta asignación se hará de forma aleatoria con igualdad de probabilidades de ser de un tipo y otro.

Figura 20. Parámetros del módulo Asignación [Fuente: Elaboración Propia]

Como se observa en el cuadro de configuración anterior, lo primero que se ha hecho es crear el atributo 'TIPO' el cual tomará un valor de 1 a 5 según una distribución discreta con un 20% de probabilidades de ser cualquiera de los valores. Este atributo será asignado a la entidad correspondiente.

4.4.4 Módulo Operación

Estos módulos tipo *Process* representan las estaciones u operaciones. Para su configuración ha sido necesaria la creación de un recurso (Resource) que será la máquina con su correspondiente operario, y la creación de una expresión que relacione la estación en la que nos encontramos con el tipo de producto que es y según dicha combinación le asigne un tiempo de proceso determinado. Esta técnica es denominada 'Índice- Expresión' ya que nos basamos en el índice o atributo para asignarle un tiempo de proceso u otro.

Figura 21. Parámetros del módulo Asignación [Fuente: Elaboración Propia]

Dicha expresión tendrá tantas filas como tipos de productos estemos procesando, en este caso cinco filas de la forma: $\text{LOGN}(t_s, \text{Coef. Var})$. El funcionamiento es el siguiente, si por ejemplo estamos en la estación 1 y la entidad que llega tiene un 1 como atributo TIPO (producto del tipo 1), se ejecutará la primera fila de la expresión. Recordemos que los t_s fueron introducidos según la tabla de tiempos de proceso y los coeficientes de variación valdrán 0,25; 0,75 ó 1,25 según estemos ante un modelo con discrepancia entre máquinas alta, media o baja. Mencionar que el módulo *Expression* que hace esto posible pertenece al paquete *Advanced Process*.

4.4.5 Módulo Salida del Sistema

Este módulo simplemente representa el final de la línea o de proceso productivo. En él se recaban las estadísticas que luego compondrán los reportes que ofrece el programa.

4.5 ShopAnalyzer

El ShopAnalyzer es otra de las herramientas clave empleadas en la resolución de este estudio, como ya se ha comentado anteriormente es programa prototipo diseñado para para calcular las variables de estado en régimen permanente de un proceso productivo general con varios productos desarrollado por Jose M. Framiñán, Catedrático del Departamento de Organización y Gestión de Empresas I de la Universidad de Sevilla.

El uso que se le ha dado a esta herramienta es el de comparar nuestros resultados obtenidos con el software Arena con los que ofrecía el ShopAnalyzer, tomando estos últimos como resultados analíticos que se obtendrían de realizar los cálculos del sistema con las ecuaciones vistas.

El programa distingue entre dos tipos de configuraciones: procesos de taller general (el nuestro) y sistemas de fabricación flexibles.

4.5.1 Funcionamiento

Como en el subapartado anterior del funcionamiento del software Arena Simulation, ahora vamos a proceder de igual manera apoyándonos en un ejemplo basados en el mismo modelo que antes: 5 tipos de productos, 10 estaciones, congestión del cuello de botella del 50% y discrepancia entre estaciones alta.

Según el Manual de Uso del autor, para la utilización de esta herramienta en primer lugar es necesario definir nuestro sistema en un archivo de texto con las siguientes etiquetas (Nótese que las cifras decimales han de ser indicadas por “.”):

- **JOBS:** Indica el número de trabajos distintos a considerar en el proceso. Ejemplo: [JOBS=5]
- **MACHINES_STAGE:** Indica en un vector (de dimensión el número de estaciones) el número de máquinas idénticas que hay en cada una de las estaciones del proceso. Ejemplo:[MACHINES_STAGE=1,1,2]
- **INPUT_FLOW:** Indica en una matriz (de tantas filas como tipos de trabajos y tantas columnas como número de estaciones) el flujo medio de entrada externo que llega a cada una de las estaciones. Ejemplo: [INPUT_FLOW=2,0,0;1.3,0,2.5]

Indica que, en el caso del trabajo de tipo A, a la estación 1 llega un flujo externo de valor medio 2 trabajos/unidad de tiempo, mientras que a las estaciones 2 y 3 no llega flujo externo. Además, en el caso del trabajo de tipo B, a la estación 1 llega un flujo externo de valor medio 1,3 trabajos/unidad de tiempo, mientras que a la estación 2 no llega flujo externo, y a la estación 3 llega un flujo de 2,5 unidades de flujo/unidad de tiempo.

- **VAR_INPUT_FLOW:** Indica en una matriz (de tantas filas como tipos de trabajos y tantas columnas como número de estaciones) la variabilidad del flujo de entrada externo que llega a cada una de las estaciones para los distintos tipos de trabajos. Ejemplo: [VAR_INPUT_FLOW=1,1.2,0]

Indica que solo hay un tipo de trabajo (puesto que solo tiene una fila) y que a la estación 1 llega un flujo externo con variabilidad 1, mientras que la variabilidad del flujo de la estación es 1,2, y el de la estación 3 es cero.

- **PROCESSING_TIMES:** Indica en una matriz (de tantas filas como tipos de trabajos y tantas columnas como número de estaciones) el tiempo medio de servicio (o proceso) de las máquinas de cada una de las estaciones para cada uno de los tipos de trabajos. Ejemplo:[PROCESSING_TIMES=5,8,2,6;2,2,5,3]

Indica que, en un proceso de 4 estaciones, puesto que la matriz tiene dos filas, hay dos tipos de trabajos (que llamaremos A y B) y que los tiempos de proceso de las estaciones 1, 2, 3 y 4 son 5, 8, 2 y 6 respectivamente para los trabajos de tipo A, y de 2, 2, 5 y 3 para los trabajos de tipo B.

- **VAR_PROCESSING_TIMES:** Indica en una matriz (de tantas filas como tipos de trabajos y tantas columnas como número de estaciones) la variabilidad de los tiempos de proceso de las máquinas de cada una de las estaciones. Ejemplo:[VAR_PROCESSING_TIMES=0.5,2,1.6]

Indica que en un proceso con tres estaciones (puesto que la matriz tiene 3 columnas) solo hay un tipo de trabajo (puesto que solo hay una fila en la matriz) y la variabilidad de los tiempos de proceso de las estaciones 1, 2 y 3 son 0,5; 2 y 1,6 respectivamente.

- **ROUTING_INFO:** Indica en una matriz (de tantas filas como el número de estaciones x número de productos y tantas columnas como número de estaciones) la probabilidad de las rutas para cada producto.

Estas etiquetas eran obligatorias para el correcto funcionamiento del programa, en nuestro estudio adicionalmente hemos añadido dos etiquetas más opcionales que no aportan información acerca del funcionamiento del sistema pero ayudan a la visualización y comprensión de los resultados. Son:

- **STAGE_NAMES:** Indica en un vector (de dimensión el número de estaciones) el nombre de cada una de las estaciones a efectos de la presentación de los datos de salida. Ejemplo:[STAGE_NAMES=Estación 1, Estación 2,...]
- **JOB_NAMES:** Indica en un vector (de dimensión el número de tipos de trabajos) el nombre de cada uno de los tipos de trabajos a efectos de la presentación de los datos de salida. Ejemplo:[JOB_NAMES=Tipo A,Tipo B,..]

A continuación se muestra el archivo de texto necesario para la ejecución del programa para el modelo de ejemplo. Señalar que en la etiqueta ROUTING_INFO sería necesario una matriz de 50 filas x 10 columnas, la cual sería la unión de 5 matrices de dimension 10x10 como la mostrada en la imagen siguiente, pero por motivos de espacio hemos incluido solo una de las cinco submatrices.

```
[ JOBS=5]
[MACHINES_STAGE=1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
[STAGE_NAMES=EST_1,EST_2,EST_3,EST_4,EST_5,EST_6,EST_7,EST_8,EST_9,EST_10]
[JOB_NAMES=A,B,C,D,E]
[INPUT_FLOW=0.0264,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0.0264,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0.0264,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0.0264,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0.0264,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
[VAR_INPUT_FLOW=0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
[PROCESSING_TIMES=1,2,3,2,5,1,3,4,5,3;
4,4,3,3,4,2,2,1,2,4;
5,2,2,1,1,2,1,5,5,4;
3,2,5,5,3,2,1,4,4,2;
4,3,1,3,5,5,3,5,1,4]
[VAR_PROCESSING_TIMES=0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625;
0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625;
0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625;
0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625;
0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625,0.5625,1.5625,0.0625]
[ROUTING_INFO=0,1,0,0,0,0,0,0,0,0;
0,0,1,0,0,0,0,0,0,0;
0,0,0,1,0,0,0,0,0,0;
0,0,0,0,1,0,0,0,0,0;
0,0,0,0,0,1,0,0,0,0;
0,0,0,0,0,0,1,0,0,0;
0,0,0,0,0,0,0,1,0,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,1,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,1;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
```

Figura 22. Etiquetas ShopAnalyzer. 5 productos, 10 estaciones, congestión cuello de botella 50%, discrepancia alta [Fuente: Elaboración Propia]

Para ejecutarlo es necesario abrir la consola del PC e introducir:

C:\Usuarios\Yo\Programa> ShopAnalyzer datos_proceso tipo_proceso

Donde la primera parte sería el directorio donde tenemos guardado el archivo de texto, datos_proceso es el nombre del archivo de texto y, en nuestro caso, tipo_proceso sería un 0 lo que significa entorno tipo taller general.

4.6 Modelos Predictivos

Sin perder de vista el objetivo principal de este proyecto que será el análisis de los errores de las principales ecuaciones del campo de estudio del diseño de sistemas productivos mediante la comparación de resultados de simulación y analíticos para concluir bajo qué condiciones y en qué escenarios presentan un mejor o peor comportamiento, además, se va a elaborar un modelo predictivo empleando el popular lenguaje de programación *Python*.

El modelado predictivo es un sistema que emplea datos y estadísticas para predecir resultados a partir de unos modelos de datos. A grandes rasgos su funcionamiento se basa en entrenar al modelo con un gran volumen de datos, en nuestro caso estos datos serán los obtenidos de los cálculos de los errores explicados en el párraf anterior, cuando el modelo ya ha ‘aprendido’ se le pide que prediga los resultados que tendríamos con ciertos valores de nuestras variables de entrada. Estos modelos son la base en la que se fundamenta el campo de vanguardia del *Machine Learning* o aprendizaje automático.

Existen varios tipos de dichos modelos predictivo como por ejemplo pueden ser:

- Los basados en Regresión Lineal
- Support Vector Regression (SVR)
- Curvas de Regresión Adaptativa Multivariante
- Redes Neuronales
- Árboles de Decisión y Regresión

En este estudio no se explicará en profundidad cada uno de estos modelos debido a que no es el objeto del proyecto y resultaría muy extenso y pesado. Sí decir que en el desarrollo de nuestra metodología se han probado algunos de ellos y escogido aquel que presentase un mejor ajuste, el **árbol de decisión**.

Veamos el código del modelo en cuestión, como en los casos anteriores apoyándonos en capturas del propio modelo.

En primer lugar, como en cualquier programa en Python, es necesario importar las librerías que vamos a utilizar.

```
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.svm import SVR
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error, r2_score
from sklearn.model_selection import train_test_split
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn import tree
```

Figura 23. Código de importación de librerías [Fuente: Elaboración Propia]

Posteriormente cargamos los datos, para ello hacemos que el programa ‘lea’ el archivo en el que hemos recogido los errores obtenidos de las ecuaciones

```
df_error = pd.read_excel('C:/Users/JUAN/Documents/input_python_error.xlsx')

df_error['ERROR'].min()
df_error['ERROR'].max()
df_error['ERROR'].mean()
```

Figura 24. Código de Cargar Datos [Fuente: Elaboración Propia]

Una vez leídos los datos, los separamos entre datos que servirán de entrenamiento y los que servirán para comprobar el funcionamiento del modelo, *train* y *test*.

```
train, test = train_test_split(df_error)

train.columns
X_train = train.drop(columns=['ERROR'])
y_train = train['ERROR']
X_test = test.drop(columns=['ERROR'])
y_test = test['ERROR']
```

Figura 25. Código para separar los datos [Fuente: Elaboración Propia]

Dicha separación se hace, primero mezclando los datos de forma aleatoria y luego cogiendo un 80% de datos para entrenamiento y el 20% restante para el test, esto se hace para evitar que el modelo caiga en lo que se denomina *overfitting* o sobredimensionamiento. El *overfitting* se da cuando nuestro modelo ha sido entrenado con demasiados datos, ha aprendido a ajustarse solo a nuestros casos particulares incluidos sus errores o ‘ruido’ y no es capaz de generalizar y reconocer otras entradas como fiables.

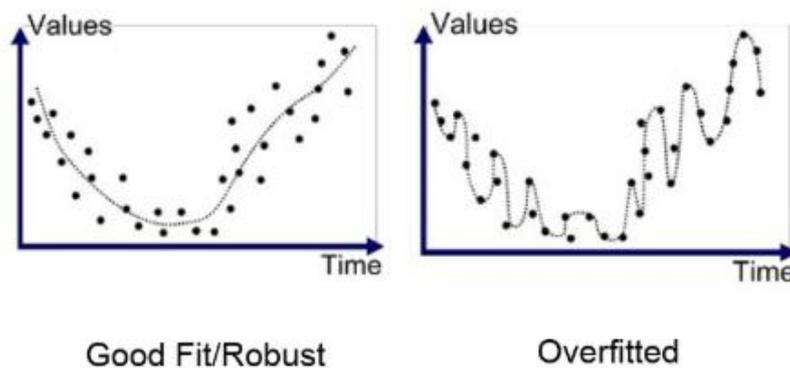


Figura 26. Buen ajuste frente a sobreajuste [Fuente: Anup Bhande, 2018]

Llamamos al modelo de árbol de decisión indicando la profundidad del mismo, el número de ramificaciones.

```
lr = DecisionTreeRegressor(max_depth=4)
```

Figura 27. Comando para ejecutar modelo de árbol de decisión [Fuente: Elaboración Propia]

Ahora ajustamos el modelo a los datos de entrenamiento, es decir, entrenamos el modelo y hacemos predicciones para los propios datos de entrenamiento y para los de test. Esto se hace con el objetivo de comparar los errores entre ambos ajustes, nos indicará si estamos sufriendo *overfitting* o en su defecto *underfitting*.

```
#Entrenamos modelo
lr.fit(X_train, y_train)

#Predecimos modelo
train_preds = lr.predict(X_train)
test_preds = lr.predict(X_test)
```

Figura 28. Código para entrenar y hacer predicciones [Fuente: Elaboración Propia]

Calculamos y sacamos por pantalla ambos errores, el error entre los datos de entrenamiento con las predicciones que se han hecho para ellos y lo mismo para los datos de prueba.

```
print('TRAIN ERROR:', mean_absolute_error(train_preds, y_train))
print('TEST ERROR:', mean_absolute_error(test_preds, y_test))
```

Figura 29. Calcular y sacar por pantalla los errores [Fuente: Elaboración Propia]

Por último, una vez que hemos considerado que el modelo se ajusta adecuadamente, es decir, que ambos errores anteriores entran dentro de unos parámetros normales, pasamos a dibujar el árbol de decisión. Para ello se emplea el siguiente comando.

```
plt.figure(figsize=(17,10))
tree.plot_tree(lr)
```

Figura 30. Dibujar árbol de decisión [Fuente: Elaboración Propia]

Los resultados e interpretación de los mismos los veremos más adelante.

5 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este bloque vamos a exponer los resultados obtenidos tanto de las simulaciones de los distintos escenarios como los resultados analíticos, recordemos que estos últimos serán los obtenidos con la herr. ShopAnalyzer. Se expondrá también el cálculo de los errores de las variables que han sido objeto de estudio.

5.1 Resultados de la Simulación

En este subapartado se presentarán los resultados arrojados por los reports del software de simulación Arena. Estos se recogerán en tablas para facilitar su presentación según procesen 1, 3 ó 5 tipos de productos a la vez y según sea la discrepancia entre sus estaciones.

Los resultados estadísticos de los reportes que hemos recabado son los de las variables del w (WIP), de los tiempos de ciclos (ct), de los tiempos de espera (qt) y de las unidades producidas o producto terminado.

5.1.1 Resultados para procesos de 1 producto

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas
1 PRODUCTO	ALTA	1	0,5	0,50	1,00	0,00	9000
		1	0,65	0,65	1,01	0,01	11700
		1	0,8	0,84	1,05	0,05	14400
		1	0,95	1,42	1,49	0,49	17100
		3	0,5	1,01	6,07	0,06	3000
		3	0,65	1,36	6,26	0,26	3900
		3	0,8	1,83	6,88	0,88	4800
		3	0,95	3,48	10,98	4,98	5700
		7	0,5	1,71	17,06	0,05	1800
		7	0,65	2,24	17,23	0,22	2340
		7	0,8	2,84	17,75	0,74	2880
		7	0,95	3,75	19,72	2,72	3420
		10	0,5	2,92	29,18	0,16	1800
		10	0,65	3,85	29,63	0,63	2340
		10	0,8	4,93	30,82	1,82	2880
		10	0,95	7,01	36,89	7,88	3420

Tabla 10. Resultados de simulación para escenarios con 1 producto y discrepancia alta [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas
1 PRODUCTO	MEDIA	1	0,5	0,50	1,00	0,00	9000
		1	0,65	0,65	1,01	0,01	11700
		1	0,8	0,84	1,05	0,05	14400
		1	0,95	1,42	1,49	0,49	17100
		3	0,5	1,00	6,02	0,00	3000
		3	0,65	1,31	6,05	0,05	3900
		3	0,8	1,66	6,24	0,24	4800
		3	0,95	2,23	7,05	1,04	5700
		7	0,5	1,70	17,00	0,00	1800
		7	0,65	2,22	17,05	0,04	2340
		7	0,8	2,76	17,26	0,25	2880
		7	0,95	3,46	18,19	1,19	3420
		10	0,5	2,90	29,02	0,02	1800
		10	0,65	3,79	29,15	0,15	2340
		10	0,8	4,75	29,67	0,66	2880
		10	0,95	6,01	31,63	2,63	3420

Tabla 11. Resultados de simulación para escenarios con 1 producto y discrepancia media [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas
1 PRODUCTO	BAJA	1	0,5	0,50	1,00	0,00	9000
		1	0,65	0,65	1,01	0,01	11700
		1	0,8	0,84	1,05	0,05	14400
		1	0,95	1,42	1,49	0,49	17100
		3	0,5	1,00	6,00	0,00	3000
		3	0,65	1,30	6,00	0,00	3900
		3	0,8	1,61	6,03	0,02	4800
		3	0,95	2,00	6,31	0,31	5700
		7	0,5	1,70	17,00	0,00	1800
		7	0,65	2,21	17,00	0,00	2340
		7	0,8	2,72	17,02	0,02	2880
		7	0,95	3,29	17,30	0,30	3420
		10	0,5	2,90	29,03	0,00	1800
		10	0,65	3,77	29,00	0,02	2340
		10	0,8	4,65	29,07	0,06	2880
		10	0,95	5,64	29,68	0,68	3420

Tabla 12. Resultados de simulación para escenarios con 1 producto y discrepancia baja [Fuente: Elaboración Propia]

5.1.2 Resultados para procesos de 3 productos

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas	
3 PRODUCTOS	ALTA	1	0,5	0,50	3,31	0,04	2700	
		1	0,65	0,66	3,35	0,15	3510	
		1	0,8	1,01	4,20	0,85	4320	
		1	0,95	3,49	12,24	8,88	5131	
			3	0,5	1,34	8,94	0,25	2700
			3	0,65	1,82	9,35	0,68	3510
			3	0,8	2,60	10,85	2,18	4320
			3	0,95	5,76	20,19	11,53	5129
			7	0,5	2,82	18,79	1,12	2700
			7	0,65	3,92	20,11	2,47	3510
			7	0,8	5,64	23,50	5,86	4320
			7	0,95	12,99	45,57	27,95	5131
			10	0,5	3,96	30,02	1,36	2376
			10	0,65	5,19	31,87	3,21	2934
			10	0,8	7,06	35,73	7,06	3600
			10	0,95	11,85	49,78	21,11	4284

Tabla 13. Resultados de simulación para escenarios con 3 productos y discrepancia alta [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas	
3 PRODUCTOS	MEDIA	1	0,5	0,50	3,31	0,04	2700	
		1	0,65	0,66	3,35	0,15	3510	
		1	0,8	1,01	4,20	0,85	4320	
		1	0,95	3,49	12,24	8,88	5131	
			3	0,5	1,33	8,87	0,18	2700
			3	0,65	1,80	9,22	0,54	3510
			3	0,8	2,54	10,57	1,89	4320
			3	0,95	5,39	18,90	10,23	5129
			7	0,5	2,77	18,47	0,85	2700
			7	0,65	3,83	19,62	1,99	3510
			7	0,8	5,42	22,59	4,96	4320
			7	0,95	12,17	42,70	25,07	5131
			10	0,5	3,89	29,50	0,84	2376
			10	0,65	5,03	30,87	2,21	2934
			10	0,8	6,78	33,91	5,25	3600
			10	0,95	10,48	44,02	15,36	4284

Tabla 14. Resultados de simulación para escenarios con 3 productos y discrepancia media [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas
3 PRODUCTOS	BAJA	1	0,5	0,50	3,31	0,04	2700
		1	0,65	0,66	3,35	0,15	3510
		1	0,8	1,01	4,20	0,85	4320
		1	0,95	3,49	12,24	8,88	5131
		3	0,5	1,33	8,83	0,15	2700
		3	0,65	1,78	9,15	0,48	3510
		3	0,8	2,49	10,39	1,72	4320
		3	0,95	5,29	18,57	9,91	5129
		7	0,5	2,76	18,39	0,74	2700
		7	0,65	3,77	19,35	1,71	3510
		7	0,8	5,30	22,09	4,46	4320
		7	0,95	12,31	43,18	25,53	5131
		10	0,5	3,86	29,24	0,57	2376
		10	0,65	4,94	30,29	1,63	2934
		10	0,8	6,60	33,00	4,34	3600
		10	0,95	10,05	42,23	13,57	4284

Tabla 15. Resultados de simulación para escenarios con 3 productos y discrepancia baja [Fuente: Elaboración Propia]

5.1.3 Resultados para procesos de 5 productos

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas
5 PRODUCTOS	ALTA	1	0,5	0,50	3,40	0,00	2646
		1	0,65	0,65	3,41	0,01	3438
		1	0,8	0,88	3,74	0,34	4230
		1	0,95	2,11	7,55	4,15	5021
		3	0,5	1,32	8,98	0,17	2646
		3	0,65	1,78	9,33	0,53	3438
		3	0,8	2,43	10,36	1,57	4230
		3	0,95	4,48	16,06	7,26	5022
		7	0,5	2,87	20,66	1,06	2502
		7	0,65	3,99	22,05	2,46	3258
		7	0,8	5,48	24,69	5,09	3996
		7	0,95	9,61	36,40	16,83	4752
		10	0,5	4,25	32,19	1,99	2376
		10	0,65	5,96	34,87	4,67	3078
		10	0,8	8,47	40,12	9,92	3798
		10	0,95	14,18	56,74	26,54	4500

Tabla 16. Resultados de simulación para escenarios con 5 productos y discrepancia alta [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas	
5 PRODUCTOS	MEDIA	1	0,5	0,50	3,40	0,00	2646	
		1	0,65	0,65	3,41	0,01	3438	
		1	0,8	0,88	3,74	0,34	4230	
		1	0,95	2,11	7,55	4,15	5021	
			3	0,5	1,31	8,91	0,10	2646
			3	0,65	1,75	9,17	0,38	3438
			3	0,8	2,36	10,03	1,23	4230
			3	0,95	4,25	15,24	6,45	5022
			7	0,5	2,83	20,36	0,74	2502
			7	0,65	3,89	21,48	1,91	3258
			7	0,8	5,26	23,68	4,08	3996
			7	0,95	8,88	33,63	14,04	4752
			10	0,5	4,18	31,70	1,49	2376
			10	0,65	5,78	33,82	3,63	3078
			10	0,8	8,06	38,21	8,00	3798
			10	0,95	13,30	53,22	23,02	4500

Tabla 17. Resultados de simulación para escenarios con 5 productos y discrepancia media [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt	Uds. Producidas	
5 PRODUCTOS	BAJA	1	0,5	0,50	3,40	0,00	2646	
		1	0,65	0,65	3,41	0,01	3438	
		1	0,8	0,88	3,74	0,34	4230	
		1	0,95	2,11	7,55	4,15	5021	
			3	0,5	1,31	8,88	0,07	2646
			3	0,65	1,74	9,11	0,31	3438
			3	0,8	2,32	9,87	1,07	4230
			3	0,95	4,18	14,99	6,19	5022
			7	0,5	2,82	20,30	0,68	2502
			7	0,65	3,84	21,20	1,61	3258
			7	0,8	5,13	23,11	3,51	3996
			7	0,95	8,66	32,82	13,22	4752
			10	0,5	4,15	31,40	1,20	2376
			10	0,65	5,87	33,25	3,05	3078
			10	0,8	7,83	37,09	6,88	3798
			10	0,95	12,63	50,52	20,31	4500

Tabla 18. Resultados de simulación para escenarios con 5 productos y discrepancia baja [Fuente: Elaboración Propia]

5.2 Resultados Analíticos

Se van a presentar de manera análoga al subapartado anterior los resultados obtenidos de la herramienta ShopAnalyzer. Destacar que esta no ofrece el valor de la variable unidades producidas, por lo que dicha columna se ha omitido.

5.2.1 Resultados para procesos de 1 producto

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
1 PRODUCTO	ALTA	1	0,5	0,56	1,13	0,13
		1	0,65	0,80	1,23	0,23
		1	0,8	1,20	1,50	0,50
		1	0,95	3,21	3,38	2,38
		3	0,5	1,40	8,41	0,80
		3	0,65	2,28	10,52	1,51
		3	0,8	4,21	15,78	3,26
		3	0,95	16,47	52,02	15,34
		7	0,5	2,08	20,81	0,54
		7	0,65	3,13	24,11	1,02
		7	0,8	5,09	31,80	2,11
		7	0,95	15,18	79,89	8,98
		10	0,5	3,88	38,81	0,98
		10	0,65	6,23	47,92	1,89
		10	0,8	11,02	68,86	3,99
		10	0,95	37,01	194,79	16,58

Tabla 19. Resultados analíticos para escenarios con 1 productos y discrepancia alta [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
1 PRODUCTO	MEDIA	1	0,5	0,56	1,13	0,13
			0,65	0,80	1,23	0,23
			0,8	1,20	1,50	0,50
			0,95	3,21	3,38	2,38
		3	0,5	1,15	6,91	0,30
			0,65	1,68	7,73	0,58
			0,8	2,61	9,78	1,26
			0,95	7,45	23,52	5,84
		7	0,5	1,87	18,70	0,24
			0,65	2,62	20,12	0,45
			0,8	3,74	23,38	0,91
			0,95	8,25	43,43	3,78
		10	0,5	3,37	33,74	0,47
			0,65	4,94	37,97	0,90
			0,8	7,58	47,39	1,84
			0,95	19,30	101,59	7,26

Tabla 20. Resultados analíticos para escenarios con 1 productos y discrepancia media [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
1 PRODUCTO	BAJA	1	0,5	0,56	1,13	0,13
			0,65	0,80	1,23	0,23
			0,8	1,20	1,50	0,50
			0,95	3,21	3,38	2,38
		3	0,5	1,10	6,58	0,19
			0,65	1,54	7,09	0,36
			0,8	2,23	8,35	0,78
			0,95	5,37	16,94	3,65
		7	0,5	1,83	18,29	0,18
			0,65	2,52	19,37	0,34
			0,8	3,49	21,84	0,69
			0,95	7,05	37,12	2,87
		10	0,5	3,20	31,99	0,30
			0,65	4,42	34,73	0,57
			0,8	6,55	40,91	1,19
			0,95	14,60	76,83	4,78

Tabla 21. Resultados analíticos para escenarios con 1 productos y discrepancia baja [Fuente: Elaboración Propia]

5.2.2 Resultados para procesos de 3 productos

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
3 PRODUCTOS	ALTA	1	0,5	0,58	3,90	0,56
		1	0,65	0,85	4,38	1,05
		1	0,8	1,34	5,59	2,26
		1	0,95	4,01	14,06	10,73
		3	0,5	1,74	11,61	2,94
		3	0,65	2,70	13,84	5,17
		3	0,8	4,36	18,17	9,50
		3	0,95	9,47	33,21	24,55
		7	0,5	3,63	24,20	6,54
		7	0,65	5,85	30,01	12,34
		7	0,8	10,20	42,51	24,85
		7	0,95	30,36	106,54	88,87
		10	0,5	5,16	41,26	12,60
		10	0,65	8,66	53,14	24,47
		10	0,8	15,56	77,81	49,15
		10	0,95	47,42	199,23	170,56

Tabla 22. Resultados analíticos para escenarios con 3 productos y discrepancia alta [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
3 PRODUCTOS	MEDIA	1	0,5	0,58	3,90	0,56
		1	0,65	0,85	4,38	1,05
		1	0,8	1,34	5,59	2,26
		1	0,95	4,01	14,06	10,73
		3	0,5	1,54	10,24	1,57
		3	0,65	2,26	11,60	2,93
		3	0,8	3,48	14,50	5,83
		3	0,95	7,60	26,68	18,02
		7	0,5	3,17	21,11	3,44
		7	0,65	4,72	24,19	6,52
		7	0,8	7,39	30,78	13,11
		7	0,95	18,33	66,34	46,66
		10	0,5	4,37	34,97	6,30
		10	0,65	6,61	40,58	11,92
		10	0,8	10,29	51,95	22,78
		10	0,95	23,30	97,92	69,25

Tabla 23. Resultados analíticos para escenarios con 3 productos y discrepancia media [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
3 PRODUCTOS	BAJA	1	0,5	0,58	3,90	0,56
		1	0,65	0,85	4,38	1,05
		1	0,8	1,34	5,59	2,26
		1	0,95	4,01	14,06	10,73
		3	0,5	1,45	9,66	0,99
		3	0,65	2,06	10,57	1,90
		3	0,8	3,03	12,62	3,96
		3	0,95	6,54	22,93	14,27
		7	0,5	2,97	19,82	2,15
		7	0,65	4,25	21,79	4,13
		7	0,8	6,28	26,15	8,48
		7	0,95	14,27	50,07	32,40
		10	0,5	3,98	31,85	3,19
		10	0,65	5,66	34,75	6,08
		10	0,8	8,07	40,34	11,67
		10	0,95	15,27	64,18	35,51

Tabla 24. Resultados analíticos para escenarios con 3 productos y discrepancia baja [Fuente: Elaboración Propia]

5.2.3 Resultados para procesos de 5 productos

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
5 PRODUCTOS	ALTA	1	0,5	0,56	3,80	0,39
		1	0,65	0,79	4,13	0,73
		1	0,8	1,17	4,97	1,57
		1	0,95	2,98	10,67	7,27
		3	0,5	1,77	12,05	3,25
		3	0,65	2,75	14,41	5,61
		3	0,8	4,43	18,84	10,04
		3	0,95	9,76	17,53	9,15
		7	0,5	3,84	27,59	7,99
		7	0,65	6,24	34,45	14,85
		7	0,8	10,63	47,90	28,30
		7	0,95	28,18	106,74	87,14
		10	0,5	6,02	45,60	15,40
		10	0,65	10,13	59,10	29,10
		10	0,8	18,59	87,95	57,75
		10	0,95	49,30	197,00	167,00

Tabla 25. Resultados analíticos para escenarios con 5 productos y discrepancia alta [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
5 PRODUCTOS	MEDIA	1	0,5	0,56	3,80	0,39
		1	0,65	0,79	4,13	0,73
		1	0,8	1,17	4,97	1,57
		1	0,95	2,98	10,67	7,27
		3	0,5	1,51	10,26	1,46
		3	0,65	2,19	11,45	2,65
		3	0,8	3,26	13,89	5,09
		3	0,95	6,44	23,09	14,29
		7	0,5	3,32	23,85	4,25
		7	0,65	4,98	27,53	7,93
		7	0,8	7,74	34,85	15,25
		7	0,95	18,14	68,70	49,10
		10	0,5	5,11	38,69	8,49
		10	0,65	7,90	46,17	15,97
		10	0,8	13,07	61,94	31,74
		10	0,95	31,57	126,29	96,09

Tabla 26. Resultados analíticos para escenarios con 5 productos y discrepancia media [Fuente: Elaboración Propia]

Tipos de Productos	Discrepancia	Estaciones	Congestión del c.d.b	WIP	Ct	Qt
5 PRODUCTOS	BAJA	1	0,5	0,56	3,80	0,39
		1	0,65	0,79	4,13	0,73
		1	0,8	1,17	4,97	1,57
		1	0,95	2,98	10,67	7,27
		3	0,5	1,43	9,94	0,94
		3	0,65	2,01	10,53	1,73
		3	0,8	2,87	12,22	3,42
		3	0,95	5,52	19,77	10,97
		7	0,5	3,06	22,00	2,40
		7	0,65	4,36	24,10	4,50
		7	0,8	6,29	28,34	8,74
		7	0,95	12,70	48,09	28,48
		10	0,5	4,52	34,28	4,08
		10	0,65	6,48	37,87	7,67
		10	0,8	9,57	45,34	15,14
		10	0,95	18,58	74,31	44,11

Tabla 27. Resultados analíticos para escenarios con 5 productos y discrepancia baja [Fuente: Elaboración Propia]

5.3 Errores

En este subapartado se presentarán los errores entre ambas mediciones expresados en porcentajes. Siguiendo el mismo procedimiento que en los subapartados anteriores, se expondrán mediante tablas de resultados los errores para el WIP, el tiempo de ciclo y el tiempo de espera clasificados según el número de productos distintos a procesar.

5.3.1 Errores para procesos de 1 producto

ERROR WIP				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	11,08	11,08	11,08
	0,65	18,37	18,37	18,37
	0,8	30,28	30,28	30,28
	0,95	55,82	55,82	55,82
3	0,5	27,89	12,98	8,81
	0,65	40,50	21,74	15,33
	0,8	56,43	36,21	27,88
	0,95	78,89	70,05	62,75
7	0,5	18,03	9,07	7,04
	0,65	28,54	15,27	12,20
	0,8	44,19	26,18	22,09
	0,95	75,32	58,11	53,38
10	0,5	24,85	13,99	9,33
	0,65	38,16	23,21	14,60
	0,8	55,24	37,40	28,96
	0,95	81,06	68,86	61,37

Tabla 28. Errores en el WIP para escenarios con 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

ERROR QT				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	99,79	99,79	99,79
	0,65	97,64	97,64	97,64
	0,8	90,87	90,87	90,87
	0,95	79,33	79,33	79,33
3	0,5	92,39	99,60	100,00
	0,65	82,92	91,67	99,87
	0,8	73,15	81,31	96,87
	0,95	67,52	82,16	91,47
7	0,5	90,84	98,64	100,00
	0,65	78,56	90,70	99,98
	0,8	64,80	72,18	97,78
	0,95	69,76	68,43	89,48
10	0,5	83,68	96,78	100,00
	0,65	66,81	82,92	97,09
	0,8	54,26	64,24	94,61
	0,95	52,48	63,83	85,88

Tabla 29. Errores en el QT para escenarios con 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

ERROR CT				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	11,08	11,08	11,08
	0,65	18,36	18,36	18,36
	0,8	30,27	30,27	30,27
	0,95	55,82	55,82	55,82
3	0,5	27,89	12,98	8,80
	0,65	40,50	21,74	15,33
	0,8	56,43	36,21	27,88
	0,95	78,89	70,05	62,75
7	0,5	18,02	9,07	7,04
	0,65	28,54	15,27	12,20
	0,8	44,19	26,18	22,09
	0,95	75,32	58,11	53,38
10	0,5	24,81	13,99	9,26
	0,65	38,16	23,22	16,49
	0,8	55,24	37,40	28,96
	0,95	81,06	68,86	61,37

Tabla 30. Errores en el CT para escenarios con 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

5.3.2 Errores para procesos de 3 productos

ERROR WIP				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	14,23	14,23	14,23
	0,65	23,02	23,02	23,02
	0,8	24,83	24,83	24,83
	0,95	12,97	12,97	12,97
3	0,5	23,02	13,34	8,46
	0,65	32,43	20,55	13,47
	0,8	40,27	27,12	17,68
	0,95	39,20	29,18	19,02
7	0,5	22,37	12,50	7,19
	0,65	32,98	18,90	11,20
	0,8	44,72	26,62	15,52
	0,95	57,22	33,61	13,76
10	0,5	23,17	10,93	3,07
	0,65	40,04	23,92	12,82
	0,8	54,62	34,09	18,19
	0,95	75,01	55,05	34,20

Tabla 31. Errores en el WIP para escenarios con 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

ERROR QT				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	92,54	92,54	92,54
	0,65	85,88	85,88	85,88
	0,8	62,20	62,20	62,20
	0,95	17,18	17,18	17,18
3	0,5	91,60	88,28	84,85
	0,65	86,76	81,45	74,88
	0,8	77,06	67,56	56,40
	0,95	53,04	43,19	30,55
7	0,5	82,85	75,43	65,42
	0,65	80,01	69,48	58,51
	0,8	76,42	62,15	47,38
	0,95	68,55	46,27	21,20
10	0,5	89,21	86,65	82,01
	0,65	86,89	81,43	73,12
	0,8	85,63	76,97	62,82
	0,95	87,62	77,82	61,79

Tabla 32. Errores en el QT para escenarios con 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

ERROR CT				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	15,00	15,00	15,00
	0,65	23,47	23,47	23,47
	0,8	24,83	24,83	24,83
	0,95	12,94	12,94	12,94
3	0,5	23,03	13,34	8,52
	0,65	32,43	20,55	13,47
	0,8	40,27	27,12	17,68
	0,95	39,20	29,18	19,03
7	0,5	22,37	12,50	7,19
	0,65	32,98	18,90	11,20
	0,8	44,72	26,62	15,52
	0,95	57,22	35,63	13,76
10	0,5	27,24	15,65	8,21
	0,65	40,04	23,92	12,82
	0,8	54,09	34,72	18,19
	0,95	75,01	55,05	34,20

Tabla 33. Errores en el CT para escenarios con 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

5.3.3 Errores para procesos de 5 productos

ERROR WIP				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	10,40	10,40	10,40
	0,65	17,47	17,47	17,47
	0,8	24,70	24,70	24,70
	0,95	29,16	29,16	29,16
3	0,5	25,49	13,18	8,83
	0,65	35,23	19,89	13,51
	0,8	45,00	27,84	19,30
	0,95	52,08	33,99	24,16
7	0,5	25,11	14,63	7,71
	0,65	35,99	21,98	12,04
	0,8	48,46	32,06	18,45
	0,95	65,90	51,05	31,75
10	0,5	29,41	18,05	8,38
	0,65	41,15	26,74	9,42
	0,8	54,46	38,31	18,21
	0,95	71,23	57,86	32,01

Tabla 34. Errores en el WIP para escenarios con 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

ERROR QT				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	100,00	100,00	100,00
	0,65	99,25	99,25	99,25
	0,8	78,36	78,36	78,36
	0,95	42,83	42,83	42,83
3	0,5	94,84	93,36	92,92
	0,65	90,49	85,77	82,05
	0,8	84,36	75,83	68,83
	0,95	65,02	54,87	43,54
7	0,5	86,78	82,57	71,41
	0,65	83,46	75,92	64,23
	0,8	82,02	73,27	59,85
	0,95	80,69	71,41	53,59
10	0,5	87,10	82,50	70,45
	0,65	83,96	77,28	60,24
	0,8	82,82	74,78	54,54
	0,95	84,11	76,04	53,95

Tabla 35. Errores en el QT para escenarios con 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

ERROR CT				
EST.	CONG.	ALTA	MEDIA	BAJA
1	0,5	10,50	10,50	10,50
	0,65	17,48	17,48	17,48
	0,8	24,70	24,70	24,70
	0,95	29,18	29,18	29,18
3	0,5	25,49	13,17	10,67
	0,65	35,23	19,89	13,51
	0,8	45,00	27,84	19,30
	0,95	52,90	33,98	24,15
7	0,5	25,12	14,63	7,71
	0,65	35,99	21,98	12,04
	0,8	48,46	32,06	18,45
	0,95	65,90	51,05	31,75
10	0,5	29,41	18,06	8,38
	0,65	41,00	26,74	12,20
	0,8	54,39	38,31	18,21
	0,95	71,20	57,86	32,01

Tabla 36. Errores en el CT para escenarios con 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado vamos a analizar los resultados expuestos anteriormente. Para facilitar esta tarea se presentarán a modo de gráficas comparativas, separadas según la variable de interés que se esté analizando y la cantidad de productos que se estén procesando, enfrentando los modelos con distintas discrepancias entre estaciones. También se analizarán los comportamientos de dichas variables cuando procesamos distinta cantidad de productos. Obtendremos también conclusiones valiosas de variables que a priori, según el tratamiento de errores, no arrojan mucha información.

Veremos los árboles de decisión resultado obtenidos de los modelos predictivos realizados.

6.1 Variables de Interés

En este subapartado analizamos mediante gráficas comparativas, como ya hemos comentado cada una de las variables del estudio, como afecta la variabilidad introducida en forma de discrepancia entre las máquinas de distintas estaciones.

Recordemos que **ALTA** significaba que dichas máquinas se alternaban entre los tres posibles coeficientes de variación elegidos: 0,25; 0,75; 1,25. **MEDIA** entre 0,25 y 0,75, y **BAJA** todas las máquinas con coef. de variación de 0,25.

En primer lugar vamos a introducir un nuevo parámetro que fue analizado en los modelos de simulación pero no consta en las tablas de resultados a no tener la posibilidad de ser comparado con los resultados de ShopAnalyzer, se trata del número de **unidades producidas** con éxito. Este parámetro por sí solo no aporta una información veraz, pues nuestros modelos constan de una serie de parámetros aleatorios, como los tiempos de proceso, que difícilmente un modelo real va a compartir, sin embargo veremos como resulta muy útil a la hora de decantarnos entre dos configuraciones atendiendo al punto de vista de los costes.

En la siguiente tabla se muestran los datos recogidos sobre unidades producidas con cada una de las configuraciones diseñadas, nótese que no se hace distinción entre discrepancia de máquinas pues el resultado obtenido era el mismo par alas tres posibilidades (alta, media y baja).

Uds. Producidas				
EST.	CONG.	1 Prod	3 Prod	5 Prod
1	0,5	9000	2700	2646
	0,65	11700	3510	3438
	0,8	14400	4320	4230
	0,95	17100	5131	5021
3	0,5	3000	2700	2646
	0,65	3900	3510	3438
	0,8	4800	4320	4230
	0,95	5700	5129	5022
7	0,5	1800	2700	2502
	0,65	2340	3510	3258
	0,8	2880	4320	3996
	0,95	3420	5131	4752
10	0,5	1998	2376	2376
	0,65	2340	2934	3078
	0,8	2880	3600	3798
	0,95	3420	4284	4500

Tabla 37. Unidades producidas con éxito [Fuente: Elaboración Propia]

Como hemos comentado, la cifra en sí no tiene mayor repercusión, pero sí el comportamiento que presenta, para ello veamos las siguientes gráficas.

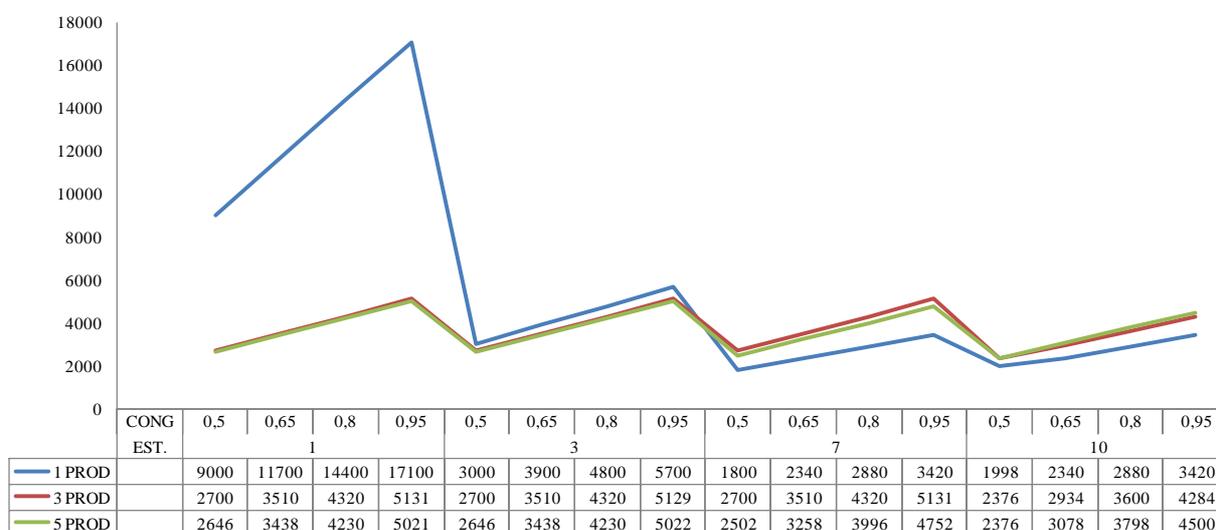


Figura 31. Evolución uds. producidas con éxito [Fuente: Elaboración Propia]

En esta primera gráfica se aprecia un volumen de unidades claramente superior en los modelos encargados de procesar un solo tipo de producto para sistemas con una sola estación, esto es debido a la sencillez de la línea y un tiempo de proceso muy bajo para esta primera operación lo que hace que se procesen con una gran rapidez.. Posteriormente, a medida que aumenta el número de estaciones se estabiliza el volumen de producto terminado igualándose last res gráficas

Vemos que todos los sistemas alcanzan su máximo como es lógico cuanto mayor es la congestión de la línea. A mayor unidades en el sistema (WIP) mayor será la cantidad de producto terminado, a mayor rendimiento trabaja nuestra línea. Debido a la diferencia notable en cuanto al volumen de unidades producidas por los sistemas monoproductos con el resto, vamos a presentar la siguiente gráfica para un mejor análisis.

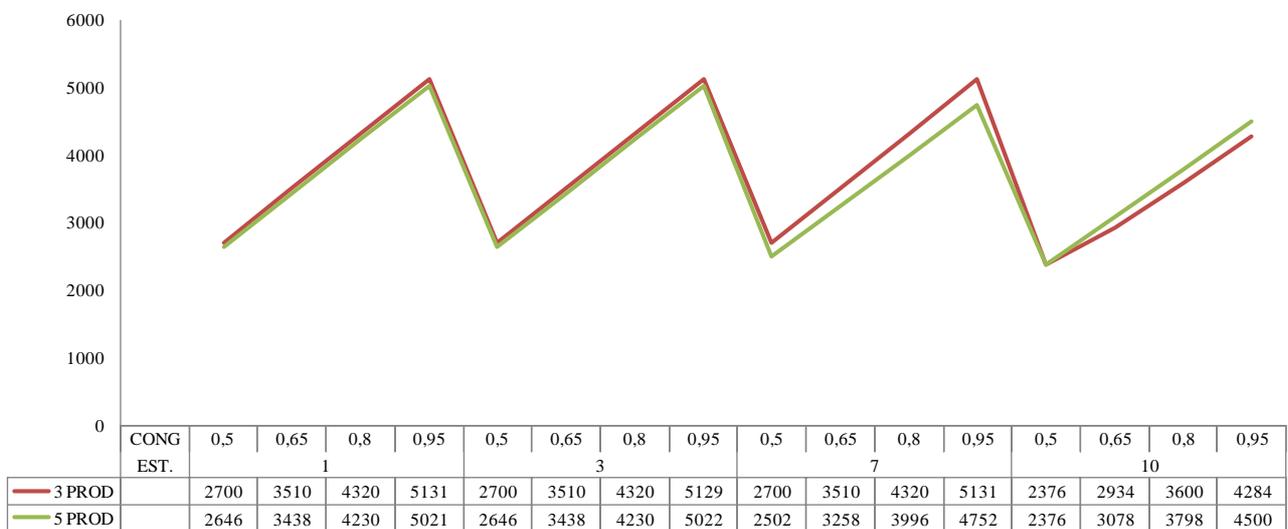


Figura 32. Evolución uds. producidas con éxito para sistemas de 3 y 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

De nuevo se cumple que a menor variabilidad mayor producto terminado, siendo levemete mayor la gráfica para 3 productos que para 5, al igual que el patrón de alcanzar el máximo a mayor congestión de la línea.

Observar también que las cantidades para cada número de estaciones sigue un patrón que se repite aproximadamente con leves variaciones, es decir para 3 estaciones y congestión del 80% se procesa la misma cantidad que para 7 estaciones y la misma congestión. Este patrón vemos que empieza a darse también para un sólo producto a partir de las 3 estaciones.

6.1.1 Work In Process

Pasamos ahora a analizar de la misma manera el WIP

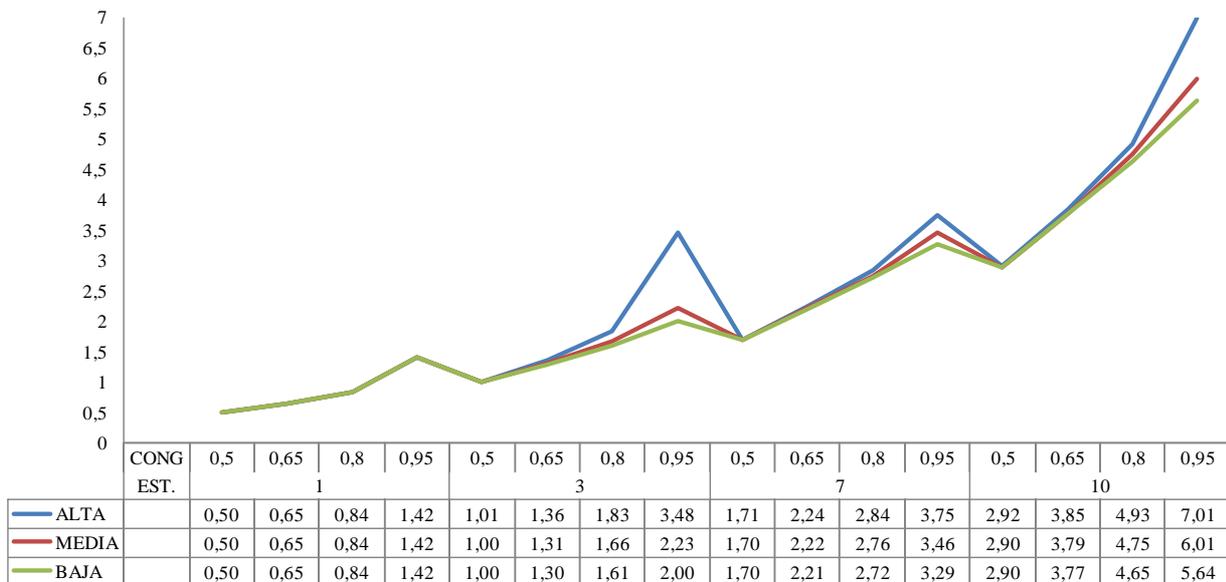


Figura 33. Evolución del WIP para sistemas de 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

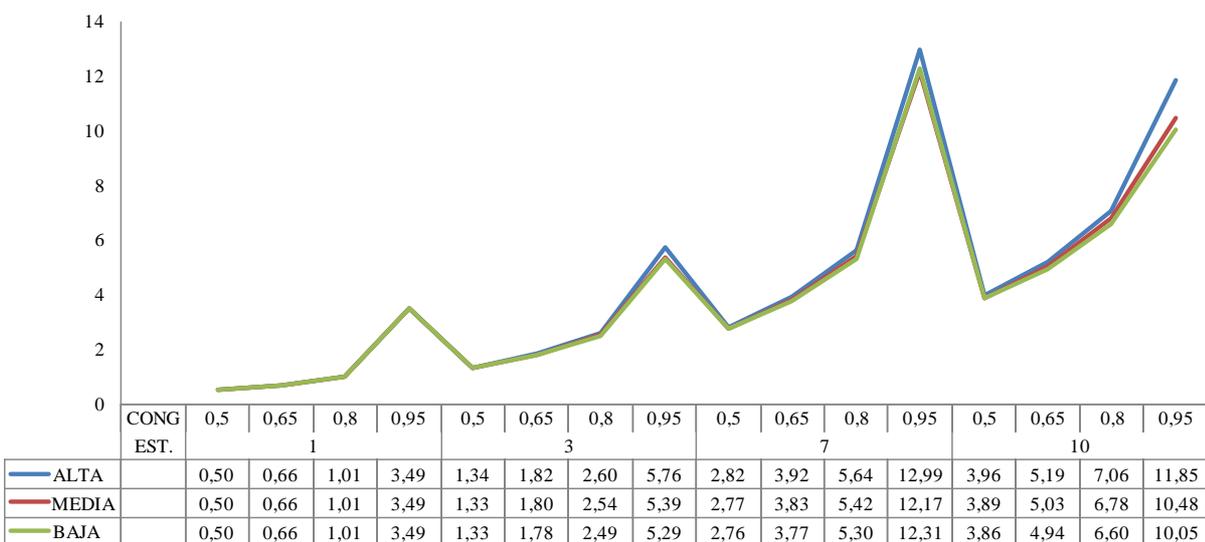


Figura 34. Evolución del WIP para sistemas de 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

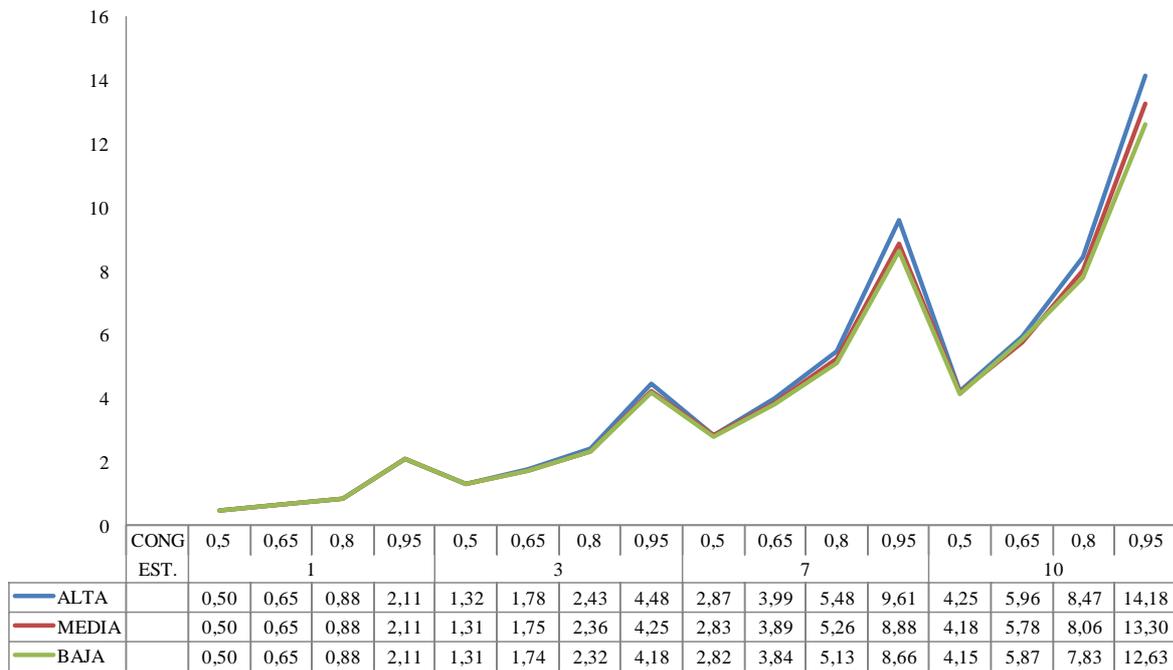


Figura 35. Evolución del WIP para sistemas de 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

Se puede observar que el WIP evoluciona con una tendencia creciente a medida que va aumentando el número de estaciones y que prácticamente no se ve afectado por la variabilidad de las máquinas (gráficas azul, roja y verde muy similares). En la primera gráfica se aprecia un leve aumento cuando la congestión del cuello de botella alcanza sus máximos pero por lo general no se ve muy afectado por la diferencia de variabilidades, pues para observar una diferencia entre alta, media y baja habría que irse a la tercera cifra decimal, no representada en estas tablas.

Otro aspecto destacable es que a medida que aumenta el número de productos distintos a procesar aumenta también el WIP, de nuevo consecuencia de la variabilidad añadida.

6.1.2 Tiempo de Ciclo

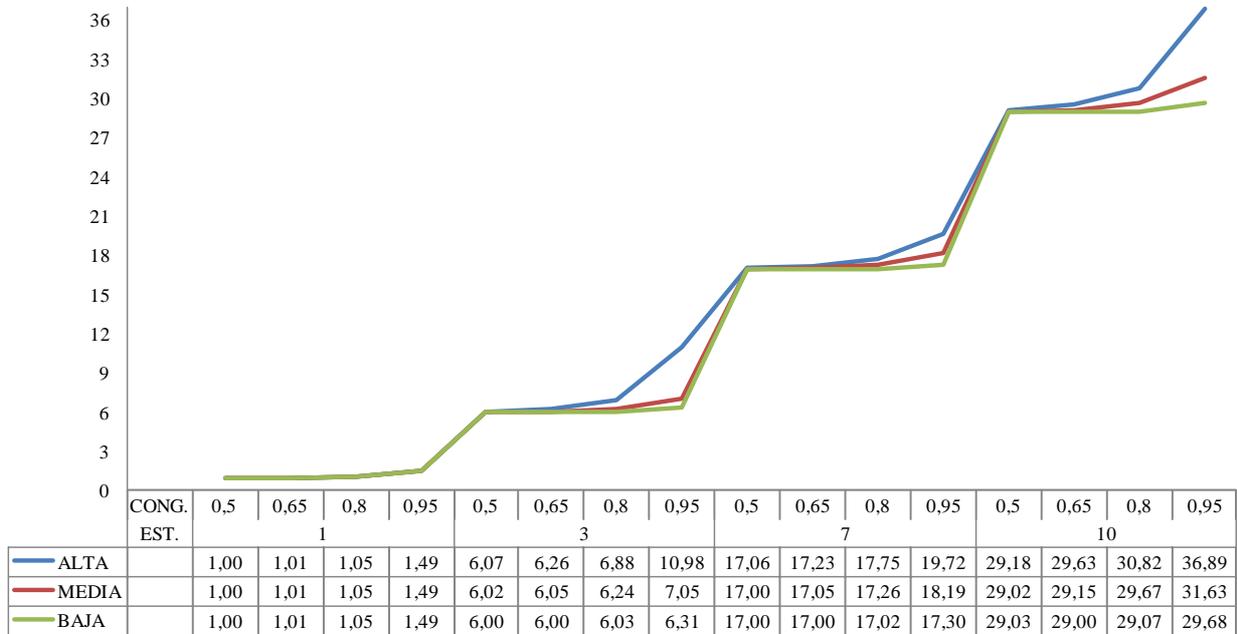


Figura 36. Evolución del CT para sistemas de 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

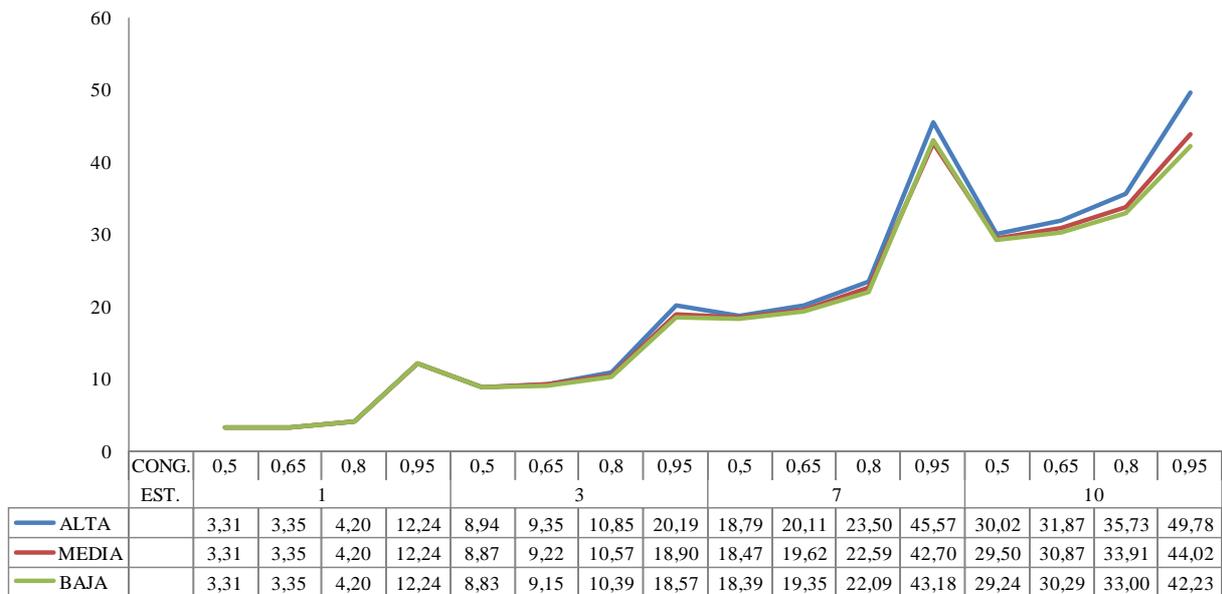


Figura 37. Evolución del CT para sistemas de 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

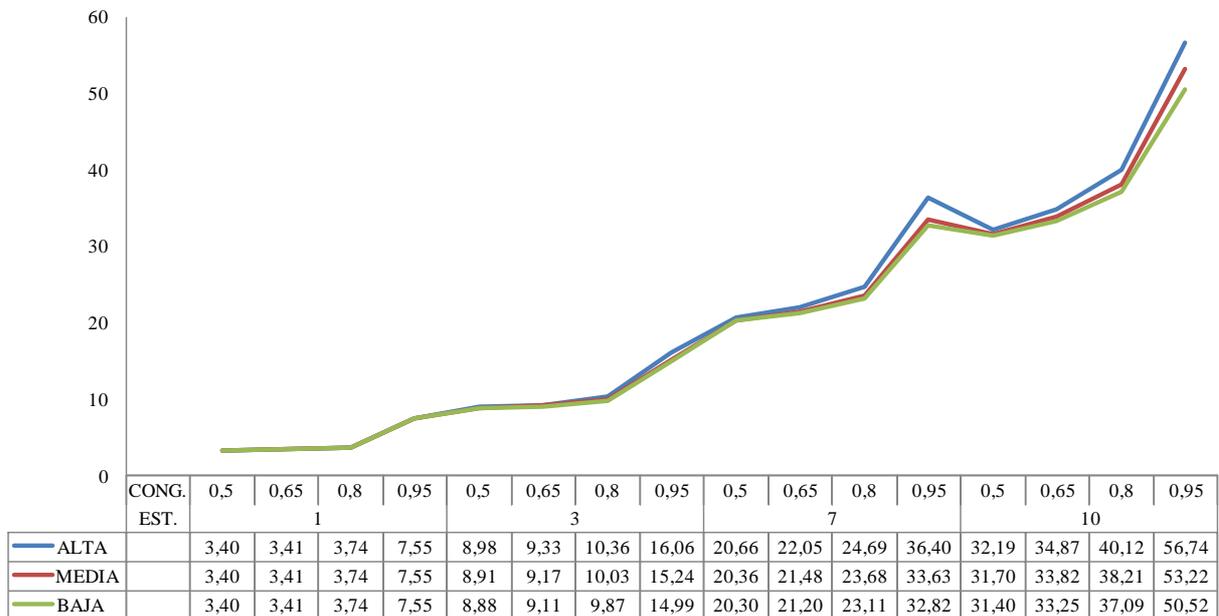


Figura 38. Evolución del CT para sistemas de 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

Para sistemas con un solo producto vemos que la gráfica sigue un comportamiento creciente dibujando un patrón escalonado, no se ve prácticamente afectada por el aumento de la congestión en la línea. Los saltos significativos o escalones se producen con el aumento de estaciones, es obvio que a mayor operaciones mayor tiempo de ciclo.

Se aprecia también que la discrepancia entre máquinas no tiene gran repercusión, tan sólo en sistemas para un solo producto apreciamos un aumento en los tiempos en los casos de mayor congestión.

Es interesante la comparativa de estas gráficas pues podemos decir que desde el punto de vista del tiempo de ciclo compensa aumentar el número de productos a procesar si nuestra demanda lo requiere, pues no sufriremos una subida significativa de los tiempos de ciclo además de que la gráfica se va suavizando, el sistema absorbe bien esa variabilidad extra que se introduciría.

6.1.3 Tiempos de Espera

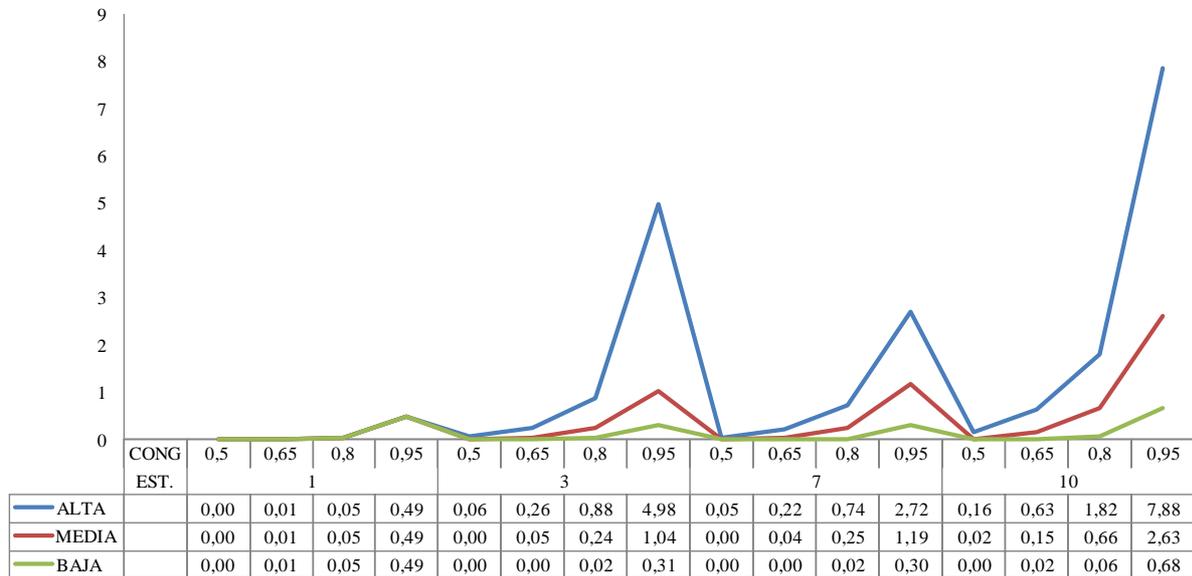


Figura 39. Evolución del QT para sistemas de 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

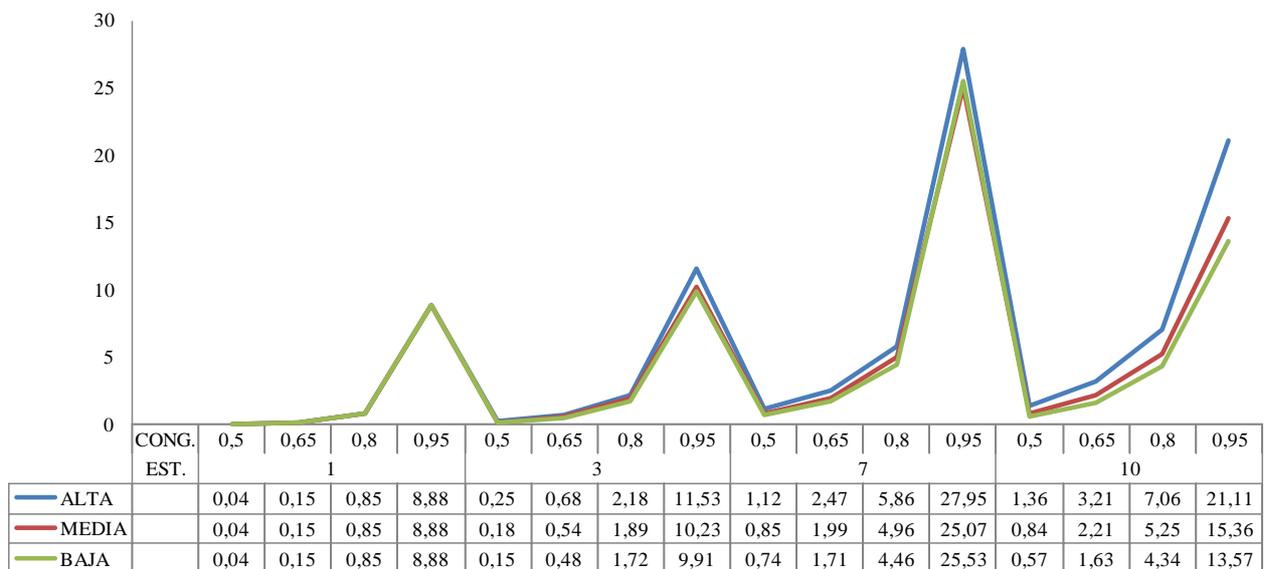


Figura 40. Evolución del QT para sistemas de 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

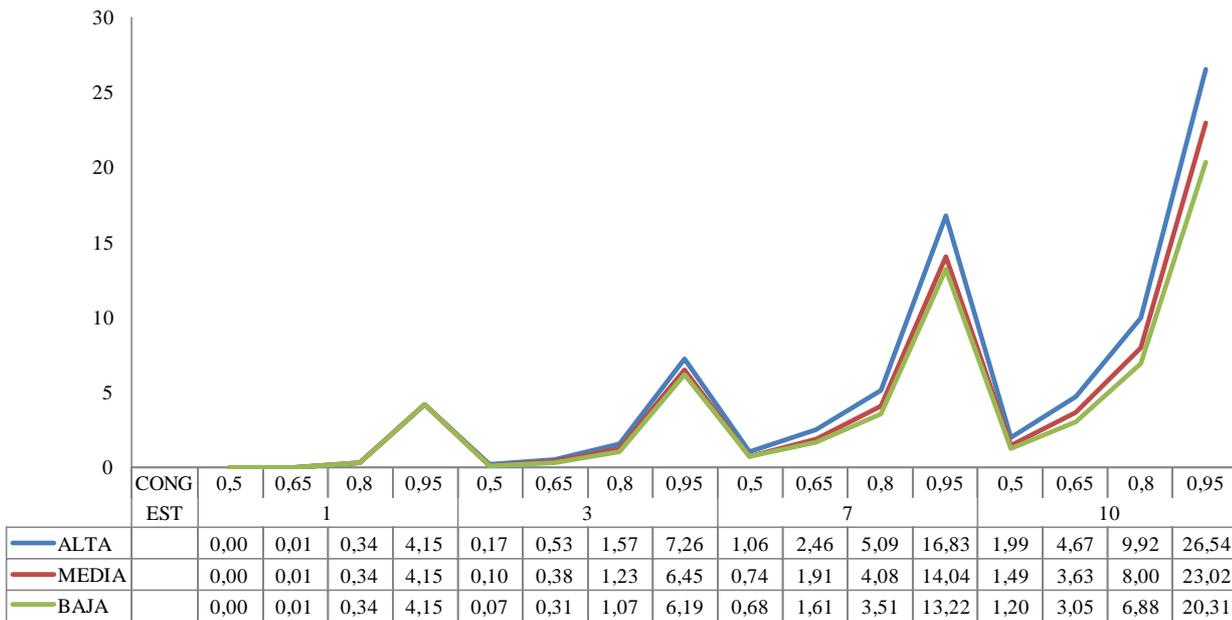


Figura 41. Evolución del QT para sistemas de 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

Se aprecia que en los tres casos, para las primeras configuraciones de una sola estación, los tiempos de espera rondan el cero, esto es debido a que la tasa de entrada es menor que la de servicio para darle estabilidad al sistema, y al tener sólo una estación no se produce acumulación en los buffers. Estos valores en torno a cero provocarán que nuestros errores en estas mediciones con respecto a los resultados analíticos sean del 100%.

Se observa que las gráficas de las tres figuras describen un comportamiento similar, que a su vez coincide con las evoluciones del WIP y de los tiempos de ciclo. A pesar de esto, comprobamos que los valores de simulación para esta variable eran mucho menores que los resultados analíticos, por ello decidimos representar dichos resultados analíticos con el objetivo de detectar posibles anomalías en su comportamiento y de presentar un mejor análisis.

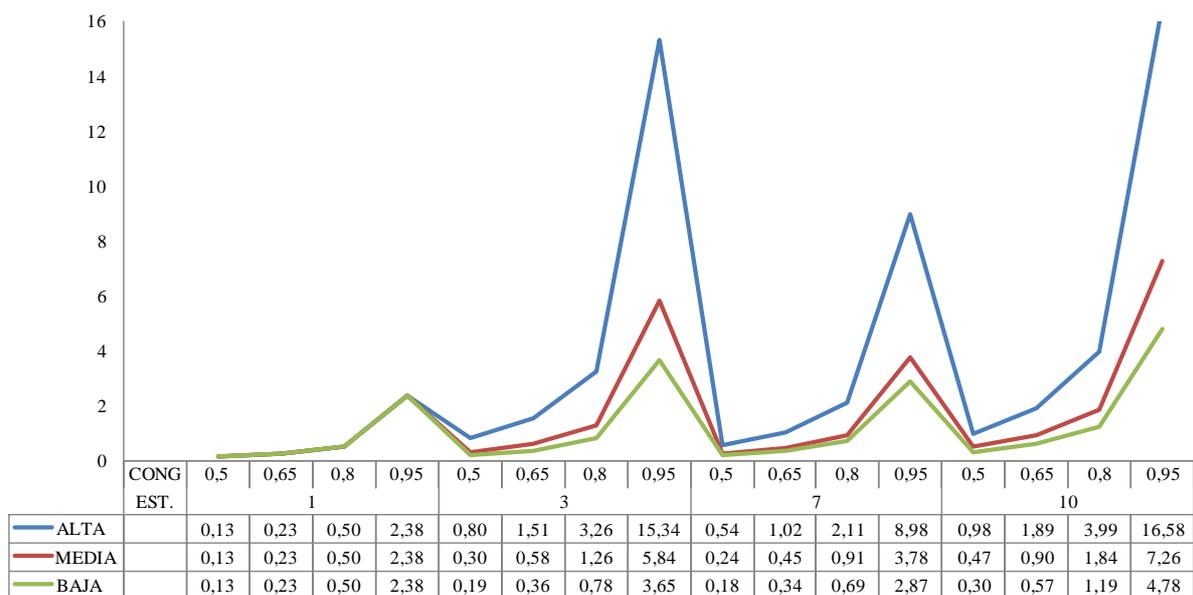


Figura 42. Evolución del QT para sistemas de 1 producto ShopAnalyzer [Fuente: Elaboración Propia]

En esta primera gráfica vemos que el patrón que describe el comportamiento de nuestra variable es muy similar al descrito por la dibujada con los resultados de simulación para sistemas que procesan un producto, aunque no coinciden los volúmenes. Experimenta una subida a medida que va aumentando la congestión del cuello de botella, siendo mayor la curva a mayor discrepancia entre máquinas.

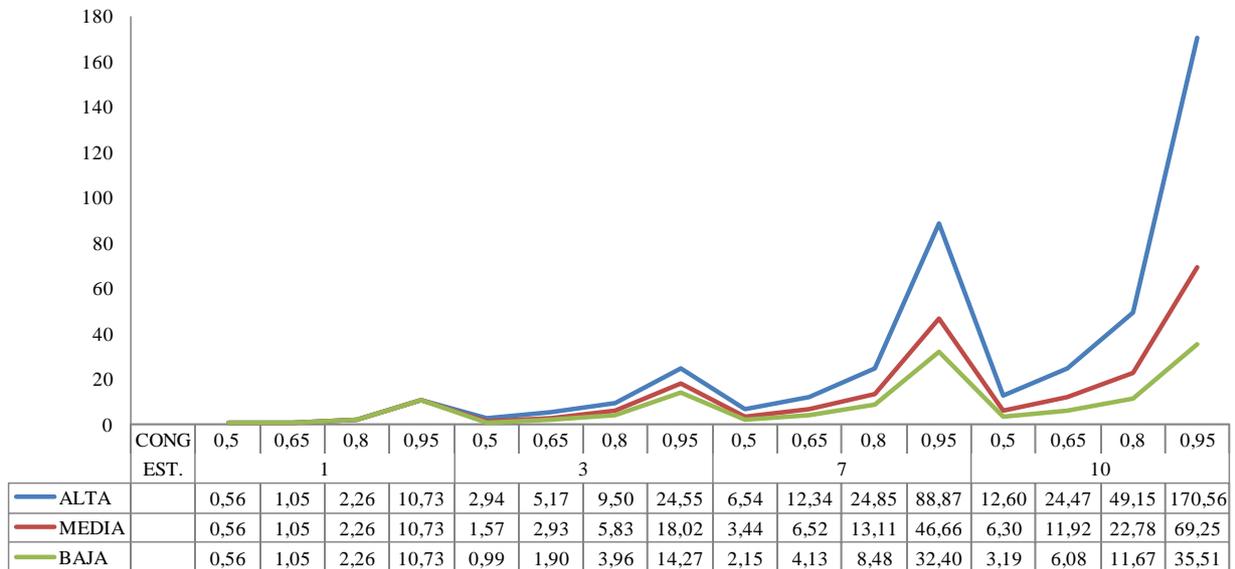


Figura 43. Evolución del QT para sistemas de 3 productos ShopAnalyzer [Fuente: Elaboración Propia]

Para tres y cinco productos observamos el mismo compartimiento pero más suavizado, el sistema absorbe bien los aumentos en la congestión. A mayor número de productos, mayor variabilidad y mayor tiempo medio acumulado de espera.

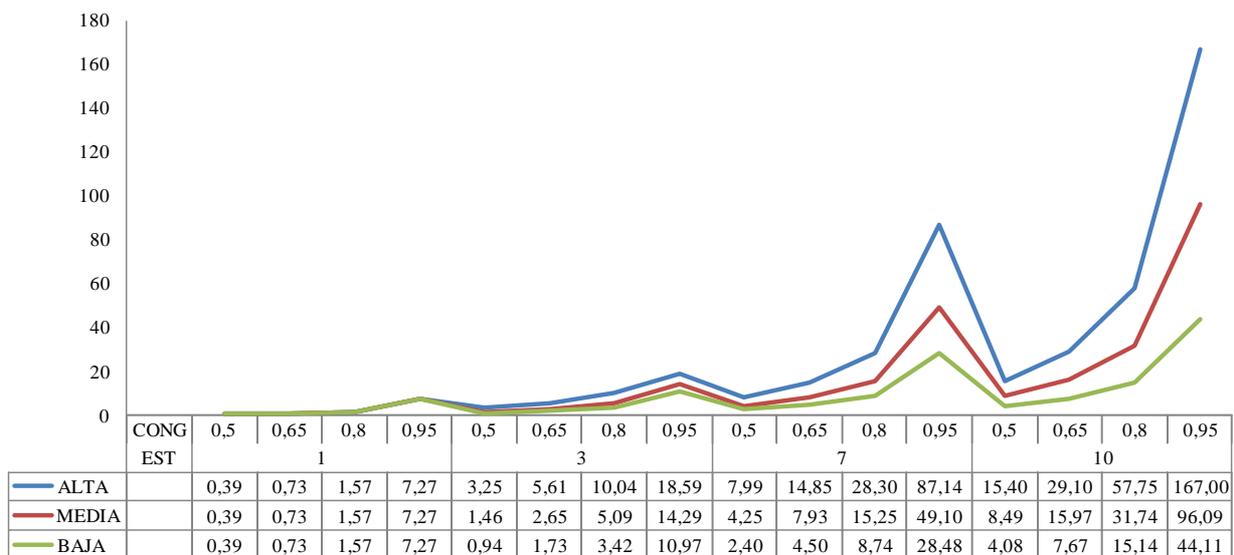


Figura 44. Evolución del QT para sistemas de 5 productos ShopAnalyzer [Fuente: Elaboración Propia]

6.2 Análisis de los errores

Una vez expuesto en el subapartado anterior el comportamiento de las variables de nuestro estudio según los modelos de simulación (con la salvedad de los tiempos de espera), pasamos a analizar los errores.

Como se ha comentado con anterioridad, estos errores suponen la diferencia entre los resultados de simulación y los resultados analíticos (ShopAnalyzer) que representan a los resultados que se obtendrían de las ecuaciones expuestas.

Por tanto, el objetivo sería conocer de antemano el error de nuestros cálculos en las principales variables de nuestra futura planta de producción.

De la misma manera que con el comportamiento de las variables, vamos a presentar la evolución de los errores mediante representaciones gráficas para una mejor visualización. Recordemos que en cuanto al tiempo de espera, hemos descartado los resultados de simulación y por tanto no hay errores que analizar.

6.2.1 Error en el WIP

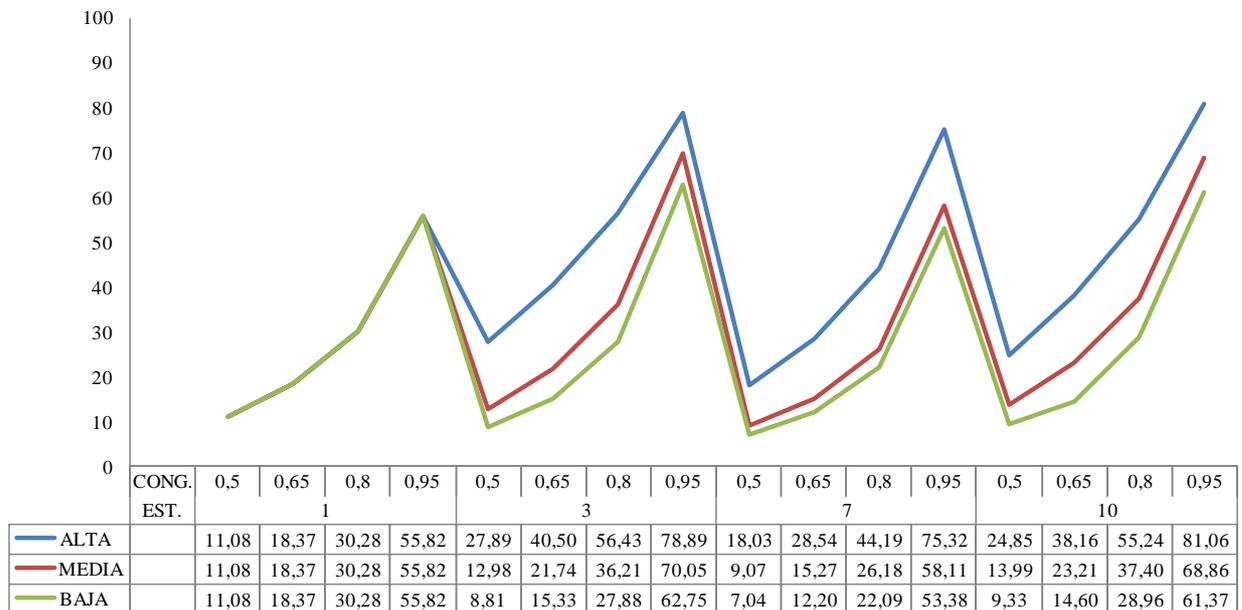


Figura 45. Evolución del error en el WIP para sistemas de 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

Sigue un patrón regular con forma de dientes de sierra oscilando desde un error del 7% hasta unos máximos de entorno al 80%. Dichos máximos se alcanzan a máximas congestiones del c.d.b. Como era de esperar también el error es mayor en aquellas configuraciones en la que la discrepancia entre las estaciones es mayor.

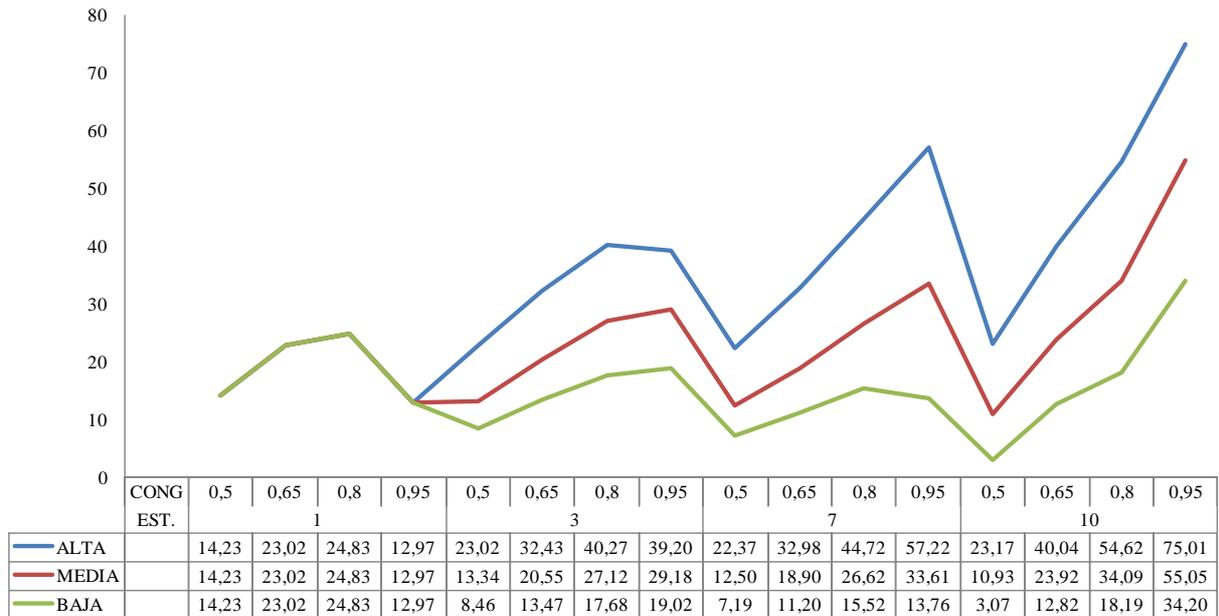


Figura 46. Evolución del error en el WIP para sistemas de 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

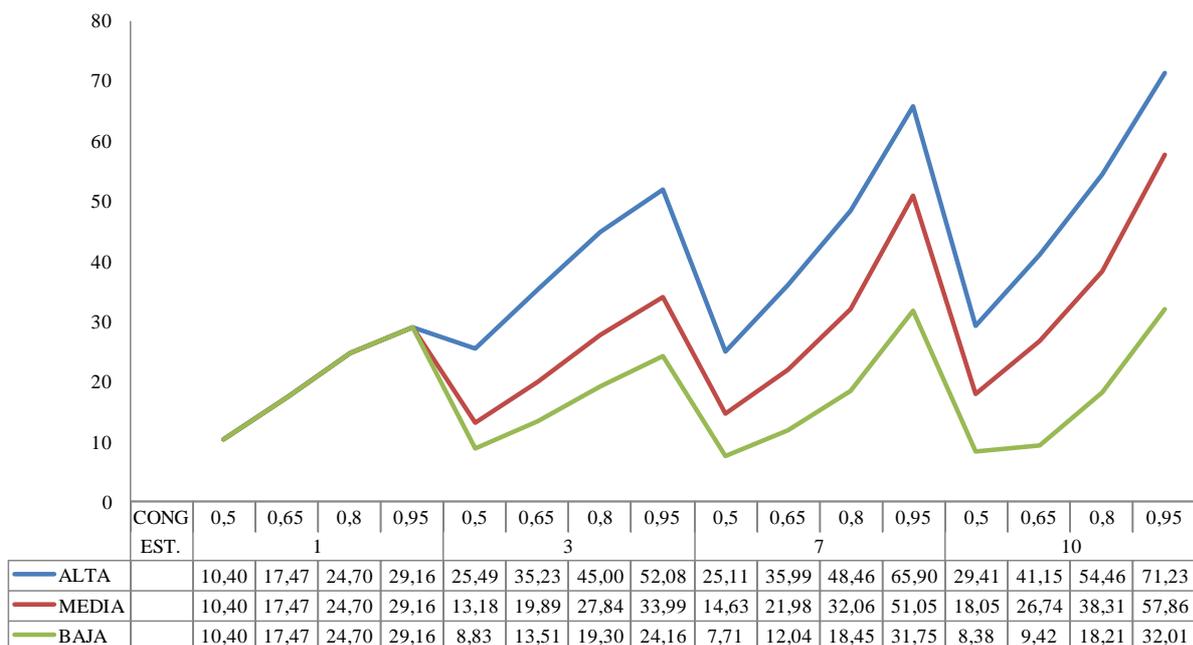


Figura 47. Evolución del error en el WIP para sistemas de 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

Para configuraciones de 3 y 5 productos observamos que el patrón de dientes de sierra vuelve a darse. Observando los valores vemos que las ecuaciones funcionan mejor a medida que incrementamos la variabilidad procesando un mayor número de productos. A medida que aumentamos el tamaño de la línea el error se dispara.

6.2.2 Error en el tiempo de ciclo

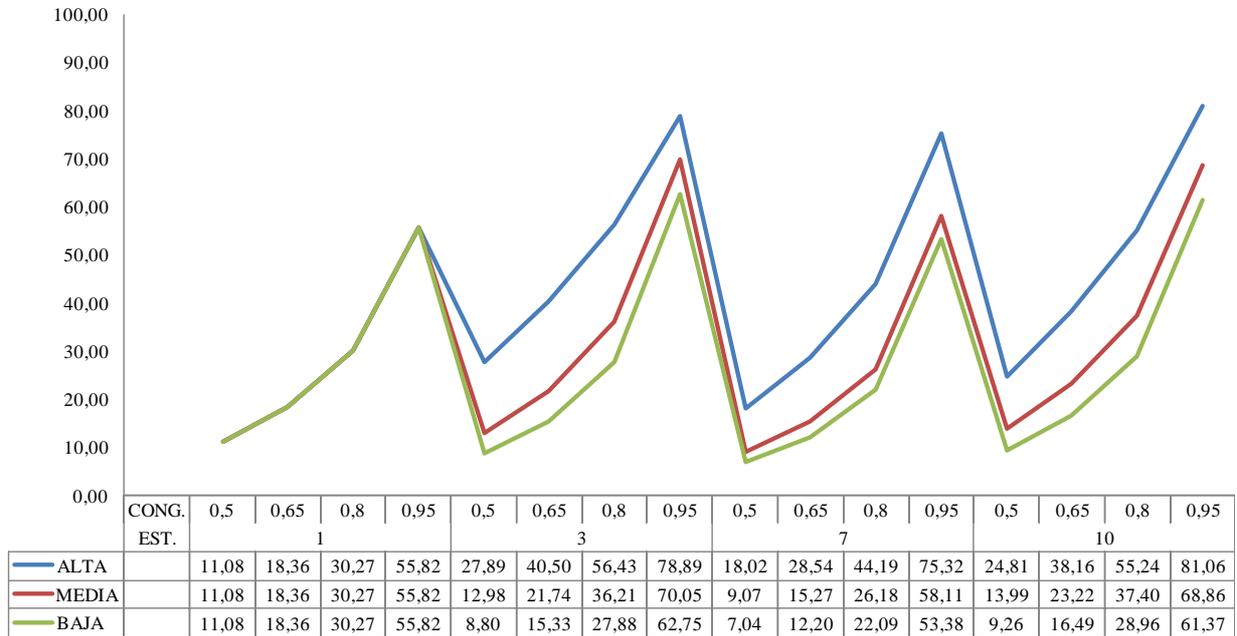


Figura 48. Evolución del error en el CT para sistemas de 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

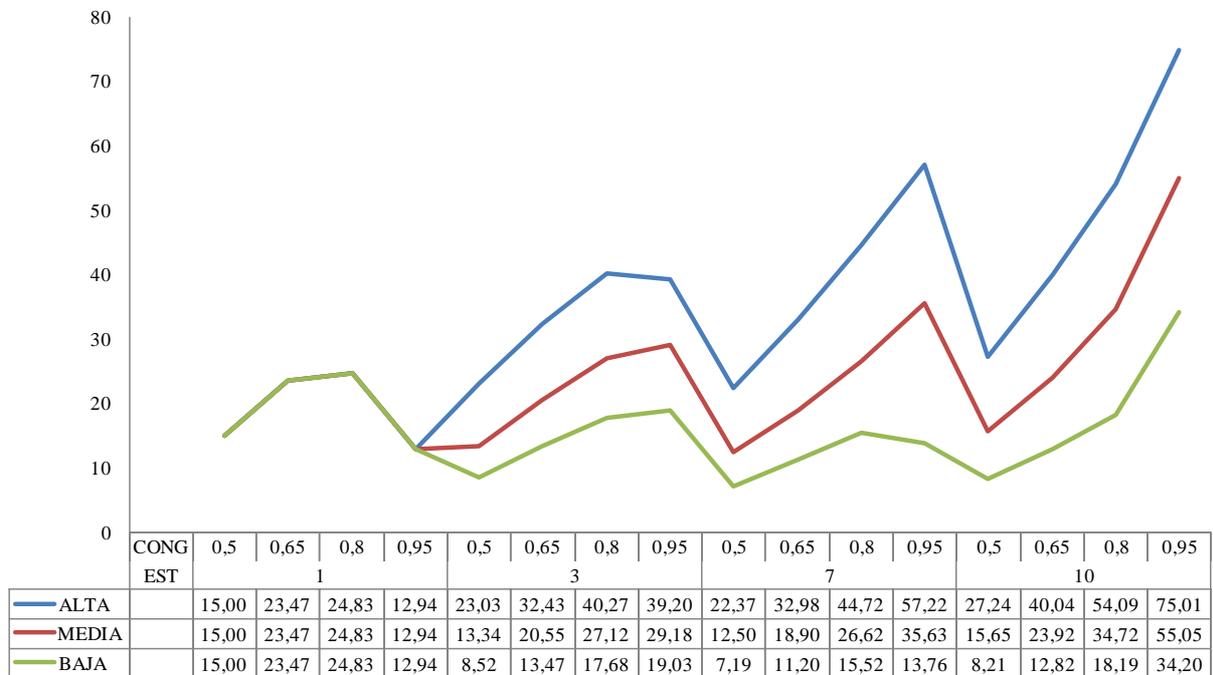


Figura 49. Evolución del error en el CT para sistemas de 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

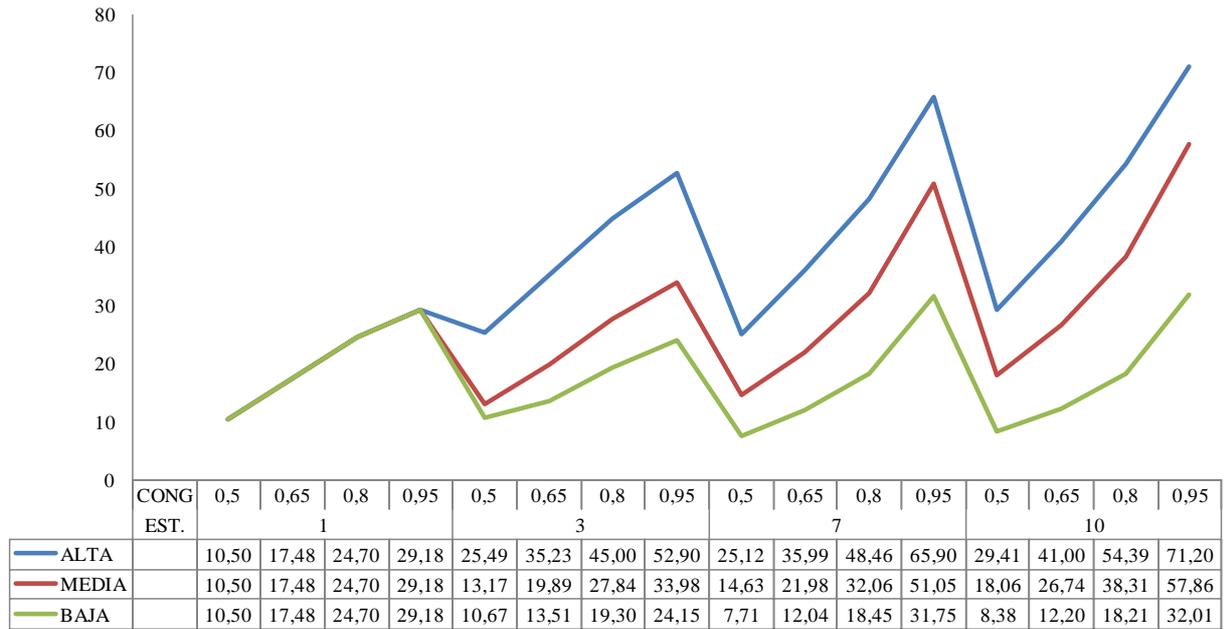


Figura 50. Evolución del error en el CT para sistemas de 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

En cuanto al tiempo de ciclo se observa un comportamiento regular del error, de nuevo siguiendo un patrón de dientes de sierra. Se observa que a mayor congestión del c.d.b peor es el funcionamiento de las ecuaciones, mayor la desviación con respecto al comportamiento real del sistema. Se cumple también que a mayor discrepancia entre estaciones mayor error (Gráfica “ALTA” la mayor).

Es curioso observar que cuanto mayor es el número de productos distintos a procesar mejores resultados en los errores obtenemos, mejor se comportan las ecuaciones. En general, el comportamiento que presenta el tiempo de ciclo es muy similar al del WIP.

6.2.3 Error en el tiempo de espera

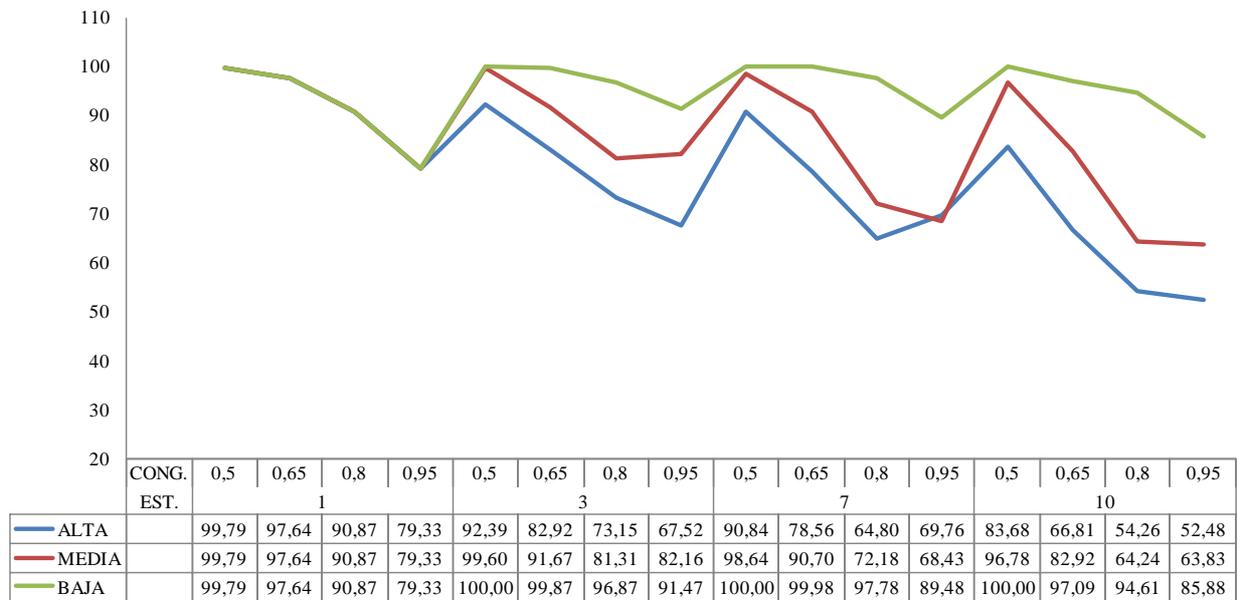


Figura 51. Evolución del error en el QT para sistemas de 1 producto [Fuente: Elaboración Propia]

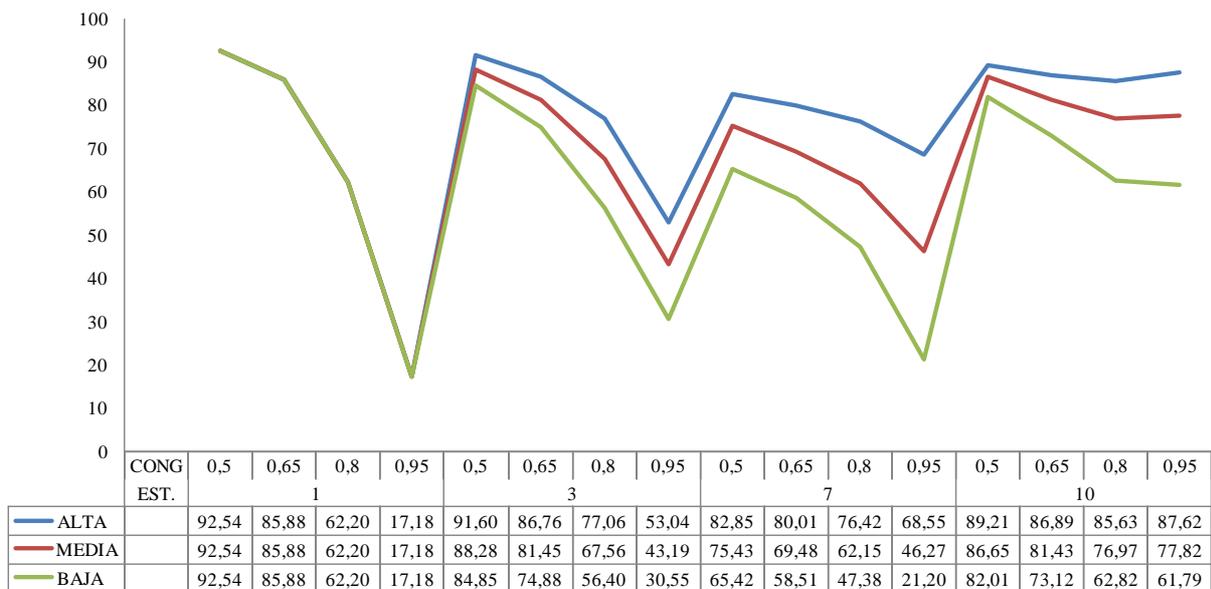


Figura 52. Evolución del error en el QT para sistemas de 3 productos [Fuente: Elaboración Propia]

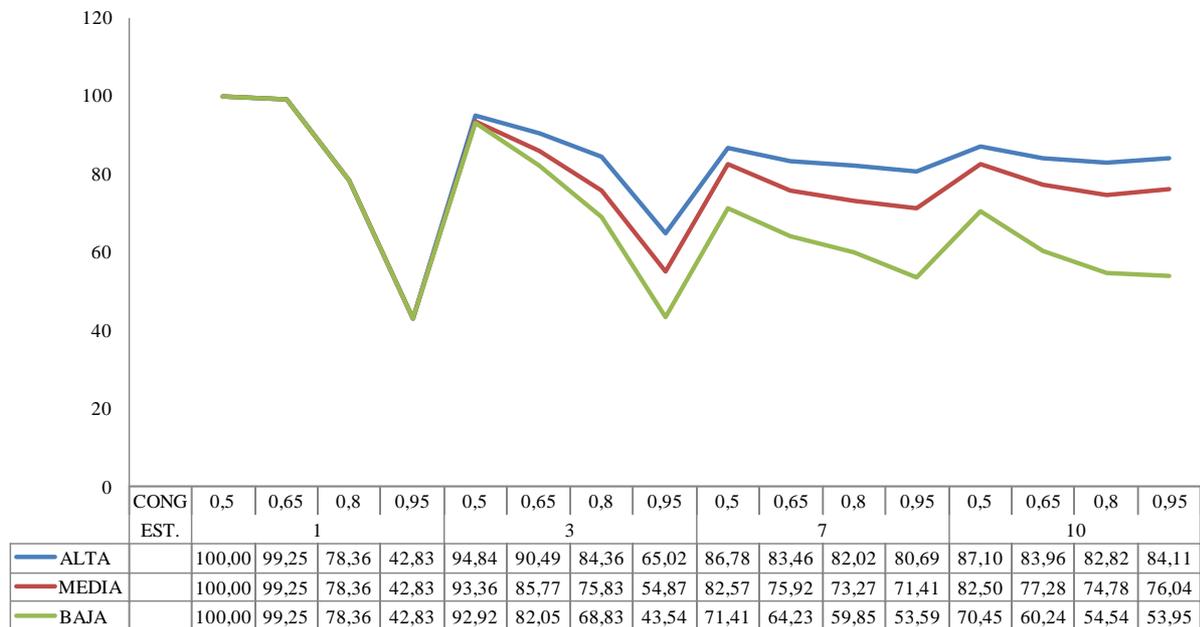


Figura 53. Evolución del error en el QT para sistemas de 5 productos [Fuente: Elaboración Propia]

Como se ha comentado en el subapartado 6.1.3, en el que se exponían los resultados de simulación para la variable tiempo de espera, los primeros valores se encontraban muy próximos a cero lo que provoca que los primeros errores alcancen valores del 100% o muy próximos, para las tres figuras de este subapartado.

Vemos que vuelve a presentarse ese patron d dientes de sierra, pero esta vez invertido con respecto a las gráficas anteriores. En esta ocasión los máximos se alcanzan a menores congestiones (50%) de la estación cuello de botella, produciéndose el mínimo error a mayores congestiones.

Observamos también que a medida que el sistema procesa más productos diferentes mejor es el comportamiento de las ecuaciones, menores son los errores. Además vemos como se suaviza la gráfica a medida que aumenta la variabilidad introducida por esta diversidad de productos.

6.3 Modelo Predictivo: Árboles de Decisión

En este subapartado se van a exponer y comentar los árboles de decisión resultado de los modelos predictivos de regresión desarrollados y presentados en el subapartado 4.6 ‘Aplicación de la Metodología, Modelos Predictivos’.

Los árboles de decisión son una técnica de aprendizaje supervisado que predice valores de respuesta mediante el aprendizaje de reglas de decisión dervidas de características. Funcionan al dividir el espacio de la característica en varias regiones rectangulares simples, mediante divisiones paraleleas. Para obtener una predicción para una observación particular, se utiliza la media o el modo en el que responden las observaciones de entrenamiento dentro de la partición a la que pertenece la nueva observación.

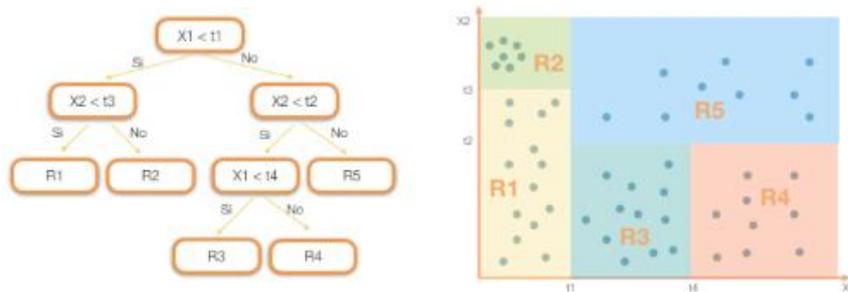


Figura 54. Ejemplo árbol de decisión [Fuente: Lidgieli 2019]

En el ejemplo de la figura anterior vemos como se producen las divisiones del espacio de respuestas con cada decisión que se toma acerca de las variables independientes. En nuestro modelo tendremos cinco variables independientes y una variable dependiente que sería el error. Nuestras variables independientes serían aquellos parámetros con los que hemos ido jugando y que han dado como resultado los modelos de simulación, han sido denominadas en el árbol de la siguiente manera:

- **X[0]:** Discrepancia entre las distintas máquinas. Al ser una variable de carácter cualitativo sea otorgado un valor numérico a cada posibilidad siendo de 3 para discrepancia ALTA, 2 para MEDIA y 1 para BAJA.
- **X[1]:** El número de productos que procesa el sistema.
- **X[2]:** El número de estaciones que posee la línea.
- **X[3]:** La congestión de la estación cuello de botella en tanto por 1.

El modelo devolverá el error cuadrático medio (mse) de las predicciones que ha hecho para el conjunto de observaciones de ese nodo, es decir lo buenas que han sido las predicciones, el número de muestras en ese espacio y el valor medio del error que presentan las ecuaciones de nuestro estudio para cada situación.

Veamos los árboles generados para el WIP y para los tiempos de ciclo y de espera.

6.3.1 Árbol de Decisión del WIP

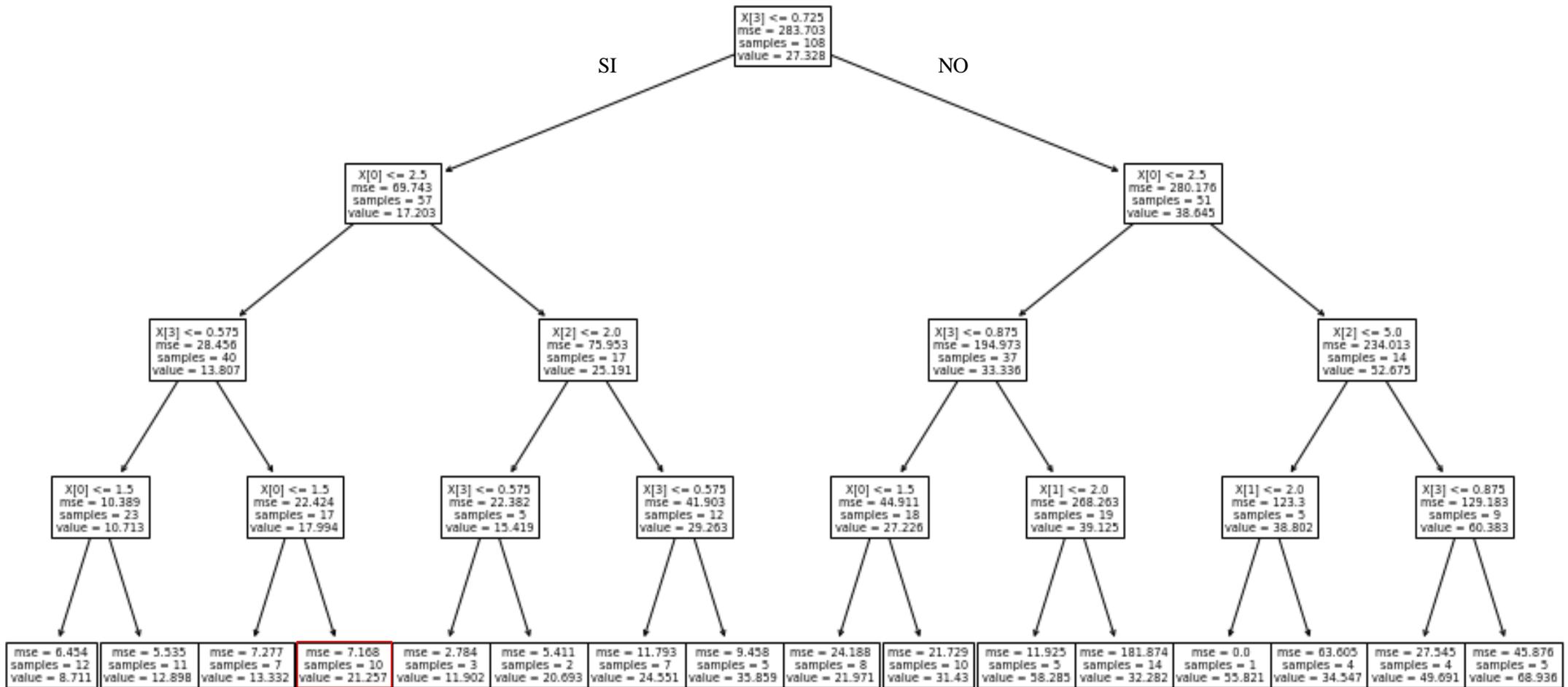


Figura 55. Árbol de Decisión del WIP [Fuente: Elaboración Propia]

6.3.2 Árbol de Decisión del CT

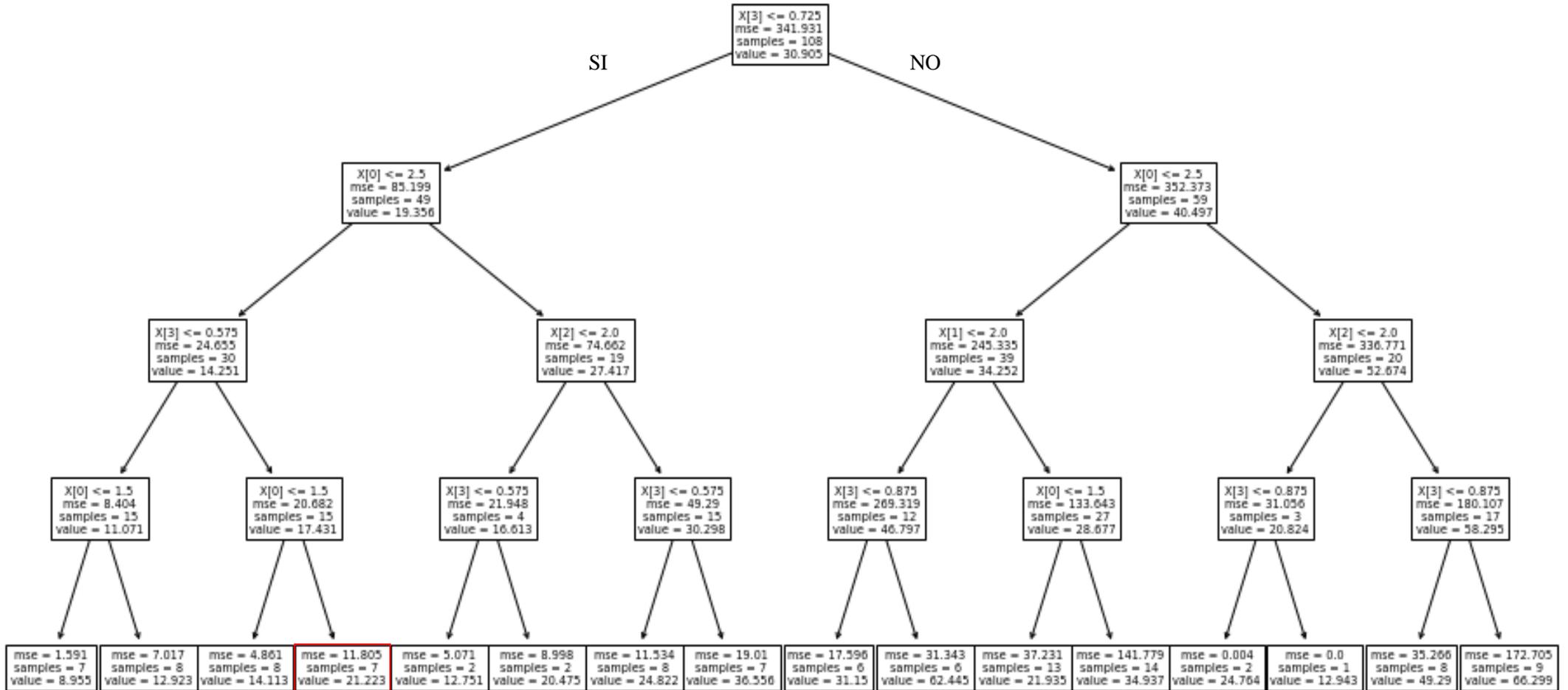


Figura 56. Árbol de Decisión del CT [Fuente: Elaboración Propia]

6.3.3 Árbol de Decisión del QT

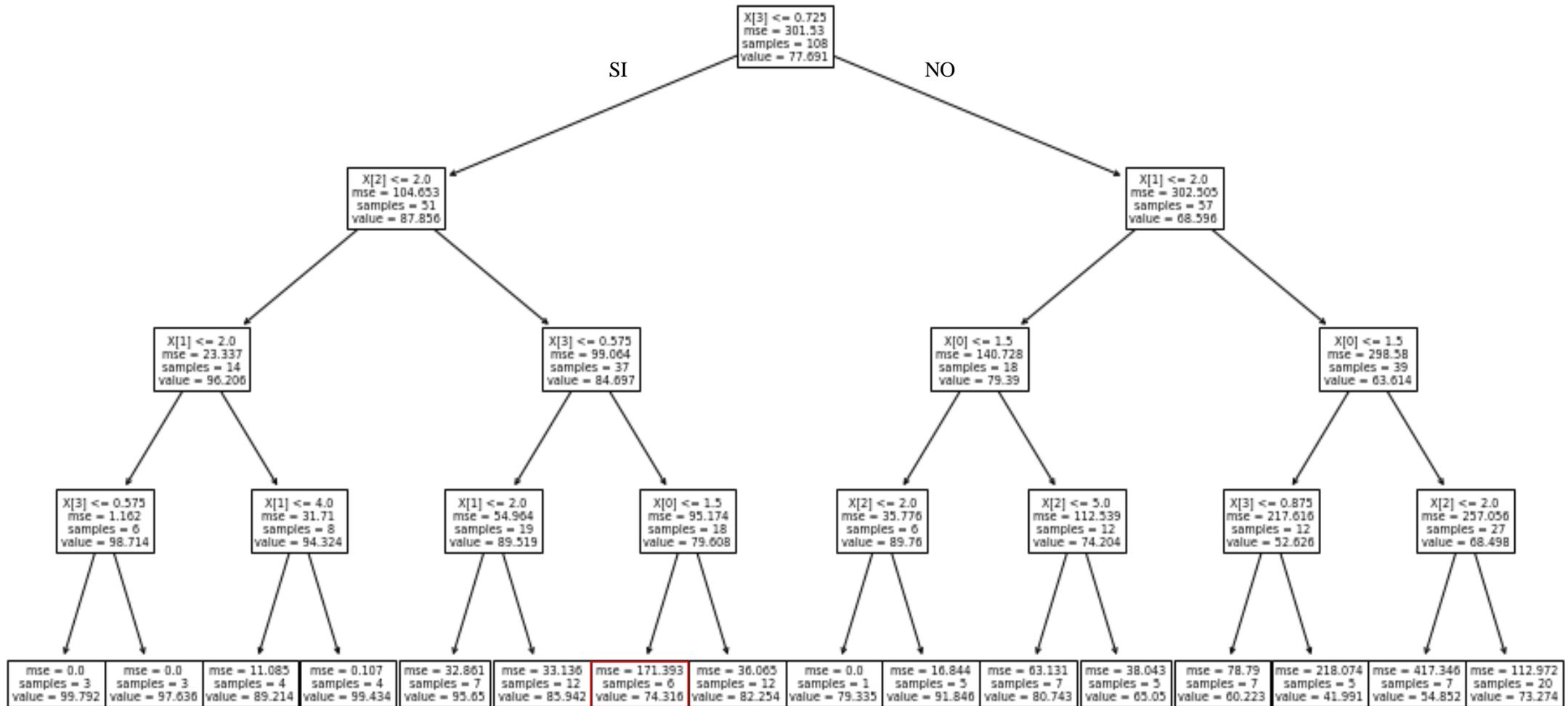


Figura 57. Árbol de Decisión del QT [Fuente: Elaboración Propia]

6.3.4 Comprobación Funcionamiento de los Modelos Predictivos

En este subapartado vamos a comprobar si esta herramienta verdaderamente es capaz de predecir el error que tendremos en los cálculos del WIP, de los tiempos de ciclo y de los tiempos de espera.

Para comprobar su eficacia se ha procedido a diseñar una nueva línea con parámetros de entrada aleatorios (número productos, estaciones, congestión de la estación cuello de botella y la discrepancia entre las distintas estaciones). Posteriormente se han obtenido los resultados de las variables de estudio, los resultados tanto de simulación como los analíticos, calculado su error y comparado este con el devuelto por el árbol correspondiente.

Nuestra línea de comprobación será de la siguiente forma:

- **Discrepancia entre las distintas estaciones: MEDIA.**

$$X[0] = 2$$

- **Número de productos distintos a procesar: 3**

$$X[1] = 3$$

- **Número de estaciones en serie: 6**

$$X[2] = 6$$

- **Congestión de la estación cuello de botella: 72,5%**

$$X[3] = 0.725$$

Si recorremos la rama correspondiente, según los valores de $X[i]$, en cada uno de los árboles llegamos hasta la hoja final en la que observamos las estimaciones en los errores hechas por el modelo para nuestra nueva línea de ejemplo. Veamos los resultados obtenidos y sus errores asociados recogidos en una tabla.

	WIP	QT (s)	CT (s)	Uds. Producidas
Resultados de Simulación	4,0376	2,8991	18,5638	3915
Resultados Analíticos	5,2757	8,5893	24,2559	-
Error (%)	23,4680	66,2475	23,4669	-
Error estimado (%)	21,257	74,316	21,223	-

Figura 58. Resultados del Modelo de Comprobación [Fuente: Elaboración Propia]

Es apreciable que las aproximaciones son bastante acertadas, reparemos en que en cada hoja del árbol de decisión se muestra el error cuadrático medio de las aproximaciones siendo para nuestro modelo de 7,168; 171,393 y 11,805 respectivamente, habiendo nosotros obtenido unos errores cuadráticos de: 4,89; 65,1 y 10,523.

CONCLUSIONES

Del análisis expuesto, además de las conclusiones más específicas que se han ido comentando en cada subapartado, vamos a exponer otras de carácter más general.

En primer lugar, observando las gráficas de evolución de los errores tanto para el WIP como para los tiempos de espera y de ciclo, concluimos que siempre son mayores cuanto mayor es la diferencia entre los coeficiente de variación de las máquinas de las distintas estaciones, lo que venimos denominando durante todo el estudio 'discrepancia' entre máquinas.

Observamos también que los errores aumentan con la congestión de la estación cuello de botella. Esta característica y la anterior se deben al efecto de la variabilidad, concluimos entonces que por simple que sea nuestro sistema (pocas estaciones, pocos productos distintos a procesar, etc), las ecuaciones funcionan peor cuando la variabilidad aumenta.

Otro patrón que podemos apreciar si observamos las gráficas anteriores en conjunto es que a medida que procesamos más productos obtenemos unos resultados analíticos más veraces. Esto puede parecer contradictorio, pues hemos visto que la variabilidad es el principal enemigo de nuestras ecuaciones, pero este curioso efecto puede deberse a que en sistemas complejos los picos de variabilidad se absorben mejor debido a que se manejan grandes tiempos y una discrepancia entre tiempos de procesos de escasos segundos se ve camuflada y no provoca un gran impacto en el tiempo total, en cambio en un sistema más sencillo cualquier discrepancia quedaría más patente y puede provocar graves errores en los cálculos.

REFERENCIAS

- Allende, O., H. (2000). *Introducción al Software de Simulación Arena*. Dept. de Informática, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Arias Coello, A. (2008). *La gestión de los procesos. Los procesos como actividad de valor en las organizaciones*. Unidad didáctica, 3.
- Azarang Esfandiari, M. R. (1996). *Simulación y análisis de modelos estocásticos*.
- Banks J., Carson J.S., Nelson B.L. (1996). *Discrete-Event System Simulation*. Second Edition, Prentice-Hall, New Jersey.
- Bradley, A. (2007). *OptQuest for Arena User's Guide*. RS Inc., Ed., Ed.
- Campos, E. B. (2009). *Introducción a la organización de empresas*. Universidad a Distancia de Madrid.
- Chase, R., Jacobs, R., & Aquilano, N. (2009). *Administración de Operaciones*, duodécima edición.
- De la Fuente García, D., & Quesada, I. F. (2005). *Distribución en planta*. Universidad de Oviedo.
- Drezner, Z. (1995), *Diseño de Sistemas Productivos y Logísticos*. Departamento de Organización de Empresas, E.F. y C. Curso 04 / 05. (Drezner, 1995)
- Espinoza, D. (2013). *Tipos de procesos productivos*.
- Eumekian, M. (2009). *Simulación en Arena de un problema de colas en un aeropuerto*. Departamento de Investigaciones Facultad de Tecnología Informática de la Universidad de Belgrano, Buenos Aires
- Fajardo, C. E. M. (1995). *Del concepto de productividad en el management clásico al concepto de eficacia en el management contemporáneo*. Innovar, (6), 66-79.
- Fernández, I., & De la Fuente, D. (2005). *Distribución de planta*. Universidad de Oviedo.
- Forte, J. F. (2005) *Guía práctica para la simulación de procesos industriales*-Cetem.
- Framiñán, J. M. (2018). *Introducción al diseño de procesos: Principios generales*. Tema 2 Apuntes Diseño de Procesos, Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I, Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Framiñán, J. M. (2018). *Análisis de una estación productiva*. Tema 3 Apuntes Diseño de Procesos, Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I, Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Framiñán, J. M. (2018). *Tipología de procesos*. Tema 5 Apuntes Diseño de Procesos, Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I, Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- García A., Ortega M. (2006). *Introducción a la Simulación de Sistemas Discretos*.
- Gómez C. (2012). *Resumen Capítulos 1- 4 del libro Simulación con Software Arena de Kelton Sadowski y Sturrock*.
- Gómez Rojo, B. (2006). *Sistemas con Logística de Retorno: aplicación al caso de contenedores retornables*. Departamento de Organización Industrial y Gestión de empresas. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, España.
- Heizer, J., Render, B., Parra J. L. M. (2015). *Dirección de la producción y de operaciones: decisiones tácticas*. Pearson educación.
- Iso, E. N. (2005). 9000: 2005. *Quality management systems-Fundamentals and vocabulary (ISO 9000: 2005)*, 1.

- Kelton, W., D., Sadowski, R., P., Sturrock, D. T. (2008). *Simulación con Software Arena*. 4^a Edición, Ed. McGraw-Hill, España.
- Kingman, J. F. C. (1961) *The single server queue in heavy traffic*. Proc. Camb. Phil. Soc. 57, 902–904
- Köllerström, J. (1979). *Heavy traffic theory for queues with several servers. II*. *Journal of Applied Probability*, 16(2), 393-401.
- Luengo, E. I. J. (2010). *Análisis de los sistemas de control de la producción Kanban y Conwip bajo escenarios de reprocesado*.
- Piera, M. À. (2004). *Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Ramírez, F., Seco, A., & Cobo, E. P. (2011). *New values for twenty-first century engineering*. *Journal of Professional Issues in Engineering Education & Practice*, 137(4), 211-214.
- Richar M. (1981). *Distribución en Planta*.
- Rincón, L. (2012). *Introducción a los procesos estocásticos*. UNAM, Facultad de Ciencias.
- Shannon, R.E. (1988). *Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación*. Trillas, México
- Torrents, A. S., Vilda, F. G., & Postils, I. A. (2010). *Manual práctico de diseño de sistemas productivos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Torres, P. (2013). *Simulación de Sistemas con el Software Arena*, Lima, Perú: Universidad de Lima Fondo Editorial.