

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Construcción y análisis del modelo de un sistema de producción con tecnología LEGO MINDSTORMS EV3: Evaluación del sistema

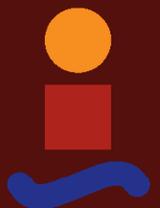
Autor: Juan José Rodríguez Albalá

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

**Construcción y análisis del modelo de un sistema de
producción con tecnología LEGO MINDSTORMS
EV3: Evaluación del sistema**

Autor:

Juan José Rodríguez Albalá

Tutor:

José Manuel Framiñán Torres

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Construcción y análisis del modelo de un sistema de producción con tecnología LEGO
MINDSTORMS EV3: Evaluación del sistema

Autor: Juan José Rodríguez Albalá

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:

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

A mi familia, amigos y todo el que me ha acompañado en este camino. Gracias por apoyarme durante todo este tiempo.

Juan José Rodríguez Albalá

Sevilla, 2024

Resumen

En este trabajo de fin de grado se lleva a cabo la validación del modelo de un sistema de producción a través de la teoría de Diseño de Procesos. Para realizar esta validación se planteará un estudio donde se han impuesto 3 tasas de producción distintas. Cada tasa mencionada, a su vez, cuenta con 3 escenarios diferentes para el estudio que hacen referencia a los distintos tiempos de servicio impuestos en las estaciones de procesado del sistema para así enriquecer los casos de estudio planteados en base a dichas tasas de producción. Para el citado estudio, se ha construido y automatizado un modelo del sistema a través de la tecnología LEGO®, su expansión LEGO® Mindstorm® EV3 (más enfocada en el control del mismo) y en un proceso de automatización con distintos softwares compatibles. Este proceso descrito, el cual es necesario para el estudio a realizar, se detalla en el documento complementario a este y es de gran importancia entender que supondrá la base de la toma de datos de nuestro futuro análisis. Para ello, a lo largo del documento, se presentarán los conceptos básicos de teoría de Diseño de Procesos, se planteará el método de resolución escogido y se llevará a cabo un estudio, tanto teórico como experimental, de cada uno de los 3 escenarios respecto a cada tasa de producción propuesta a través del cálculo de las variables de estado del sistema. Después, se realizará un análisis a cada una de las tasas de producción en el cual se discutirá las desviaciones existentes en los 3 escenarios, comparando el valor experimental con el valor del modelo teórico de cada una de las variables de estado del sistema. Gracias a este análisis, se llegará a una conclusión en la cual se compararán las variables del sistema condicionada por cada tasa de producción y también se analizará el comportamiento de los escenarios de forma independiente. Además, se realizará un estudio sobre los fallos producidos por la tecnología LEGO® Mindstorm® EV3 comentada, el cual desembocará en otro análisis donde recabaremos los fallos ocasionados por la tecnología usada y cómo estos afectan al comportamiento del sistema. Tras la realización de estos análisis y estudios, discutiremos sobre la validez del modelo propuesto en base a la comparativa descrita.

Índice

Agradecimientos	19
Resumen	21
Índice	22
Índice de Tablas.....	25
Índice de Figuras	26
Índice de Ecuaciones	28
1 introducción y objetivos.....	30
1.1 OBJETIVOS.....	30
1.2 ESTRUCTURA	31
2 Introducción al Diseño de Procesos	33
2.1 DEFINICIÓN DE PROCESO	33
2.2 TRANSPORTE	33
2.3 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN	34
2.4 VARIABLES Y ECUACIONES DE DISEÑO DE PROCESOS.....	35
2.4.1 VARIABLES Y ECUACIONES PARA UN PRODUCTO EN UNA ESTACIÓN.....	35
2.4.2 VARIABLES Y ECUACIONES PARA DIFERENTES PRODUCTOS EN UNA ESTACIÓN	35
2.4.3 VARIABLES Y ECUACIONES SOBRE LOS TIPOS DE TRANSPORTE.....	37
2.4.4 VARIABLES Y ECUACIONES SOBRE EL CONCEPTO DE CONGESTIÓN	39
2.4.5 VARIABLES Y ECUACIONES DE ESTADO PARA CADA ESTACIÓN	40
2.4.6 VARIABLES Y ECUACIONES DE ESTADO DEL SISTEMA.....	40
2.4.7 ECUACIONES ADICIONALES	41
3 Tasas de producción y Escenarios	43
3.1 TASAS DE PRODUCCIÓN	43
3.2 ESCENARIOS.....	43
3.3 DATOS DE ESTUDIO.....	44
3.3.1 TEOREMA CENTRAL DEL LÍMITE.....	44
4 Descripción del problema	45
4.1 MODELO 1.....	45
4.2 MODELO 2.....	46
5 Tasas de producción y Escenarios implementados en el estudio	50
5.1 TASAS DE PRODUCCIÓN	50
5.2 ESCENARIOS.....	50
6 Método de Resolución	52
6.1 DEFINICIÓN DE TIEMPOS DE SERVICIO.....	52
6.2 TIEMPOS DE TRANSPORTE	52
6.3 TIEMPOS DE PROCESADO Y VARIABILIDAD ASOCIADA.....	53
6.4 ANÁLISIS DEL MODELO 1	55
6.5 ANÁLISIS DEL MODELO 2	55

6.6	ANÁLISIS MODELO-EXPERIMENTACIÓN EN CADA ESTACIÓN REFERENTES A LOS ESCENARIOS DE CADA TASA DE PRODUCCIÓN	56
6.7	ANÁLISIS MODELO-EXPERIMENTACIÓN EN EL SISTEMA REFERENTE A LOS ESCENARIOS DE CADA TASA DE PRODUCCIÓN.....	58
7	Estudio y análisis de las tasas de producción	60
7.1	ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FIJAS DEL MODELO 1	60
7.1.1	TASA DE PRODUCCIÓN 1: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA	61
7.1.1.1	ESCENARIO 1	61
7.1.1.2	ESCENARIO 2	62
7.1.1.3	ESCENARIO 3	62
7.1.2	CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DEL MODELO 1	63
7.2	ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FIJAS DEL MODELO 2	64
7.2.1	TASA DE PRODUCCIÓN 1: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA	65
7.2.1.1	ESCENARIO 1	66
7.2.1.2	ESCENARIO 2	67
7.2.1.3	ESCENARIO 3	69
7.2.1.4	CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 1	70
7.2.2	TASA DE PRODUCCIÓN 2: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA	71
7.2.2.1	ESCENARIO 1	71
7.2.2.2	ESCENARIO 2	73
7.2.2.3	ESCENARIO 3	74
7.2.2.4	CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 2	76
7.2.3	TASA DE PRODUCCIÓN 3: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA	77
7.2.3.1	ANÁLISIS DE LOS 3 ESCENARIOS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 3	77
7.2.3.2	CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 3	79
7.3	CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LAS TASAS DE PRODUCCIÓN	79
7.4	ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA	81
8	Conclusión	83
	Bibliografía.....	84
	Referencias	85
	ANEXO	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1-Tiempo promedio de las estaciones de transporte para piezas PNF	53
Tabla 6.2- Tiempo promedio, desviación típica y variabilidad de las estaciones de transporte para piezas PF	53
Tabla 6.3-Rango de valores de los tiempos de servicio de servicio y desviación típica de las estaciones de procesado para el escenario 3.	54
Tabla 6.4-Tiempo y variabilidad de servicio de las estaciones de procesado para los 3 escenarios para un tipo de pieza	54
Tabla 6.5-Tiempo y variabilidad de servicio de las estaciones de procesado para los 3 escenarios para dos tipos de pieza	54
Tabla 6.6-Fracción según el tipo de pieza PF y PNF	56
Tabla 7.1-Cálculo de variables modelo 1 escenario 1 tasa de producción 1	61
Tabla 7.2-Cálculo de variables de sistema modelo 1 escenario 1 tasa de producción 1	61
Tabla 7.3-Cálculo de variables del modelo 1 escenario 2 tasa de producción 1	62
Tabla 7.4- Cálculo de variables de sistema modelo 1 escenario 2 tasa de producción 1	62
Tabla 7.5- Cálculo de variables modelo 1 escenario 3 tasa de producción 1	62
Tabla 7.6- Cálculo de variables de sistema modelo 1 escenario 3 tasa de producción 1	62
Tabla 7.7- Cálculo de variables modelo 2 escenario 1 tasa de producción 1	66
Tabla 7.8- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 1 tasa de producción 1	66
Tabla 7.9 Cálculo de variables modelo 2 escenario 2 tasa de producción 1	67
Tabla 7.10 Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 2 tasa de producción 1	68
Tabla 7.11- Cálculo de variables modelo 2 escenario 3 tasa de producción 1	69
Tabla 7.12 Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 3 tasa de producción 1	69
Tabla 7.13- Cálculo de variables modelo 2 escenario 1 tasa de producción 2	71
Tabla 7.14- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 1 tasa de producción 2	72
Tabla 7.15- Cálculo de variables modelo 2 escenario 2 tasa de producción 2	73
Tabla 7.16- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 2 tasa de producción 2	73
Tabla 7.17- Cálculo de variables modelo 2 escenario 3 tasa de producción 2	74
Tabla 7.18- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 3 tasa de producción 2	75
Tabla 7.19- Cálculo de variable tasa de salida del modelo 2 tasa de producción 3	78
Tabla 7.20- Porcentaje de desviación de variables del sistema para tasas de producción 1, 2 y 3	79
Tabla 7.21- Porcentaje de piezas reprocesadas y piezas no reprocesadas	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Sistema de producción I (Chamorro Domínguez, 2024)	30
Figura 2.1-Sistema Productivo (Tawfik, 1984)	34
Figura 2.2 Variables de una estación (Framiñán, 2023)	36
Figura 2.3-Tansporte tipo Serial (Framiñán, 2023)	37
Figura 2.4-Tansporte tipo Split (Framiñán, 2023)	38
Figura 2.5-Tansporte tipo Join (Framiñán, 2023)	38
Figura 4.1- Sistema de producción con estaciones de procesado	45
Figura 4.2 Modelo 1 del Sistema de producción (Chamorro Domínguez, 2024)	46
Figura 4.3 Modelo 2 del Sistema de producción (Chamorro Domínguez, 2024)	47
Figura 4.4 Sistema de producción II (Chamorro Domínguez, 2024)	48
Figura 6.1. Ejemplo de tabla con celda $\theta_a(E1)$	57
Figura 6.2. Ejemplo de tabla con celda $\theta_a(T1)$	57
Figura 7.1-Tiempo de ciclo del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 1	63
Figura 7.2-Tiempo de ciclo del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 1	63
Figura 7.3-Tiempo de ciclo del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 1	63
Figura 7.4-Tiempo de ciclo del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 2	67
Figura 7.5-Inventario medio en proceso del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 2	67
Figura 7.6-Tasa de salida del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 2	67
Figura 7.7-Tiempo de ciclo del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 2	68
Figura 7.8-Inventario medio en proceso del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 2	68
Figura 7.9-Tasa de salida del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 2	68
Figura 7.10-Tiempo de ciclo del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 2	70
Figura 7.11-Inventario medio del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 2	70
Figura 7.12-Tasa de salida del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 2	70
Figura 7.13-Tiempo de ciclo del escenario 1 de tasa de producción 2 del modelo 2	72
Figura 7.14-Inventario medio en proceso del escenario 1 de tasa de producción 2 del modelo 2	72
Figura 7.15-Tasa de salida del escenario 1 de tasa de producción 2 del modelo 2	72
Figura 7.16-Tiempo de ciclo del escenario 2 de tasa de producción 2 del modelo 2	74
Figura 7.17-Inventario medio del escenario 2 de tasa de producción 2 del modelo 2	74
Figura 7.18-Tasa de salida del escenario 2 de tasa de producción 2 del modelo 2	74
Figura 7.19-Tiempo de ciclo del escenario 3 de tasa de producción 2 del modelo 2	75
Figura 7.20-Inventario medio en proceso del escenario 3 de tasa de producción 2 del modelo 2	75
Figura 7.21-Tasa de salida del escenario 3 de tasa de producción 2 del modelo 2	75
Figura 7.22-Gráfica tiempo de ciclo de muestras de 3 escenarios de tasa de producción 3 modelo 2	77

Figura 7.23-Gráfica de tasa de salida de los 3 escenarios de tasa de producción 3 modelo 2	78
Figura 7.24-Nº fallos total del sistema	81

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 (Framiñan, 2023)	35
Ecuación 2.2 (Framiñan, 2023)	36
Ecuación 2.3 (Framiñan, 2023)	36
Ecuación 2.4 (Framiñan, 2023)	36
Ecuación 2.5 (Framiñan, 2023)	36
Ecuación 2.6 (Framiñan, 2023)	37
Ecuación 2.7 (Framiñan, 2023)	37
Ecuación 2.8 (Framiñan, 2023)	37
Ecuación 2.9 (Framiñan, 2023)	38
Ecuación 2.10 (Framiñan, 2023)	38
Ecuación 2.11 (Framiñan, 2023)	38
Ecuación 2.12 (Framiñan, 2023)	39
Ecuación 2.13 (Framiñan, 2023)	39
Ecuación 2.14 (Framiñan, 2023)	39
Ecuación 2.15 (Framiñan, 2023)	40
Ecuación 2.16 (Framiñan, 2023)	40
Ecuación 2.17 (Framiñan, 2023)	40
Ecuación 2.18 (Framiñan, 2023)	40
Ecuación 2.19 (Framiñan, 2023)	41
Ecuación 2.20 (Framiñan, 2023)	41
Ecuación 2.21 (Framiñan, 2023)	41
Ecuación 2.22 (Framiñan, 2023)	41
Ecuación 2.23 (Framiñan, 2023)	41
Ecuación 2.24 (Framiñan, 2023)	42
Ecuación 2.25 (Framiñan, 2023)	42
Ecuación 2.26 (Framiñan, 2023)	42
Ecuación 2.27 (Krishnamoorthy, 2006)	42

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Podemos entender como proceso productivo al grupo de actividades coordinadas y sucesivas que tienen como fin el desarrollo planificado de productos y servicios. Esta planificación y la forma de realizarla, requiere de un análisis inicial de la tecnología necesaria para llevarlo a cabo en base a unos objetivos marcados para la adecuación de la misma. Este tipo de estudio a realizar se lleva a cabo en base a unas directrices marcadas por el diseño de procesos y junto con el uso de modelos de los propios sistemas en sí, los cuales ayudan tanto a la comprensión de los procesos planteado como al análisis del mismo.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo de fin de grado es, a grandes rasgos, el análisis del modelo de un sistema de producción, construido gracias a un trabajo fin de grado complementario realizado por Antonio Miguel Chamorro Domínguez, a través de la comparativa del análisis teórico de este frente al reflejado en la experimentación del sistema real. Dicho sistema, se puede observar en la figura 1.1.

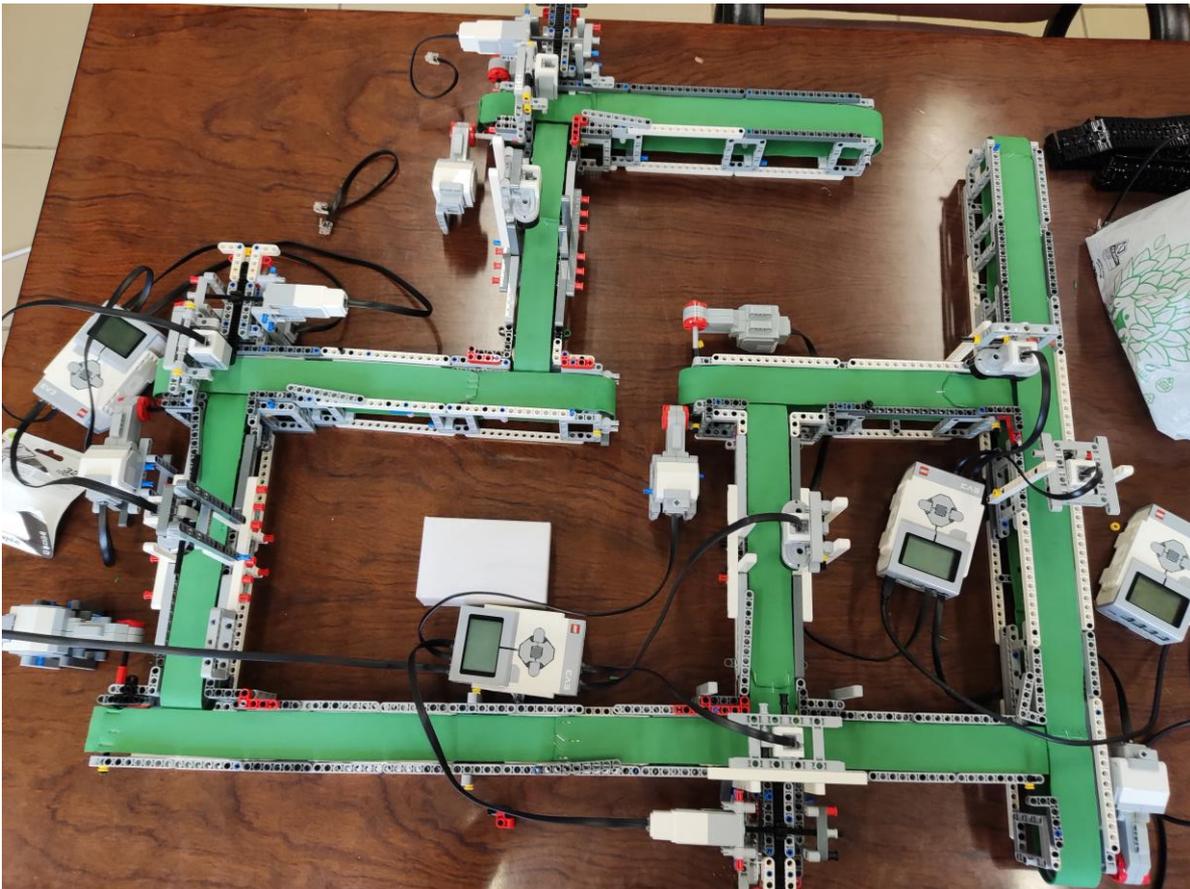


Figura 1.1 Sistema de producción I (Chamorro Domínguez, 2024)

Este modelo pretende emular el comportamiento del sistema de producción real, en base a unas características inherentes a él, a través de una serie de variables de estado definidas por la Teoría de Diseño, teoría que quedará reflejada en el apartado 2. Para ello, se imponen una serie de casuísticas con el objetivo de comprobar como dichas casuísticas afectan al modelo y al sistema real, con el objetivo de comprobar la relación de veracidad

entre ambos.

Para el análisis comentado, se han planteado 3 tasas de producción distintas, las cuales se basan en la toma de decisiones respecto al ritmo de entrada de piezas a nuestro sistema productivo y que, a su vez, estudiaremos en base a 3 escenarios distintos. Estos escenarios se basarán en determinar distintas situaciones en referencia al comportamiento propio de cada máquina o puesto de trabajo que compone este sistema. Así, propondremos escenarios que se diferencien entre sí por la forma en que emularemos los tiempos de proceso de estas máquinas para enriquecer la toma de datos y que nos servirá para la ya comentada comprobación del comportamiento de este modelo respecto al sistema real.

Para la verificación deseada del comportamiento del modelo se ha realizado, como ya hemos adelantado, un estudio teórico de cada escenario respecto a cada una de las tasas de producción, a través de las variables de estados que gobiernan al sistema para su posterior comparativa con los casos reales pertinentes. Para ello, se ha realizado una toma de datos para el análisis en referencia al comportamiento real y según las condiciones marcadas igualmente por estas tasas de producción y escenarios comentados. Por último, y gracias a todo lo expresado, habremos obtenido muestras y resultados suficientes para iniciar la comparativa propuesta.

Paralelamente a la toma de datos necesaria para la evaluación del diseño que acabamos de comentar, se realiza otro tipo de estudio basado en los fallos originados por la tecnología que se ha usado para la reproducción del modelo. Este es también otro punto crucial a tener en cuenta, pues el estudio de los primeros datos, los cuales hacían referencia al diseño y al comportamiento del modelo, se ven estrechamente condicionados por los posibles fallos derivados de la tecnología y, por lo tanto, existe una fuerte correlación entre ambos análisis a modelar.

En base, a los estudios que hemos realizado paralelamente y a la correlación existente entre ambos tipos de estudio, llegaremos a discernir sobre la validez del uso de este tipo de modelos en base a la tecnología propuesta para futuras líneas de investigación de este tipo de sistemas de producción.

1.2 ESTRUCTURA

El presente documento está compuesto por 8 capítulos que, de una forma general, dividimos en dos grandes boques. El primero de ellos en el cual se recoge la teoría base del estudio a realizar y el segundo de ellos, donde esta teoría comentada se ve aplicada sobre una toma de datos recogida en base al funcionamiento del modelo ya comentado.

Si expandimos esta composición presentada, en el primer capítulo de este documento, se realiza una introducción del problema que tratamos, una descripción del objetivo del estudio en relación a este y se comenta la estructura que sigue el documento.

En el segundo capítulo se explican los conceptos de procesos y sistema de producción junto con sus elementos principales, seguido de una explicación de los tipos de transportes que existen. Además, se muestran las variables y ecuaciones que se utilizarán para la realización del estudio.

El tercer capítulo comienza con una introducción la cual hace referencia a la tasa de producción y a los escenarios propuestos ya comentados. A continuación, en este mismo capítulo, se profundiza sobre los conceptos teóricos de estos y sobre el concepto de datos de estudio.

En el siguiente capítulo se llevará a cabo la descripción de nuestro problema. A lo largo de este capítulo, se realiza una descripción de cómo a partir de un modelo 1 hemos llegado a un modelo 2 final totalmente diferente. Se describirán las estaciones que gobiernan nuestro modelo y, además, se comentarán las dificultades y limitaciones encontradas durante el transcurso del estudio que nos acontece.

En el quinto capítulo se detallarán las diferentes tasas de producción y el modo de definir las junto con la explicación del origen de los escenarios, ya comentados, propuestos para el estudio y los valores que usamos para la definición de estos.

El sexto capítulo comienza con la definición de los tiempos de servicios que usamos en las estaciones de nuestro modelo y, la presentación cuantitativa de estos tiempos y de sus variabilidades, diferenciados en estos casos como tiempos de transporte o tiempos de procesado dependiendo de la estación a la que se refiera. Además, se describirá el método usado para la realización del análisis de las características fijas para cada uno de los modelos comentando las ecuaciones usadas para calcular las variables intrínsecas de estos. Después, se describirá el

procedimiento que llevaremos a cabo para la realización del estudio teórico referente para cada uno de los escenarios y el posterior cálculo de las variables de estado del sistema, las cuales serán las usadas para la comparación con la experimentación.

El séptimo capítulo de este documento se va a llevar a cabo la implementación de los métodos explicados en el punto anterior. En primer lugar, se realiza el estudio del modelo en base a las características intrínsecas de nuestro sistema. Este estudio guarda relación con la decisión tomada a la hora de argumentar cada una de las tasas de producción. Tras esto, se realiza la implementación del siguiente método, con la presentación de las tasas de producción y de los datos del estudio teórico de los escenarios de cada una de ellas. A continuación de cada caso de estudio teórico, se presentará un resumen de los datos a comparar, obtenidos a partir de la toma de datos del funcionamiento real del modelo, respecto a cada escenario. Además, al final de cada tasa de producción se expondrán las conclusiones sacadas tras el análisis de esta. Una vez que queden expuestos estos análisis, se llevará a cabo una conclusión sobre el comportamiento del modelo, a nivel global, frente al sistema real a través de las variables de estado. Como ya comentamos, de forma paralela a la toma de datos aquí resumida, se recogieron los datos propios de los fallos tecnológicos asociados a estas variables medidas y, como ya adelantamos, serán a su vez analizados para la correcta validación del modelo en base a la correlación existente con la toma de datos ejecutada y ya analizada.

Finalmente, en el octavo capítulo, se exponen las conclusiones obtenidas de ambos estudios propuestos para la discusión acerca del objetivo principal de nuestro problema, el cual se trataba de la validación del uso de este tipo de modelos y su tecnología para estudios de sistemas de producción reales. Además, se aportarán ideas para futuras líneas de estudio.

2 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE PROCESOS

El presente capítulo pretende dar a conocer, a través de un marco teórico, el concepto de proceso y de sistema de producción junto a los elementos que lo conforman, seguido de una explicación sobre los transportes existentes entre estaciones y las ecuaciones a utilizar para determinar el comportamiento del sistema.

Esta idea, que enlaza con el documento complementario a este, nos da paso al estudio del modelo propuesto que recrea el ya citado sistema de producción, correspondiente a la figura 1.1. Ahondaremos así en la validez del modelo respecto al sistema real a partir de las decisiones tomadas para la reproducción del mismo y, a través de la teoría expuesta en este capítulo. Para ello, haremos uso de unas variables características y unas ecuaciones que se definirían en los apartados siguientes, y que calcularemos para llevar a cabo esta comparativa, en cada uno de los distintos casos de estudio propuestos, frente a la experimentación.

2.1 DEFINICIÓN DE PROCESO

Haciendo referencia a la Norma ISO 9000:2000, “*un proceso es un conjunto de actividades interrelacionadas que interactúan entre sí convirtiendo las entradas (inputs) en salidas (outputs)*.”

Según Framiñán (2023), las características más destacadas que definen un proceso son:

- **Estocástico:** Ya que no es posible conocer a priori el comportamiento del proceso, además hay numerosos factores que le confieren esta característica tales como los humanos, fallos en la maquinaria, falta de datos.
- **Dinámico:** Ya que el comportamiento cambia a lo largo del tiempo.
- **Complejidad:** Habitualmente un proceso se compone de múltiples subprocesos interdependientes.
- **Discreto:** Dado que, en un instante de tiempo, se procesa un número entero de unidades.

2.2 TRANSPORTE

El concepto de transporte en sí mismo “*se trata del desplazamiento de un elemento desde un lugar de origen (en el que se carga la mercancía) hacia un destino (en el que se descarga)*”. Dependiendo de las características que presente un sistema distinguiremos dos tipos de transporte:

1. **Transporte instantáneo:** Las unidades de flujo pasan de una estación a otra en tiempo despreciable. No obstante, las características del transporte pueden modificar los tiempos entre llegadas y la variabilidad.
2. **Transporte no instantáneo:** Las unidades de flujo pasan de una estación a otra en un tiempo no despreciable. En general, el transporte no instantáneo se modela como una estación más de proceso, ya que conocemos el tiempo medio de transporte y la varianza de dicho tiempo.

Según la disposición de las estaciones y los diferentes caminos que pueda seguir la unidad de flujo a través de las mismas, distinguiremos los siguientes casos:

1. Una estación a una estación (*Serial*): Las unidades de flujo salen de una única estación y llegan a una única estación.
2. Una estación a varias estaciones (*Split*): Las unidades de flujo salen de una estación hacia más de una estación. Esto suele ocurrir en etapas iniciales del proceso productivo.

3. Varias estaciones a una estación (*Join*): Las unidades de flujo salen de varias estaciones hacia una estación. Estos casos suelen ocurrir en etapas finales del proceso productivo (Framiñán, 2023).

Debido a la gran influencia de los transportes en nuestro sistema de producción, que será explicado en el capítulo 4, debemos considerar dentro del marco de estudio de este documento los transportes como no instantáneos y consecuentemente, se modelarán como estaciones.

Este es un hecho diferencial para entender la futura división del sistema en estaciones para su estudio, pues los tiempos asociados a estos transportes no pueden ser obviados y, por lo tanto, debemos analizarlos, así como el resto de los tiempos asociados al sistema y sus estaciones inicialmente propuestas. Además, haremos referencia a cada una de las disposiciones de estaciones comentadas pues todas ellas tienen lugar en nuestro modelo a estudiar.

2.3 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Se entiende por producción la adición de valor a un bien, ya sea un producto o un servicio, por efecto de una transformación. Producir es extraer o modificar los bienes con el objetivo de volverlos aptos para satisfacer ciertas necesidades (Tawfik, 1984). Esta idea expuesta da un sentido lógico a la creación de estos modelos de estudio pues, las estaciones aquí propuestas, son cada uno de los puestos de trabajo por donde transcurrirán y se transformarán las piezas dentro de nuestro sistema, imitando a si un sistema de producción real y modelando estas estaciones comentadas con tiempos que podríamos asociar a estos trabajos o servicios citados.

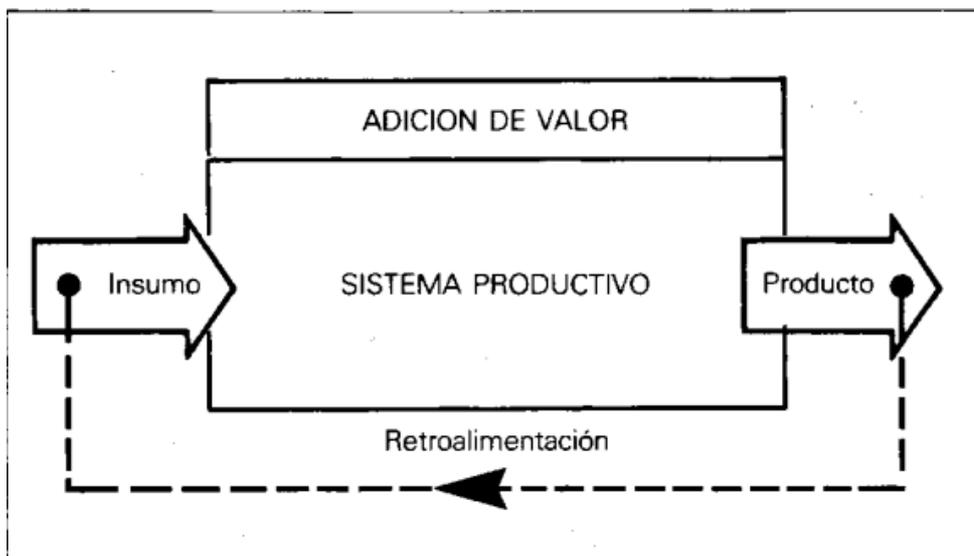


Figura 2.1 Sistema Productivo (Tawfik, 1984)

Según Framiñán (2023), los elementos que componen el modelo de un sistema de producción son los siguientes:

- Estaciones: Cada una de las etapas de transformación en las que se descompone el proceso.
- Trabajos: Un trabajo es una orden de fabricación que se convierte en un producto para su venta.
- Buffers/almacenes: elementos cuya función principal es la de punto de espera de los trabajos antes o después de una máquina.
- Máquinas: Elemento que realiza la operación sobre el trabajo. Si hablamos de operaciones manuales, la máquina representaría al operario encargado de la realización de dicha operación.

Para llevar a cabo el desarrollo del modelo, expuesto en el capítulo 4, será necesario el entendimiento de todos estos conceptos.

2.4 VARIABLES Y ECUACIONES DE DISEÑO DE PROCESOS

En este apartado desarrollamos las variables y ecuaciones del flujo de entrada de un producto para cada estación, del flujo de entrada de cada producto para cada estación y del flujo total de entrada para cada estación, además del tiempo de servicio y la variabilidad de servicio existente debido a los diferentes productos en cada estación i .

Esta diferenciación entre productos ha sido necesaria puesto que, tras la visualización del comportamiento del sistema expuesto y analizado en el documento complementario, aquellas piezas que durante su recorrido experimentaban algún fallo tecnológico veían transformado estos fallos en variaciones temporales de los tiempos preestablecidos. Por ello, el estudio venidero diferenciará entre dos tipos de piezas, aquellas que durante su recorrido se han visto interferidas por estos fallos, y las que no.

2.4.1 VARIABLES Y ECUACIONES PARA UN PRODUCTO EN UNA ESTACIÓN

En este apartado desarrollamos las variables y la ecuación del flujo de entrada de un producto para cada estación, que se explicará su uso en el apartado 6.4.

- $\lambda(i)$: Tasa de entrada en la estación i .
- $\gamma(i)$: Tasa de entrada externa de la estación i .
- $p(k,i)$: Probabilidad de que una unidad de flujo vaya de la estación k a la estación i .
- $\lambda(k)$: Tasa de entrada en la estación k .

$$\lambda(i) = \gamma(i) + \sum_{k=1}^n p(k,i) * \lambda(k)$$

Ecuación 2.1 (Framiñán, 2023)

2.4.2 VARIABLES Y ECUACIONES PARA DIFERENTES PRODUCTOS EN UNA ESTACIÓN

En este apartado desarrollamos las variables y ecuaciones del flujo de entrada de cada producto para cada estación y el flujo total de entrada para cada estación. Además, del tiempo de servicio equivalente y la variabilidad de servicio equivalente debido a los diferentes productos en una estación i . El uso de estas ecuaciones será explicado en el apartado 6.5.

- $\lambda^j(i)$: Tasa de entrada del producto j en la estación i .

- $\gamma^j(i)$: Tasa de entrada externa de la estación i .
- $p^j(k,i)$: Probabilidad de que una unidad de flujo del producto j vaya de la estación k a la estación i .
- $\lambda^j(k)$: Tasa de entrada del producto j en la estación k .
- $\lambda(i)$: Tasa de entrada en la estación i .
- $\theta_s^j(i)$: Variabilidad de servicio del producto j en la estación i .
- $\theta_s(i)$: Variabilidad de servicio de la estación i .
- $t_s^j(i)$: Tiempo de servicio del producto j en la estación i . Es la unidad de tiempo que están los trabajos del producto j en la máquina de la estación i .
- $T_s(i)$: Tiempo de servicio equivalente en la estación i . Es la unidad de tiempo promedio que están los trabajos en la máquina de la estación i (Framiñán, 2023).

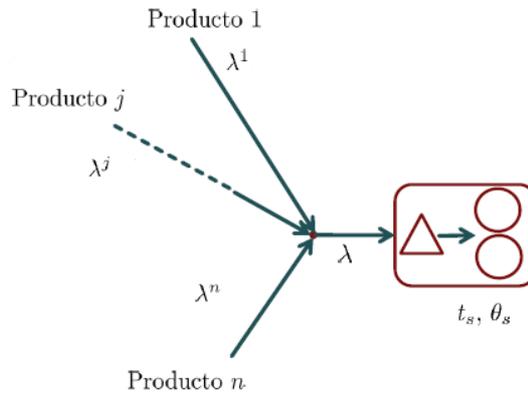


Figura 2.2 Variables de una estación (Framiñán, 2023)

$$\lambda^j(i) = \gamma^j(i) + \sum_{k=1}^n \lambda^j(k) * p^j(k, i)$$

Ecuación 2.2 (Framiñán, 2023)

$$\lambda(i) = \sum_{j=1}^n \lambda^j(i)$$

Ecuación 2.3 (Framiñán, 2023)

$$T_s(i) = \sum_{j=1}^n \frac{\lambda^j(i)}{\lambda(i)} * t_s^j(i)$$

Ecuación 2.4 (Framiñán, 2023)

$$\theta_s(i) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda^j(i)}{\lambda(i)} * (t_s^j(i))^2 * (\theta_s^j(i) + 1)}{T_s^2} - 1$$

Ecuación 2.5 (Framiñán, 2023)

2.4.3 VARIABLES Y ECUACIONES SOBRE LOS TIPOS DE TRANSPORTE

Según los posibles recorridos mencionados en el apartado 2.2, y tras comprobar como ya adelantábamos en este capítulo la existencia de todos ellos en nuestro modelo de estudio, se llevará a cabo una explicación de las variables usadas para cada uno de los casos posibles, seguido de las ecuaciones de variabilidad y, de flujo de entrada y de salida que corresponden a cada recorrido.

- $\theta_a(i)$: Variabilidad de entrada de la estación i
- $\theta_s(i)$: Variabilidad de salida de la estación i
- $\theta_s(i)$: Variabilidad de servicio de la estación i
- $\rho(i)$: Congestión de la estación i . Concepto que será tratado en el apartado siguiente 2.4.3.
- $\lambda(i)$: Tasa de entrada de la estación i .
- $th(i)$: Tasa de salida de la estación i .
- $p(k,i)$: Probabilidad de que una unidad de flujo vaya de la estación k a la estación i (Framiñán, 2023).

Transporte serial

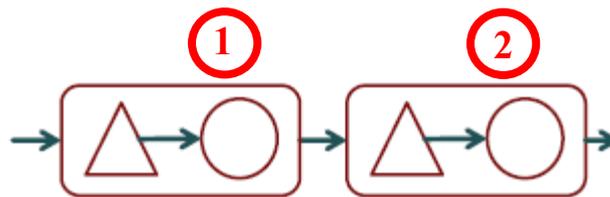


Figura 2.3 Transporte tipo Serial (Framiñán, 2023)

$$\theta_d(i) = [1 - \rho^2(i)] * \theta_a(i) + \rho^2(i) * \theta_s(i)$$

Ecuación 2.6 (Framiñán, 2023)

$$th(1) = \lambda(2)$$

Ecuación 2.7 (Framiñán, 2023)

$$\theta_d(1) = \theta_a(2)$$

Ecuación 2.8 (Framiñán, 2023)

Transporte Split

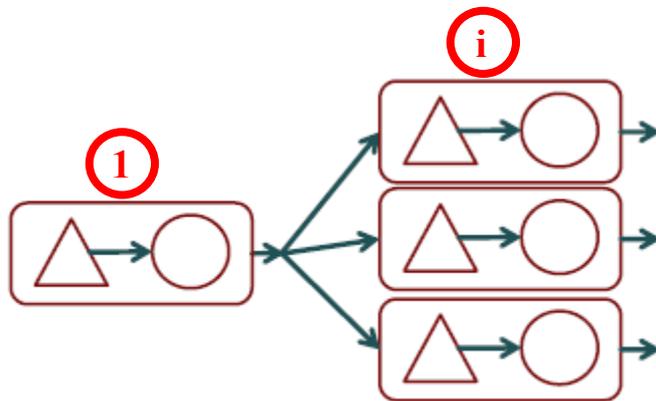


Figura 2.4 Transporte tipo Split (Framiñán, 2023)

$$\lambda(i) = th(1) * p(i)$$

Ecuación 2.9 (Framiñán, 2023)

$$\theta_a(i) = 1 + p(i) * (\theta_a(1) - 1)$$

Ecuación 2.10 (Framiñán, 2023)

Transporte Join

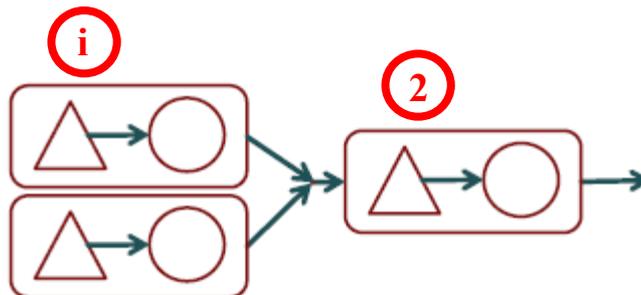


Figura 2.5 Transporte tipo Join (Framiñán, 2023)

$$\lambda(2) = \sum_{i=1}^n th(i)$$

Ecuación 2.11 (Framiñán, 2023)

$$\theta_a(i) = \sum_{i=1}^n \frac{th(i)}{\lambda(2)} * \theta_d(i)$$

Ecuación 2.12 (Framiñán, 2023)

2.4.4 VARIABLES Y ECUACIONES SOBRE EL CONCEPTO DE CONGESTIÓN

Se define la congestión, $\rho(i)$, como la relación entre la tasa de entrada en la estación i respecto al tiempo de servicio de dicha estación. Es importante entender este concepto pues será, como explicaremos más adelante, el que marque la diferencia entre la estabilidad y la inestabilidad del sistema.

Por lo expuesto y en relación a esta estabilidad y al concepto de tasa crítica explicado en este apartado se definirán las tasas de producción propias para el estudio que veremos en el apartado 5.1.

$$\rho(i) = \lambda(i) * t_s(i)$$

Ecuación 2.13 (Framiñán, 2023)

Partiendo del concepto de tasa de entrada (λ), la cual podemos definir como el número de piezas que entran en una estación por unidad de tiempo, y de capacidad de la estación, que es el número de trabajos por unidad de tiempo que entran en la máquina, podemos comprender que por unidad de tiempo no pueden salir más unidades de las que entran ni más unidades de las que se procesan, hecho que se refleja en la ecuación 2.13 siempre que hablemos de un sistema estable.

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

Ecuación 2.14 (Framiñán, 2023)

De este hecho, podemos distinguir dos casos en relación a la estabilidad que comentábamos al principio de este capítulo:

Si $\rho < 1 \rightarrow \lambda < \mu$. En este caso, $th = \lambda \rightarrow$ Estaríamos ante un sistema estable, que cumple con las reglas y ecuaciones del diseño de procesos.

Si, por el contrario, $\rho > 1 \rightarrow \lambda > \mu$. En este caso, $th = \mu \rightarrow$ En este caso, entra en la estación más unidades de la que sale a largo plazo y, por lo tanto, consideramos el sistema como inestable. No llegando a cumplir así con las reglas establecidas.

Además, la inestabilidad produce que un sistema en régimen permanente sufra un aumento característico de los tiempos de ciclo y, por consiguiente, un aumento del inventario en proceso, variables de estado que explicaremos en el apartado 2.4.5.

Asumimos como caso límite aquel donde la congestión en la estación es la máxima posible antes de que el sistema se convierta en un sistema inestable. Ese es el caso en el que $\rho = 1$ (Framiñán, 2023).

Partiendo de la ecuación 2.13 de este apartado, si nos encontramos en un caso límite ($\rho = 1$), introducimos el concepto de tasa de entrada crítica. La tasa de entrada crítica, por tanto, se trata de la tasa de entrada que hace que nuestro sistema se encuentre en el límite de la estabilidad y como consecuencia, una tasa de entrada mayor a la tasa crítica haría que nuestro sistema fuese inestable. Este concepto será tratado en el apartado 5.1, 6.4 y 6.5, y definirá las tasas de producción en los apartados 7.1.1, 7.2.1, 7.2.2 y 7.2.3.

2.4.5 VARIABLES Y ECUACIONES DE ESTADO PARA CADA ESTACIÓN

Las ecuaciones de las variables de estado serán importantes en el estudio teórico que se desarrollará en el apartado 6.2 y 6.3, y cuyo uso será explicado en el apartado 6.6. Gracias a estas ecuaciones podremos calcular el valor de las variables del sistema, que se exponen en el apartado 2.4.6.

- $qt(i)$: Tiempo de espera en la estación i . Unidad de tiempo que esperan los trabajos dentro de la estación i en promedio y a largo plazo.
- $ct(i)$: Tiempo de ciclo de la estación i . Unidad de tiempo que pasan los trabajos en la estación i en promedio y a largo plazo.
- $w(i)$: Inventario medio en proceso. Número de piezas promedio que se encuentran en la estación i durante el proceso.
- $\alpha(i)$: Relación entre la tasa de entrada a cada estación y la tasa de entrada externa al sistema.
- γ_s : Tasa externa de entrada al sistema (Framiñán, 2023).

$$qt(i) = V * U * T = \frac{\theta_a(i) + \theta_s(i)}{2} * \frac{\rho(i)}{1 - \rho(i)} * T_s(i)$$

Ecuación 2.15 (Framiñán, 2023)

$$ct(i) = qt(i) + T_s(i)$$

Ecuación 2.16 (Framiñán, 2023)

$$w(i) = \lambda(i) * ct(i)$$

Ecuación 2.17 (Framiñán, 2023)

$$\alpha(i) = \frac{\lambda(i)}{\gamma_s}$$

Ecuación 2.18 (Framiñán, 2023)

2.4.6 VARIABLES Y ECUACIONES DE ESTADO DEL SISTEMA

Como se expuso en el apartado anterior, con las ecuaciones de este apartado podremos calcular las variables de estado del sistema de cada uno de los escenarios en los apartados 7.1.1, 7.2.1, 7.2.2 y 7.2.3 para poder comparar el valor de dichas variables en el entorno teórico respecto a los valores originados por la experimentación. La aplicación de estas ecuaciones estará descrita en el apartado 6.7 de este documento.

- qt_s : Tiempo de espera del sistema. Unidad de tiempo que esperan los trabajos dentro del sistema en promedio y a largo plazo.
- ct_s : Tiempo de ciclo del sistema. Unidad de tiempo que pasan los trabajos en el sistema en promedio y a largo plazo.
- w_s : Inventario medio en proceso. Número de piezas promedio que se encuentran en el sistema durante el proceso.
- to : Tiempo mínimo de ciclo del proceso (Framiñán, 2023).

$$qt_s = \sum_{i=1}^m \alpha(i) * qt(i)$$

Ecuación 2.19 (Framiñán, 2023)

$$ct_s = \sum_{i=1}^m \alpha(i) * ct(i)$$

Ecuación 2.20 (Framiñán, 2023)

$$w_s = \sum_{i=1}^m w(i)$$

Ecuación 2.21 (Framiñán, 2023)

$$to = \sum_{i=1}^m \alpha(i) * T_s(i)$$

Ecuación 2.22 (Framiñán, 2023)

$$w_s = \gamma_s * ct_s$$

Ecuación 2.23 (Framiñán, 2023)

2.4.7 ECUACIONES ADICIONALES

Para finalizar este capítulo debemos añadir dos conceptos adicionales para el cálculo de variables necesarias para el estudio teórico propuesto. Estas ecuaciones serán usadas en los apartados del capítulo 6.

- Cálculo de la media

$$\mu = \frac{\sum X}{N}$$

Ecuación 2.24 (Framiñán, 2023)

- Cálculo de la desviación típica:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N}}$$

Ecuación 2.25 (Framiñán, 2023)

- Cálculo de la variabilidad:

$$\theta_x = \frac{\sigma_x^2}{t_x^2}$$

Ecuación 2.26 (Framiñán, 2023)

- Cálculo de la desviación típica para una Distribución Triangular:

$$\sigma = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}{18}}$$

Ecuación 2.27 (Krishnamoorthy, 2006)

3 TASAS DE PRODUCCIÓN Y ESCENARIOS

Toda organización, según Contreras Sierra (2013) *“necesita tener un norte, directrices o tasas de producción que la guíen, que faciliten a través del análisis, tanto interno como externo, saber cuáles son los objetivos que se espera obtener en el futuro y es allí cuando surge la planeación estratégica”*.

Por lo expuesto, las diferentes tasas de producción, que comentábamos en el capítulo anterior en referencia al concepto de congestión explicado en el apartado 2.4.4, serán las que marcarán el ritmo de entrada de piezas o muestras a seguir en nuestro sistema y por tanto, los casos de estudios principales.

Es aquí cuando entra en juego la inclusión de distintos escenarios. Estos nos ayudan a observar como el sistema interacciona según diferentes características, dentro de las mismas tasas de producción marcadas, y nos aportaran riqueza y variabilidad a la hora de la toma de datos de estudio.

En el siguiente capítulo, por tanto, introducimos tres conceptos esenciales en nuestro proyecto como son la tasa de producción, los escenarios y la toma de datos para entender mejor la relación entre ellos y como afectarán al estudio propuesto

3.1 TASAS DE PRODUCCIÓN

El uso de tasas de producción y escenarios es fundamental en la gestión moderna de procesos industriales ya que, el uso de las mismas nos aporta una visión distinta de cómo trabaja nuestro sistema respecto a la casuística que marca la diferencia entre ellas.

Según Danielle Meyerowitz (2018), *“la integración de tasas de producción según con el uso de escenarios proporciona una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en el entorno industrial. Mediante la aplicación de tasas de producción claras y la simulación de escenarios realistas, las empresas pueden mejorar su capacidad de respuesta y adaptabilidad, asegurando una operación continua y eficiente”*.

En referencia a nuestro sistema se impondrán tres tipos de tasas de producción diferenciadas cada una por la entrada al sistema, como ya hemos comentado, todo esto queda explicado detalladamente en el apartado 5.1 de este documento. De esta forma observaremos cómo se comporta el sistema de producción y cómo las variables de estado del sistema, desarrolladas en el capítulo 2, varían dependiendo de la ya citada tasa.

Además, la adición de escenarios para la toma de datos en referencia a ellos, que se detallará en el apartado 3.2, en combinación con estas tres tasas de producción mencionadas, nos aportará un amplio abanico de casuísticas de interés para su posterior análisis en el capítulo 7.

3.2 ESCENARIOS

Un escenario, según Gil (2002), *“es una descripción específica de cómo se comporta una aplicación en un momento determinado. Utilizar escenarios significa identificar diferentes situaciones y describir las acciones que se deben llevar a cabo en cada una de ellas”*.

La principal ventaja de los escenarios frente a otros métodos de identificación y recopilación de requisitos es que son capaces de ayudar a analizar aspectos específicos de un sistema de manera concreta.

Si bien, según la Metodología de Booch, cada escenario describe una situación particular, ninguno es totalmente independiente del resto.

Para la realización de nuestro estudio, se han impuesto 3 escenarios distintos por cada tasa de producción. Cada escenario viene diferenciado por un tiempo de servicio distinto asociado a los procesos que en el sistema se emulan, los cuales afectan solamente a las estaciones de procesado. Estas estaciones se encuentran explicadas en el capítulo 4, mientras que cada uno de los escenarios de nuestro estudio se detallará en el apartado 5.2.

3.3 DATOS DE ESTUDIO

Antes de comenzar, es esencial comprender qué se entiende por datos de investigación. En términos generales, los datos de investigación son aquellos que se recopilan, observan o generan con el propósito de analizarlos y obtener resultados originales en el contexto de investigaciones académicas y científicas.

Para Tricia Blackman (2017), *“los datos de investigación son registros concretos, que pueden tomar la forma de números, símbolos, texto, imágenes o sonidos, utilizados como fuentes primarias de investigación, que son comúnmente aceptados por la comunidad investigativa como necesarios para la validación de hallazgos de investigación, por lo que los datos pueden ser tanto de tipo cuantitativo como cualitativo”*.

Para nuestro proyecto los datos de estudio son una pieza clave, ya que, gracias a los datos recogidos de la experimentación de nuestro sistema, los cuales se muestran en el Anexo del documento, podremos explicar el comportamiento del sistema con cada una de las tasas de producción y qué sentido tienen los resultados de las variables de estado del sistema explicadas en el capítulo 2. Todos los datos quedarán recogidos en el capítulo 7 del documento.

A continuación, pasaremos a detallar el Teorema Central del Límite, el cual determina el número de muestras mínimo para garantizar la veracidad del conjunto de datos de estudio recogido.

3.3.1 TEOREMA CENTRAL DEL LÍMITE

El Teorema Central del Límite es uno de los teoremas fundamentales de la estadística. Este estudia el comportamiento de la suma (o el promedio) de variables aleatorias independientes, cuando crece el número de sumandos, asegurando su convergencia hacia una distribución normal en condiciones muy generales (Alvarado & Batanero, 2008). Es decir, dada cualquier variable aleatoria, si extraemos muestras de tamaño suficientemente elevado (generalmente cuando el tamaño muestral (n) supera los 30) y calculamos los promedios muestrales, dichos promedios seguirán una distribución normal. Además, la media será la misma que la de la variable de interés, y la desviación estándar de la media muestral será aproximadamente el error estándar (Canal, 2006). Por otro lado, permite también aproximar muchas distribuciones de uso frecuente (binomial, Poisson, chi cuadrado, t-student, gamma, etc.) cuando sus parámetros crecen y el cálculo se hace difícil (Alvarado & Batanero, 2008).

Para nuestro estudio, hemos intentado que el número de muestras fuese lo más cercano a 30 tal como se refleja en el teorema central del límite. Como se expone en el apartado 5.2, nuestra población muestral para cada uno de los escenarios es de 24 unidades.

4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El sistema de producción a modelar parte de un proyecto complementario a este, como fue comentado en el apartado 1.1, en el que se lleva a cabo la construcción de un sistema de producción usando tecnología LEGO®, el cual puede apreciarse terminado en la figura 1.1. El objetivo de este proyecto se basa en la validación de dicho sistema de producción a través de un modelo del mismo. A continuación, llevaremos a cabo una descripción de cómo se ha llegado al modelo final junto con la explicación de las diferentes decisiones tomadas para llegar a él.

4.1 MODELO 1

El sistema a modelar, que hemos comentado al inicio de este capítulo, se basa en un sistema de producción formado por un conjunto de cintas que se encargan de transportar las piezas (materia prima a procesar) unidireccionalmente de una estación de procesado a la siguiente. Estas citadas estaciones simulan la realización de diferentes trabajos sobre la muestra hasta que dicha pieza sale del propio sistema. Tanto su recorrido como las estaciones de procesado pueden observarse en la figura 4.1.

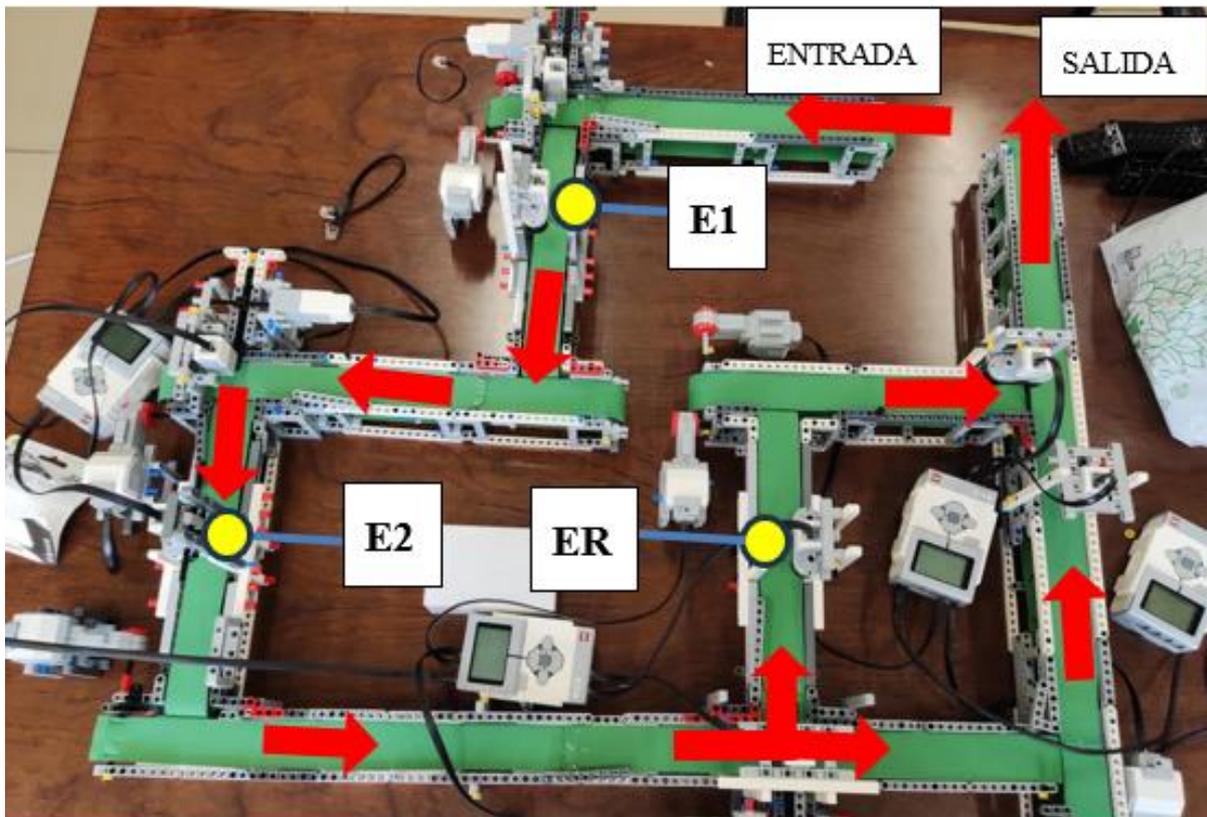


Figura 4.1 Sistema de producción con estaciones de procesado

Inicialmente, se propuso un primer modelo del sistema en el que se recogían aquellas estaciones que entendíamos que proporcionaban valor a nuestro modelo, es decir, las estaciones en las cuales se realizaba algún tipo de transformación sobre la pieza. Dichas estaciones se denominaron E1, E2 y ER, y quedan expuestas en la figura 4.1. Las estaciones E1 y E2 simulaban una estación de procesado de piezas, mientras que la estación ER simulaba una estación de reprocesado de aquellas piezas las cuales no cumplían con los requisitos de calidad debido a un mal procesado que se había llevado a cabo en las estaciones E1 y E2. Este primer modelo aparece

representado en la figura 4.2.

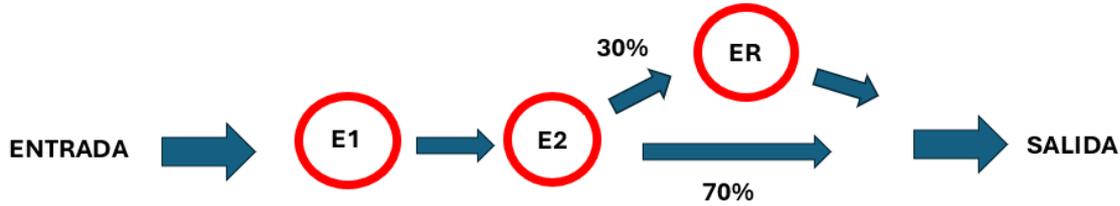


Figure 4.2 Modelo 1 del Sistema de producción (Chamorro Domínguez, 2024)

Como no disponíamos de los medios suficientes como para detectar o modelar estos fallos de procesado que comentamos, se propuso relacionar este hecho con un porcentaje fijo del total de piezas a procesar. Este porcentaje se encuentra definido en la capa de programación que gobierna el sistema, la cual está recogida en el proyecto complementario a este, y, por lo tanto, es un valor característico propio del mismo. Será en el apartado 7.3 donde comprobaremos, a través de las diferentes muestras y los datos experimentales obtenidos de estas, cuánto se asemeja este porcentaje de reprocesado impuesto en nuestro modelo respecto al experimental.

Siguiendo la figura 4.2 destacamos los tipos de conexiones entre estaciones existentes en nuestro modelo 1, los cuales fueron explicados en el apartado 2.2 de este documento:

- Entre las estaciones E1 y E2 observamos un tipo de transporte Serial.
- Una vez en la estación E2 se produce un tipo de transporte Split, donde se produce una división en el camino correspondiente al reprocesado, o no, de las piezas.
- Si estamos ante un caso de pieza que reprocesa, esta se dirigirá a la estación de reprocesado ER y de allí hasta la salida del sistema.
- Si la pieza no reprocesa, esta desde la estación E2 se dirigirá a la salida del sistema.

Tras llevar a cabo el primer modelado, se realizó una validación de este respecto al sistema de producción real. Tras la puesta en funcionamiento de este sistema, observamos, a partir del estudio plasmado en el apartado 7.1, que el comportamiento del modelo 1 no representaba fielmente lo que estaba ocurriendo en el sistema real. Este hecho queda cuantificado en las tablas 7.2, 7.4 y 7.6. A pesar de ello, este primer modelo nos ha servido como base para el planteamiento del modelo 2, el cual cuenta con una serie de diferencias notables que se explicarán en el siguiente apartado.

4.2 MODELO 2

A continuación, pasaremos a explicar, de manera detallada y fundamentada, cuáles fueron los motivos que nos hicieron derivar nuestra idea inicial en un segundo modelo, el cual se convertiría en el definitivo para la comparación con el sistema de producción real.

- Tras la puesta en marcha del sistema y la visualización del comportamiento del mismo, observamos, en régimen permanente, que el total de las muestras realizadas no tenía un comportamiento completamente homogéneo entre sí. Esto era consecuencia de que durante el recorrido que realizaba la pieza (materia prima a procesar) a través del sistema, se generaban una serie de fallos los cuales estaban ocasionados, en gran medida, por el uso conjunto de la tecnología LEGO® con materiales externos a esta. Este hecho desembocó en la hipótesis de realizar una diferenciación entre dos tipos de pieza motivada por estos fallos en el sistema. Estos dos tipos de piezas han sido denominados como:

- **PF:** Será la abreviatura que recibirán las piezas las cuales hayan sufrido algún tipo de fallo.
- **PNF:** Se referirán a las piezas que no han sufrido ningún tipo de fallo.

A continuación, detallaremos algunos de los fallos comentados:

- Fallos en los puntos de unión de las cintas que transportan las distintas muestras debido al rozamiento de dichas cintas por el uso de materiales externos a la tecnología LEGO®.
 - Fallos debido al rozamiento de las propias piezas con las cintas en los puntos de unión comentados.
 - Fallos en la estación *Pusher*, el cual es un módulo construido e implementado en nuestro sistema a modelar cuyo movimiento simula al de un pistón y que se encuentra perfectamente detallado en el documento complementario a este proyecto, por la iteración entre este y las piezas.
- Por otro lado, observamos que el tiempo que una pieza tardaba en llegar desde una estación de procesado a otra era de una magnitud superior al tiempo de servicio de las estaciones de procesado. Se observará en el apartado 7.1, referente al modelo 1, como la no inclusión de los tiempos de transportes hace que el modelo no recree la realidad del sistema. Este hecho, siguiendo la teoría del apartado 2.2, nos llevó a la conclusión de entender los transportes como no instantáneos y que debían ser modelados como una estación más. Esto nos lleva a la inclusión en nuestro modelo de 6 nuevas estaciones relacionadas con el transporte descrito entre estaciones de procesado, por lo que, como su nombre indica, nos referiremos a ellas como estaciones de transporte, denominadas como: T1, T2, T3, TR, TNR y TF. De esta forma nuestro nuevo modelo se verá reflejado como en la figura 4.3.

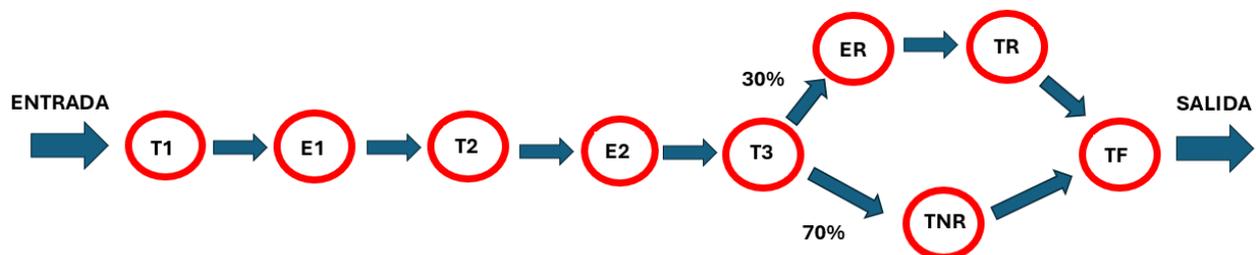


Figura 4.3 Modelo 2 del Sistema de producción (Chamorro Domínguez, 2024)

En la figura 4.4 los módulos *Pusher* estarán definidos como P1, P2 y P3, siendo este último el que utilizaremos para explicar las delimitaciones físicas de algunas de las estaciones modeladas. A continuación, explicaremos las dimensiones de cada una de las estaciones de transporte con la ayuda de la figura 4.4, en la cual se encuentran señaladas cada una de ellas:

- La estación de transporte T1 se trata del transporte que realiza la pieza desde la entrada a la estación de procesado E1.
- La estación de transporte T2 comienza una vez que la pieza sale de la estación de procesado E1 y llega a la estación de procesado E2.
- La estación de transporte T3 tiene su inicio cuando la pieza termina de procesarse en la estación E2 y llega hasta a *Pusher* 3, señalado en la figura 4.4.
- La TNR se trata del recorrido que hace la pieza que no reprocesa una vez que el *Pusher* 3 permite el paso y termina en la intersección I, señalada en la figura 4.4.

- En el caso de que la pieza reprocese y el *Pusher 3* empuje la pieza hacia la estación de reprocesado ER, la estación TR comienza cuando la pieza termina su reprocesado, es decir, sale de la estación ER y tiene su fin en la intersección I.
- La estación TF se trata del transporte realizado desde la intersección I hasta la salida del sistema.

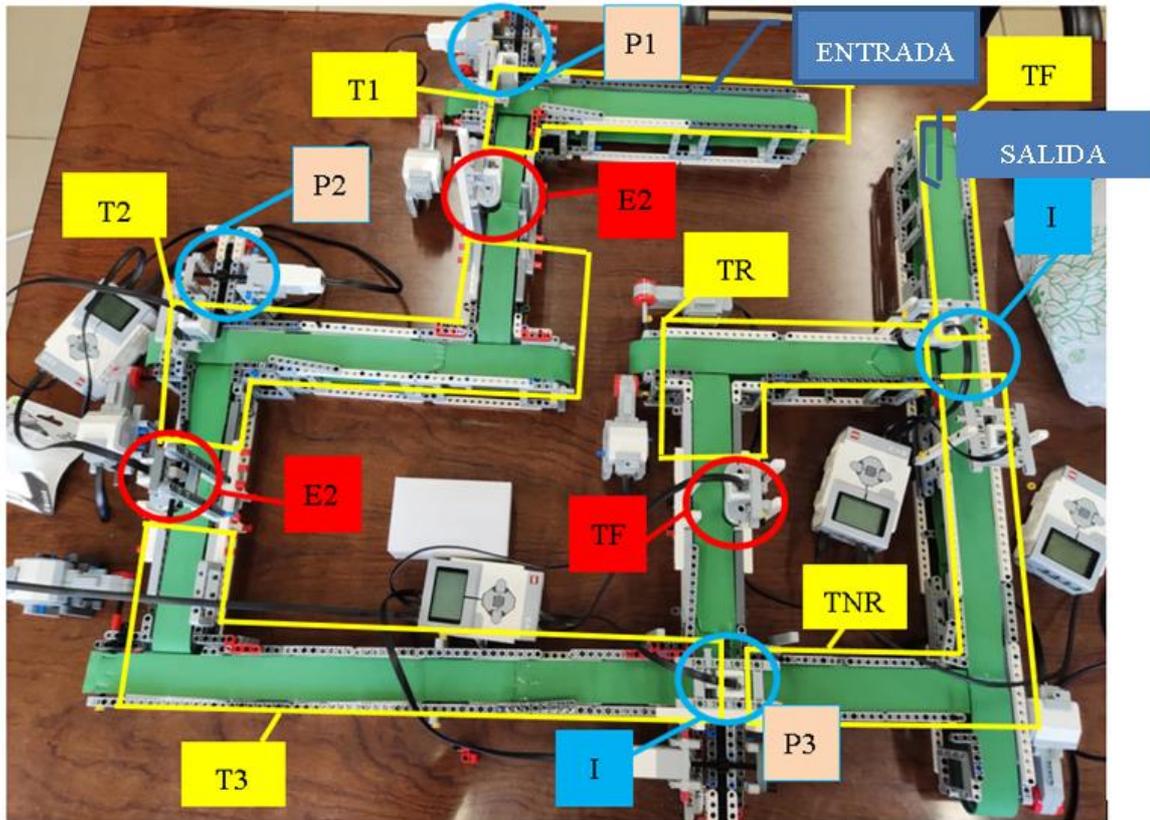


Figura 4.4 Sistema de producción II (Chamorro Domínguez, 2024)

Una vez que tenemos conocimiento de todas las estaciones que componen el sistema de producción gracias a las figuras 4.3 y 4.4, es importante remarcar los 3 tipos de conexiones existentes entre estaciones o puntos de interés, explicados con anterioridad en el apartado 2.2, ya que son un factor clave respecto a las ecuaciones usadas en el apartado 6.6:

- Podemos observar que desde la estación de transporte T1 continuando por las estaciones E1, T2 y E2 hasta la estación de transporte T3, estamos ante un tipo de transporte *Serial*.
- A partir de la estación T3, se produce un transporte de tipo *Split* gobernado por el *Pusher 3*, que divide el camino de las piezas en dos.
- En el caso de que la pieza tenga que reprocesar, se produce, de nuevo, un transporte tipo serial entre las estaciones ER y TR.
- Al final, nos encontramos ante un transporte tipo *Join* (señalado en la Figura 4.4 con la letra I) donde las estaciones TNR y TR se unen en la estación de transporte TF.

Finalmente, es importante incluir las limitaciones encontradas a la hora de proceder a realizar el estudio del sistema de producción, ya que han influido de una forma u otra:

- Limitaciones físicas debido a que el modelo está condicionado por el uso de componentes LEGO® ya existentes en el inventario de piezas proporcionado por la Universidad de Sevilla. Esto influye en la elección de las estaciones puesto que no disponemos de más sensores con el que podamos controlar o tomar datos en el sistema.
- Limitaciones en cuanto a la recogida de datos debido a las restrictivas posibilidades de comunicación entre las diferentes CPU responsables de la automatización de nuestro modelo por la antigüedad de estos, la tecnología a usar y las conexiones para ello pertinentes. Lo que conlleva que los datos sean recogidos manualmente.

5 TASAS DE PRODUCCIÓN Y ESCENARIOS IMPLEMENTADOS EN EL ESTUDIO

A continuación, se llevará a cabo una explicación de las tasas de producción y de los escenarios de estas, los cuales se introdujeron en el capítulo 3 del presente documento. Tanto estas tasas de producción como los escenarios nos ayudarán aportando riqueza y variedad de resultados durante la experimentación.

5.1 TASAS DE PRODUCCIÓN

Una vez comprendido el concepto teórico tanto de un escenario como de una tasa de producción gracias a lo explicado anteriormente en el capítulo 3, citaremos cuales son aquellas que hemos utilizado para nuestro sistema y el motivo de su elección.

La recogida de datos necesaria para la comparativa ya expuesta, se tomará en base al comportamiento del sistema mediante el uso de 3 tipos de tasas de producción definidas por su tasa de entrada respecto al valor crítico de esta, concepto desarrollado en el apartado 2.4.4. El método usado para el cálculo de la tasa de entrada crítica para cada modelo será explicado en el apartado 6.4 y 6.5 y, su cuantificación matemática se llevará a cabo en los apartados 7.1 y 7.2.

A continuación, detallaremos estas 3 tasas de producción ya mencionadas:

- La **tasa de producción 1** está definida por una tasa de entrada holgada, menor del 65% de la capacidad del sistema, con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema sin llegar a acercarnos al caso límite de congestión o inestabilidad de este, concepto explicado en el apartado 2.4.4.
- La **tasa de producción 2**, por su parte, pretende llevar al sistema un paso más allá, definiendo la tasa de entrada con un valor mayor al 90 % de la capacidad del sistema, pero sin llegar al límite marcado por la congestión, pudiendo influir de manera significativa en el ámbito del diseño del mismo.
- La **tasa de producción 3** pretende desmarcarse de los dos casos anteriores. Se impondrá una tasa de entrada característica de un sistema inestable, de manera que podamos estudiar el comportamiento de la tecnología utilizada.

Dentro de cada una de las tasas de producción que acabamos de explicar, existen 3 tipos distintos de escenarios de estudio, que, a continuación, detallaremos en el siguiente apartado.

5.2 ESCENARIOS

Los escenarios propuestos se diferencian unos de otros gracias a los 3 tipos de tiempos de servicio asociados a cada uno. Estos tiempos solo afectan a las estaciones de procesado E1, E2 y ER.

La elección de un tiempo de proceso Determinista, como Escenario 1, se debe a que queremos un valor ideal y exacto, aunque sea poco cercano a la realidad modelable, mientras que la Distribución Normal y la Triangular, correspondientes a los Escenario 2 y 3, respectivamente, han sido elegidas por ser dos distribuciones que se ajustan, de una manera más precisa, al comportamiento típico de los tiempos de servicios de una máquina o estación.

A continuación, se describirán cada uno de los escenarios:

- **Escenario 1:** Dicho escenario está definido por tiempos de proceso deterministas. Esto se debe a que queremos fijar un valor exacto, aunque sea poco cercano a la realidad modelable, para simular el

comportamiento de nuestro sistema sin desviaciones asociadas a los tiempos de servicios de estas estaciones de procesado.

- En la estación E1 imponemos un tiempo de procesado de 8 segundos.
 - En la estación E2 se impone un tiempo de procesado de 6 segundos.
 - En la estación ER se impone un tiempo de procesado de 4 segundos.
- **Escenario 2:** El tiempo de procesado sigue una Distribución Normal. Este tiempo viene determinado por un valor promedio y una desviación típica asociada. Esta distribución ha sido elegida ya que simula de una manera más precisa el comportamiento que sigue el tiempo de procesado típico de una máquina o estación de este tipo de sistemas de producción.
 - Para la estación E1 imponemos como tiempo de procesado medio un valor de 8 segundos con una desviación típica de 1 segundo.
 - Para la estación E2 imponemos como tiempo de procesado medio un valor de 6 segundos y una desviación asociada de 1 segundo.
 - Para la estación E3, el valor medio es de 4 segundos con una desviación típica igual a 1 segundo, al igual que en las estaciones E1 y E2.
 - **Escenario 3:** El tiempo de procesado sigue una Distribución Triangular. Este tiempo está definido por un valor central, un valor mayor al central (valor superior) y otro valor menor al central (valor inferior), como puede verse definido en la tabla 6.3 de este documento. De la misma forma que el escenario anterior, la distribución elegida simula a la perfección el comportamiento del tiempo de procesado de una máquina o estación en estos sistemas.
 - El tiempo propio de la estación E1 está regido por un valor central de 8 segundos y cuyos valores superior e inferior son 10 y 6 segundos, respectivamente.
 - En la estación E2, el valor central es de 6 segundos y, los valores superior e inferior son 8 y 6 segundos, respectivamente
 - Por último, en la estación E3, de la misma forma, se define con valor central 4 segundos y, unos valores superior e inferior de 5 y 3, respectivamente.

De cada uno de los escenarios descritos se recogen valores característicos de 24 muestras experimentales, ya que consideramos que se trata un número adecuado de pruebas para entender el comportamiento del sistema, como expone el Teorema Central Límite, recogido en el apartado 3.3.1 de este documento. Estas muestras serán la base de la comparativa que venimos citando desde el principio de este documento. Este número de muestras a registrar está definido tanto por la limitación del número de piezas del que disponemos, como por el procedimiento manual con el que nos vemos obligados a trabajar por no disponer de más conexiones entre bloques EV3.

6 MÉTODO DE RESOLUCIÓN

Una vez que en el capítulo 4 hemos aclarado el funcionamiento de nuestro sistema, descrito las estaciones que lo conforman y explicado los diferentes casos de transporte que gobiernan el sistema, y en el capítulo 5 se han descrito las diferentes tasas de producción y escenario que usaremos, en este capítulo se detallará el procedimiento de resolución de nuestro estudio paso a paso. Los cálculos inherentes a este estudio se llevarán a cabo en el capítulo 7.

Comenzaremos presentando los tiempos de transporte y de procesado que usaremos en las diferentes estaciones para cada uno de los modelos. Tras esto, se expondrá el procedimiento usado para calcular las variables fijas que gobiernan al modelo 1 y al modelo 2, respectivamente. Por último, se llevará a cabo una explicación del procedimiento que seguiremos para calcular tanto las variables de estado de cada una de las estaciones como las variables de estado a nivel de sistema respecto a cada escenario de cada tasa de producción.

6.1 DEFINICIÓN DE TIEMPOS DE SERVICIO

Los tiempos de servicio de las estaciones de procesado E1, E2 y ER se encuentran definidos a través de la capa de programación, la cual está recogida en el proyecto complementario a este. Debido a los motivos expuesto en el apartado 4.2, nos surgió la necesidad de cuantificar los tiempos de transporte para así poder evaluarlos en nuestro modelo. Como estos no se encuentran definidos en dicha capa, se prosiguió a calcular cada uno de ellos a partir de las mediciones de los tiempos de transporte de las muestras que conforman la experimentación, tiempos recogidos en el Anexo 1, 2 y 3.

Debido a que el comportamiento del sistema respecto a las tasas de producción 1 y 2 es estable, hemos tenido en cuenta los tiempos de transportes de los distintos escenarios de estas tasas de producción para la definición del tiempo de servicio promedio de cada una de las estaciones de transporte del modelo 2. Esto se debe a que los transportes son independientes tanto de las distintas tasas de producción como de los distintos tiempos de servicio de las estaciones de procesado, siempre y cuando nuestro sistema se mantenga dentro de dicha estabilidad. Con ello, nos queda una población muestral de tamaño igual a 144.

En conjunto a todo lo comentado, en cada estación de transporte se ha llevado a cabo una diferenciación en los tiempos de transporte debido a los dos tipos de piezas, explicadas en el apartado 4.2 (PF y PNF). Esta diferenciación queda definida en las dos tablas que conforman el Anexo 4. Estos datos serán usados en el siguiente apartado para calcular tanto el valor de los tiempos asociados a las estaciones de transportes como la variabilidad asociada a los tiempos de transporte de piezas que han sufrido fallos (PF).

6.2 TIEMPOS DE TRANSPORTE

Para el cálculo de los tiempos de transporte del modelo 2, seguiremos lo descrito en el apartado 6.1 respecto a los dos tipos de piezas existentes (PF y PNF) y a los tiempos de las estaciones de transporte asociados a este modelo.

Para el caso de las muestras que no han sufrido fallos (PNF), el cálculo del tiempo de servicio de cada una de las estaciones de transporte se realiza como un promedio de los tiempos de transporte para dicha estación con la ayuda de la ecuación 2.24 e imponiendo que la desviación típica de los tiempos de las estaciones de transporte es cero. Estos resultados quedan recogidos en la tabla 6.1.

	T1	T2	T3	TR	TNR	TF
PROMEDIO	11,1528	17,6239	10,3955	7,9118	7,6629	3,6667

Tabla 6.1-Tiempo promedio de las estaciones de transporte para piezas PNF

Para las muestras las cuales han sufrido fallos (PF), el tiempo de servicio de las estaciones de transporte se calcula de la misma forma, es decir, como el promedio de los tiempos de las muestras para cada estación. Además, se lleva a cabo el cálculo de la desviación típica de los tiempos de servicio promedio en cada una de las estaciones de transporte debido al comportamiento originado por los fallos producidos sobre estas muestras, gracias a la ecuación 2.25. Tras esto, se calcula la variabilidad asociada a cada estación de transporte gracias a la ecuación 2.26. Tanto los tiempos de transporte promedio de cada una de las estaciones como la desviación típica y la variabilidad de estas se recogen en la tabla 6.2.

	T1	T2	T3	TR	TNR	TF
PROMEDIO		19,6296	11,1	8,6667	8,7692	4,0833
DESV. TÍPICA		1,9444	0,316227766	0,816496581	0,832050294	0,288675135
VARIABILIDAD		0,009812	0,0008116	0,008876	0,009003	0,004998

Tabla 6.2- Tiempo promedio, desviación típica y variabilidad de las estaciones de transporte para piezas PF

6.3 TIEMPOS DE PROCESADO Y VARIABILIDAD ASOCIADA

En este apartado se procederá a definir los tiempos de servicios de las estaciones de procesado E1, E2 y ER, y el cálculo de las variabilidades de servicio de cada una de ellas según los tres tipos de escenarios explicados en el capítulo 5, teniendo en cuenta que tanto estos tiempos como su variabilidad son independientes del valor impuesto por la tasa de producción, siempre que el sistema se mantenga en un régimen de estabilidad. Debido a que la diferenciación de las piezas (PF y PNF) no se refleja en las estaciones de procesado, los valores de los tiempos de servicio y de las variabilidades de servicio de estas estaciones no varían entre tipos de pieza, esto se ve reflejado en la tabla 6.5. A continuación, se detallará el procedimiento usado y los resultados obtenidos:

- **Escenario 1:** Tiempos de servicio (en segundos): $(E1, E2, ER) = (8, 6, 4)$. Como se explicó en el capítulo 5, al tratarse de tiempos de servicio deterministas no tienen asociada una desviación típica ni, por consiguiente, una variabilidad.
- **Escenario 2:** Tiempos de servicio (en segundos): $(E1, E2, ER) = (8, 6, 4)$. Como se comentó en el capítulo 5, cada uno de estos tiempos tiene asignada una desviación típica de valor 1. Por tanto, su variabilidad de servicio queda reflejada en la tabla 6.4, gracias al uso de la ecuación 2.26.
- **Escenario 3:** Tiempos de servicio (en segundos): $(E1, E2, ER) = (8, 6, 4)$. Como se comentó en el capítulo 5, cada uno de estos tiempos tiene asignada una desviación típica de diferente valor debido al rango de valores de los tiempos de cada una de las estaciones de procesado. Para calcular la desviación típica de servicio de cada una de las estaciones se ha usado la ecuación 2.27. Observamos en la tabla 6.3 tanto el rango de valores de las estaciones como la desviación de esta. Tras este cálculo y con la ayuda de la ecuación 2.26, se ha llegado al valor de las variabilidades de servicios de cada una de ellas que se encuentran recogidas en la tabla 6.4.

Como ya se comentó, la diferenciación entre piezas no se ve reflejado en las estaciones de procesado y, por tanto, así queda remarcado en la tabla 6.5, la cual resumen el tiempo y la variabilidad de servicio de estas.

	VALOR SUPERIOR	VALOR CENTRAL	VALOR INFERIOR	
	A	B	C	DESVIACION TÍPICA
E1	10	8	6	0,8165
E2	8	6	4	0,8165
ER	5	4	3	0,4082

Tabla 6.3-Rango de valores de los tiempos de servicio de servicio y desviación típica de las estaciones de procesado para el escenario 3.

		ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
	TIEMPO SERVICIO	θ SERVICIO	θ SERVICIO	θ SERVICIO
E1	8	0	0,0156	0,0104
E2	6	0	0,0278	0,0185
ER	4	0	0,0625	0,0104

Tabla 6.4-Tiempo y variabilidad de servicio de las estaciones de procesado para los 3 escenarios para un tipo de pieza

		ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
	TIEMPO SERVICIO	θ SERVICIO PF	θ SERVICIO PNF	θ SERVICIO PF	θ SERVICIO PNF	θ SERVICIO PF	θ SERVICIO PNF
E1	8	0	0	0,0156	0,0156	0,0104	0,0104
E2	6	0	0	0,0278	0,0278	0,0185	0,0185
ER	4	0	0	0,0625	0,0625	0,0104	0,0104

Tabla 6.5-Tiempo y variabilidad de servicio de las estaciones de procesado para los 3 escenarios para dos tipos de pieza

6.4 ANÁLISIS DEL MODELO 1

En este apartado, se llevará a cabo una descripción del procedimiento a seguir para el cálculo de las variables características de nuestro sistema de producción real para cada una de las estaciones que conforman a este, para el caso del modelo 1. Para ello, haremos uso de los datos recogidos en la tabla 6.4.

Las variables características de nuestro problema para el modelo 1 son: flujo de entrada (λ), tiempo de servicio (T_s), proporción de flujo de entrada a la estación respecto a la tasa de entrada al sistema (α), la congestión (ρ) y la tasa crítica de entrada al sistema (γ^*).

Para el modelo 1 teníamos una serie de condicionantes respecto al modelo 2, detallados en el capítulo 4:

- Tiempo de transporte instantáneo entre estaciones de procesado.
- Existencia de un solo tipo de pieza o producto debido a la ausencia sustancial de fallos en las estaciones de procesado

A continuación, se llevará a cabo la explicación de cómo se ha calculado cada una de las variables características anteriormente comentadas para el modelo 1, donde todos los resultados se encontrarán calculados en el apartado 7.1:

- Gracias a la ecuación 2.1 se lleva a cabo el cálculo del flujo de entrada en cada una de las estaciones que conforman el modelo 1.
- Gracias a los tiempos de servicio recogidos en la tabla 6.4, tendríamos el valor del tiempo de servicio de las estaciones del sistema.
- Con la ecuación 2.18 se realizará el cálculo de la relación entre la tasa de entrada a cada estación y la tasa externa de entrada al sistema.
- Posteriormente, se calcula el valor de la congestión de las estaciones que conforman nuestro sistema de producción en función de la tasa externa de entrada con la ayuda de la ecuación 2.13.
- Por último, se pretende conocer cuál es la estación del modelo 1 que primero congestiona. Gracias a los valores calculados y que se encuentran en el vector congestión, deducimos la citada estación. El valor correspondiente a la congestión de esta estación, junto con el concepto de tasa crítica de entrada, explicado en el apartado 2.4.4, nos ayuda a calcular la tasa de entrada crítica que soporta nuestro sistema de producción siguiendo el modelo 1.

6.5 ANÁLISIS DEL MODELO 2

De la misma forma que en el apartado 6.4, se llevará a cabo una descripción del procedimiento a seguir para el cálculo de las variables características de nuestro sistema de producción real para cada una de las estaciones para el caso del modelo 2. Para ello, haremos uso de los datos recogidos en la tabla 6.5.

Para dicho modelo, las variables características de nuestro problema son: flujo de entrada de los productos PF y PNF (λ_F y λ_{NF}), tiempo de servicio de producto equivalente (T_s), proporción de flujo de entrada a la estación respecto a la tasa de entrada al sistema (α), la congestión (ρ) y la tasa crítica de entrada al sistema (γ^*).

A continuación, de la misma forma que en el apartado anterior, se llevará a cabo la explicación de cómo se ha calculado cada una de las variables características anteriormente comentadas para el modelo 2, cuyos resultados se encontrarán todos calculados en el apartado 7.2:

- A partir de las 144 muestras usadas en el apartado 6.1 en el que diferenciábamos los tiempos de servicio de las estaciones de transporte según el tipo de piezas PF y PNF, valores que se encuentran definidos en las tablas del Anexo 4, hemos averiguado la fracción del tipo de piezas que entran en nuestro sistema y que se encuentra reflejada en la tabla 6.6. Con la ayuda de estos valores y la ecuación 2.2 se llevará a cabo el cálculo de la tasa de entrada de cada tipo de producto en cada una de las estaciones. Posterior a esto, se calculará la tasa de entrada total en las estaciones, gracias a la ecuación 2.3.

NUMERO DE TIPOS DE PIEZAS		FRACCIÓN
PIEZAS FALLAN (PF)	64	4/9
PIEZAS NO FALLAN (PNF)	80	5/9
	144	

Tabla 6.6-Fracción según el tipo de pieza PF y PNF

- Gracias a los tiempos de servicio de las estaciones de procesado y de transporte referidos a cada tipo de pieza, cuyos resultados se encuentran explicados y visibles en los apartados anteriores 6.2 y 6.3, junto con la ecuación 2.4, y los valores calculados en el punto anterior (tasa de entrada de los productos PF y PNF en cada una de las estaciones, y la tasa de entrada total en cada una de ellas), se lleva a cabo el cálculo del tiempo de servicio de producto equivalente.
- Con la ecuación 2.18 se realizará el cálculo de la relación entre la tasa de entrada a cada estación y la tasa externa de entrada al sistema.
- Posteriormente, se calcula el valor de la congestión de las estaciones que conforman nuestro sistema de producción en función de la tasa externa de entrada con la ayuda de la ecuación 2.13.
- Por último, se pretende conocer cuál es la estación del modelo 2 que primero congestiona. Gracias a los valores calculados y que se encuentran en el vector congestión, deducimos la citada estación. El valor correspondiente a la congestión de esta estación, junto con el concepto de tasa crítica de entrada, explicado en el apartado 2.4.4, nos ayuda a calcular la tasa de entrada crítica que soporta nuestro sistema de producción siguiendo el modelo 2. Este valor se considera importante para nuestro estudio, ya que a partir de él se llevará a cabo la elección de la tasa de entrada para cada una de las tasas de producción propuestas, que fueron explicadas en el apartado 5.1.

6.6 ANÁLISIS MODELO-EXPERIMENTACIÓN EN CADA ESTACIÓN REFERENTES A LOS ESCENARIOS DE CADA TASA DE PRODUCCIÓN

Como ya se comentó en el apartado 1.1 de este documento, se realizará un estudio teórico en cada uno de los escenarios con el fin de verificar el comportamiento del modelo 2 respecto a cada una de las tasas de producción del sistema de producción, ya que como probaremos en el capítulo siguiente será el que mejor represente la realidad del sistema. Para llegar a esta conclusión, primero se analizó el comportamiento del modelo 1 propuesto.

En este apartado se procederá a explicar el cálculo de las variables de estado asociadas a cada estación. Dichos cálculos se realizarán siguiendo el mismo procedimiento para cada tipo de escenario intrínseco a las tasas de producción 1 y 2, puesto que la tercer de estas se encuentra fuera del comportamiento estable. Los valores de las variables de estado asociadas a cada estación se encuentran recogidos en las tablas 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, 7.9, 7.11, 7.13, 7.15, 7.17. A continuación, se detallarán las ecuaciones utilizadas, haciendo una diferenciación en los

apartados donde dicho cálculo varíe dependiendo del modelo en cuestión:

1. Gracias al estudio del sistema, explicado en el apartado anterior, recogeremos en las tablas tanto $\alpha(i)$ como $T_s(i)$, ya que son variables intrínsecas características de nuestro sistema. Del mismo modo, se recogerá el valor de la congestión ($\rho(i)$), cuyo cálculo dependerá de la tasa de entrada al sistema de cada una de las 3 tasas de producción empleadas. El cálculo realizado en este punto será común para el estudio teórico-experimental del modelo 1 y del modelo 2.

2. Este punto será diferente respecto al modelo usado:

2.1 Para el modelo 1, el cálculo de la variabilidad de entrada a la estación de procesado E1 ($\theta_a(E1)$) con una desviación típica igual a 1 segundo, impuesta por el error manual, se realiza a través de la ecuación 2.26, la cual depende de la tasa de entrada de cada tasa de producción. Esta variabilidad comentada está calculada en la primera celda del estudio de cada uno de los escenarios del modelo 1, para la correcta localización de la celda adjuntamos un ejemplo de la figura 6.1.

	$\theta_a(i)$	$\theta_s(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$	
E1	0,00111	0	0,001	0,2667	8	1	0,0016	8,0016
E2	0,0010	0	0,001	0,2	6	1	0,0008	6,0008
ER	0,7003	0	0,6992	0,04	4	0,3	0,0584	4,0584

Figura 6.1. Ejemplo de tabla con celda $\theta_a(E1)$

2.2 El cálculo de la variabilidad de entrada a la estación de transporte T1 ($\theta_a(T1)$) para el modelo 2 viene dado por una desviación típica igual a 1 segundo impuesta por el error manual y el uso de la ecuación 2.26 la cual depende de la tasa de entrada de cada tasa de producción. Esta variabilidad comentada se encuentra calculada en la primera celda del estudio de cada uno de los escenarios del modelo 2, para la correcta localización de la celda adjuntamos un ejemplo de la figura 6.2.

	$\theta_a(i)$	$\theta_s(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$	
T1	0,0011	0	0,001	0,3717	11,1528	1	0,0037	11,1565
E1	0,001	0	0,0009	0,2667	8	1	0,0014	8,0014
T2	0,0009	0,0078	0,0035	0,6171	18,5153	1	0,1297	18,645
E2	0,0035	0	0,0034	0,2	6	1	0,0026	6,0026
T3	0,0034	0,0015	0,0031	0,357	10,7086	1	0,0144	10,723
ER	0,7009	0	0,6998	0,04	4	0,3	0,0584	4,0584
TR	0,6998	0,0064	0,6951	0,0825	8,2473	0,3	0,2618	8,5091
TNR	0,3022	0,0092	0,2916	0,1903	8,1546	0,7	0,2983	8,4529
TF	0,8253	0,0054	0,8118	0,1284	3,8519	1	0,2357	4,0875

Figura 6.2. Ejemplo de tabla con celda $\theta_a(T1)$

3. De nuevo, diferenciamos según modelo:

3.1 En el caso del modelo 1, las variabilidades de servicio ($\theta_s(i)$), al suponer que no existe una diferenciación entre tipos de producto y que los transportes son instantáneos, se encuentran ya calculadas en la tabla 6.4.

3.2 El cálculo de las variabilidades de servicio ($\theta_s(i)$) de cada una de las estaciones de transporte del modelo 2 se ha realizado gracias a las ecuaciones recogidas en el apartado 2.4.2 junto con el resultado del vector λ_F y λ_{NF} , anteriormente calculado, y los resultados de los tiempos de transporte y de la variabilidad asociadas a las piezas con fallos y sin fallos, recogidas de las tablas 6.1 y 6.2.

Mientras que el cálculo de las variabilidades de servicio ($\theta_s(i)$) de las estaciones de procesado del modelo 2 se lleva a cabo gracias a las ecuaciones del apartado 2.4.2 junto con el resultado del vector λ_F y λ_{NF} , anteriormente calculado, y los resultados de las variabilidades y los tiempos de servicio de las estaciones de procesado, según el tipo de escenario, recogidos en la tabla 6.5.

4. El cálculo del resto de variabilidades de entrada ($\theta_a(i)$) y de salida ($\theta_d(i)$) de las estaciones dependerá del tipo de recorrido de las piezas entre ellas según el modelo, el cual se encuentra explicado en el bloque 4.1 para el modelo 1 y en el bloque 4.2 para el modelo 2. Para ello, usaremos las ecuaciones descritas en el apartado 2.4.3 junto con los resultados de la congestión obtenidos en el punto 1. El cálculo de estas variabilidades se realizará de la misma forma para ambos modelos.

5. Cálculo de los tiempos de espera ($qt(i)$) y los tiempos de ciclo ($ct(i)$) de cada una de las estaciones que conforman este sistema. Estas variables las calculamos gracias a la ecuación 2.15 y la ecuación 2.16, respectivamente, y a los valores de las variables calculadas en los puntos anteriores. De nuevo, dichas variables serán calculadas para los modelos 1 y 2 de forma análoga.

Tras este procedimiento, se calcularían las variables de estado a nivel de estación las cuales serán usadas para llevar a cabo el cálculo de las variables del sistema en el siguiente apartado. Estas últimas serán las que usaremos para realizar la comparación las variables experimentales de los escenarios.

6.7 ANÁLISIS MODELO-EXPERIMENTACIÓN EN EL SISTEMA REFERENTE A LOS ESCENARIOS DE CADA TASA DE PRODUCCIÓN

En este apartado se procederá a explicar el cálculo de las variables de estado a nivel de sistema referentes a los modelos y el cálculo de las variables experimentales del sistema de cada uno de los escenarios para las tasas de producción 1 y 2, las cuales se encuentran dentro del comportamiento estable del sistema.

Dichos cálculos se realizarán siguiendo el mismo procedimiento para cada tipo de escenario intrínseco a las tasas de producción 1 y 2, y se realizan de la misma forma tanto para el modelo 1 como para el modelo 2. Procedemos a explicar el procedimiento para obtener dichas variables de estado, las cuales se encontrarán en las tablas 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 7.10, 7.12, 7.14, 7.16, 7.18 bajo el nombre de “Modelo Teórico”:

1. Con lo anteriormente expuesto, se calcula el tiempo de ciclo del sistema (ct_s) gracias a las ecuaciones 2.20. Para ello, se necesitará el valor de la variable $\alpha(i)$, calculada en el procedimiento anterior.
2. Tras esto, se procede a averiguar el valor del inventario medio del sistema (w_s) la ecuación 2.23 y con el valor de la tasa de entrada al sistema dependiente de la tasa de producción.
3. Para cálculo de la tasa de salida del sistema (th) se tiene en cuenta lo explicado en el apartado 2.4.4, en el que se recoge que el sistema estable debe tener una tasa de salida sistema igual al de la entrada.

Tras el estudio teórico, se lleva a cabo en cada escenario un cálculo de las variables de estado de nuestro sistema sacadas gracias a la experimentación del mismo y el cual se realiza de la misma forma para ambos modelos. De esta forma podremos observar si los resultados de dichas variables se asemejan a las de los modelos diseñados. Se detallarán las ecuaciones y el procedimiento a seguir para su cálculo, y las encontraremos en las tablas 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 7.10, 7.12, 7.14, 7.16, 7.18 bajo el nombre de “Experimentación”:

1. El tiempo de ciclo (ct_s) de cada escenario será el promedio de los tiempos de ciclo de las muestras de dicho escenario respecto a cada tasa de producción, datos recogidos en el Anexo 1, 2 y 3, con la ayuda de la ecuación 2.24.
2. El inventario medio (w_s) de cada escenario se calcula gracias al valor calculado en el punto anterior y la tasa de entrada dependiente de la tasa de producción, valores aplicados a la ecuación 2.23.
3. Tras esto, se lleva a cabo el cálculo de la tasa de salida del sistema (th) con el fin de comprobar que se cumple la estabilidad del sistema, concepto explicado en el apartado 2.4.4. La tasa de salida se calculará como el promedio de la diferencia entre los tiempos de salida de la muestra i y la muestra $i+1$, siendo $i > 1$. Estos tiempos se encuentran recogidos en el Anexo 5, 6 y 7 de este documento.

Serán los valores calculados a nivel del sistema (tiempo de ciclo, inventario medio y tasa de salida) los utilizados para llevar a cabo la validación entre nuestro sistema de producción y su modelo respecto a cada escenario intrínseco a cada tasa de producción. La comparativa expuesta entre ellos tendrá lugar en el siguiente capítulo y se respaldará a través del uso de diferentes gráficas.

Complementario a las comparaciones que realizaremos, se llevará a cabo un estudio referente a los fallos globales originados por la tecnología LEGO® Mindstorms® EV3. Gracias a ello recabaremos información sobre los fallos de todas las tasas de producción y escenarios asociados para focalizarlos en un solo análisis, ya que los fallos originados entre las tasas de producción son causados por la propia incertidumbre. Estudio que encontraremos en el apartado 7.4

7 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LAS TASAS DE PRODUCCIÓN

En este capítulo se llevará a cabo el desarrollo del análisis de las características fijas de los dos modelos propuestos, cuyo procedimiento se encuentra descrito en el apartado 6.4 y 6.5. A continuación, se desarrollarán los cálculos pertinentes respecto al análisis que se llevará a cabo en cada una de las 3 tasas de producción, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 6.6 y 6.7, y se realizará una conclusión del análisis de cada tasa de producción. Tras esto, se llevará a cabo una conclusión global de las 3 tasas de producción en las que se explicarán el origen de las posibles variaciones entre nuestro modelo y la experimentación. Por último, se realizará un estudio de los fallos tecnológicos a partir de los datos obtenidos de las tasas de producción usadas en el apartado 7.4.

7.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FIJAS DEL MODELO 1

A continuación, se procederá a la realización del cálculo de las variables características de nuestro modelo 1 y, posteriormente, ilustraremos la comparativa expresada en el apartado 4.1 entre el sistema real y dicho modelo. Antes de exponer los resultados presentamos el vector que representará el orden las estaciones:

$$\text{Vector estaciones} = [E1 ; E2 ; ER]$$

Siguiendo la metodología descrita en el apartado 6.4, se llevará a cabo el cálculo de las variables características de nuestro sistema, referentes al modelo 1. Estas variables son: flujo de entrada (λ), tiempo de servicio (TS), ¿proporción de flujo de entrada a la estación respecto a la tasa de entrada al sistema? (α), la congestión (ρ) y la tasa crítica de entrada al sistema (γ^*).

$$\lambda = [1 ; 1 ; 0,3]$$

$$T_s = [8 ; 6 ; 4]$$

$$\alpha(i) = [1 ; 1 ; \frac{3}{10}]$$

$$\rho = [8 ; 6 ; 1,2] * \gamma$$

Gracias al valor de los componentes del vector congestión, llegamos a la conclusión de que la estación que marca el límite de la estabilidad independientemente del tipo de escenario es la estación de procesado E1, por ser este el de mayor valor.

Tras esto, siguiendo el procedimiento del apartado 6.4, se calcula la tasa crítica de entrada del sistema gracias a la estación que marca el límite de la estabilidad, cuyo valor es el siguiente:

Para $\rho = 1$; $\gamma^* = \frac{1}{8}$ piezas/segundos

A continuación, gracias a la tasa crítica de entrada calculada, se define cuantitativamente la tasa de entrada de cada tasa de producción a partir del porcentaje de la capacidad del sistema descrito en el apartado 5.1. para, posteriormente, llevar a cabo la comparación entre la experimentación del sistema y los resultados teóricos de cada caso de estudio.

7.1.1 TASA DE PRODUCCIÓN 1: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA

Nuestra primera tasa de producción objeto de estudio, con la cual compararemos el modelo 1 de nuestro sistema de producción, se basa en una tasa de entrada al sistema de 1 pieza cada 30 segundos. Lo que, en relación con la tasa de entrada crítica calculada en el apartado 7.1, la cual marca el límite de la inestabilidad del sistema para dicho modelo, supone una capacidad del 26,67%. Esta entrada está modelada como una entrada manual y, por tanto, cuenta con una desviación típica asociada a la capacidad de reacción del ser humano aproximada a 1 segundo y, con ella, una variabilidad asociada. El cálculo de esta variabilidad fue explicado en el apartado 6.6.

A continuación, se expondrán los resultados de cada uno de los 3 escenarios de la tasa de producción 1 siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 6.6 y 6.7, y la comparativa con la experimentación asociada a cada uno de ellos.

7.1.1.1 ESCENARIO 1

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
E1	0,0011	0	0,001	0,2667	8	1	0,0016	8,0016
E2	0,0010	0	0,001	0,2	6	1	0,0008	6,0008
ER	0,7003	0	0,6992	0,04	4	0,3	0,0584	4,0584

Tabla 7.1- Cálculo de variables modelo 1 escenario 1 tasa de producción 1

ESCENARIO 1	ct_s (segundos)
Modelo Teórico	15,2199
Experimentación	65,9167

Tabla 7.2- Cálculo de variables de sistema modelo 1 escenario 1 tasa de producción 1

7.1.1.2 ESCENARIO 2

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
E1	0,0011	0,0156	0,0021	0,2667	8	1	0,0243	8,0243
E2	0,0021	0,0278	0,0032	0,2	6	1	0,0224	6,0224
ER	0,7009	0,0625	0,6999	0,04	4	0,3	0,0636	4,0636

Tabla 7.3- Cálculo de variables del modelo 1 escenario 2 tasa de producción 1

ESCENARIO 2	cts (segundos)
Modelo Teórico	15,2659
Experimentación	67,0833

Tabla 7.4- Cálculo de variables de sistema modelo 1 escenario 2 tasa de producción 1

7.1.1.3 ESCENARIO 3

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
E1	0,0011	0,0104	0,0018	0,2667	8	1	0,0168	8,0168
E2	0,0018	0,0185	0,0024	0,2	6	1	0,0152	6,0152
ER	0,7007	0,0104	0,6996	0,04	4	0,3	0,0593	4,0593

Tabla 7.5- Cálculo de variables modelo 1 escenario 3 tasa de producción 1

ESCENARIO 3	cts (segundos)
Modelo Teórico	15,2498
Experimentación	65,7917

Tabla 7.6- Cálculo de variables de sistema modelo 1 escenario 3 tasa de producción 1

Gracias a las tablas 7.2, 7.4 y 7.6, obtenemos las siguientes gráficas, respectivamente:

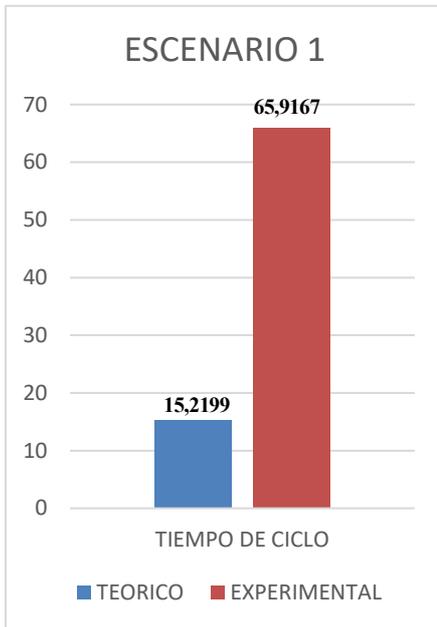


Figura 7.1- Tiempo de ciclo del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 1

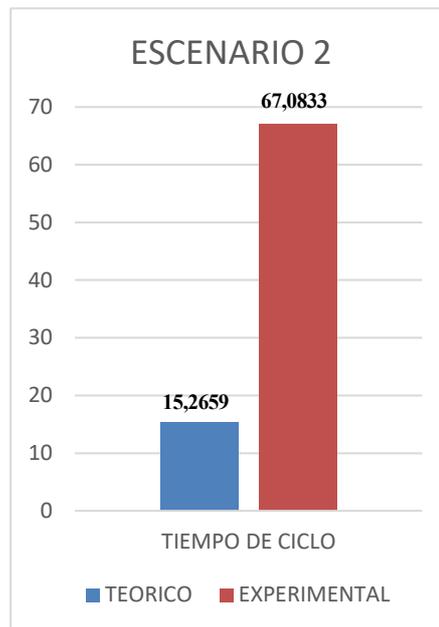


Figura 7.2- Tiempo de ciclo del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 1

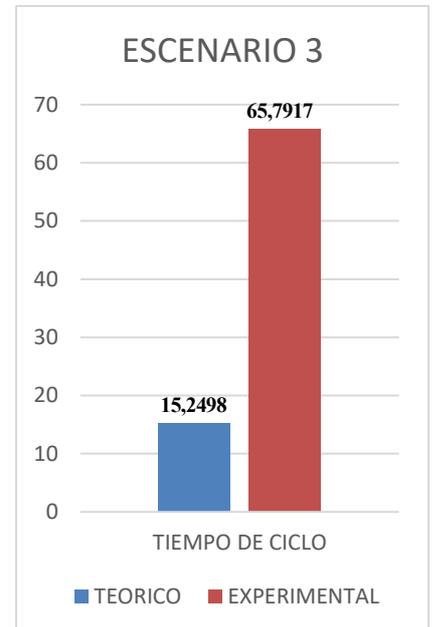


Figura 7.3- Tiempo de ciclo del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 1

7.1.2 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DEL MODELO 1

Como podemos observar en las gráficas referentes a las figuras 7.1, 7.2 y 7.3, referidas a la tasa de producción 1:

- El tiempo de ciclo de nuestro modelo teórico 1 en el escenario 1 es de 15,2199 segundos respecto al tiempo de ciclo de la experimentación de valor 65,9167 segundos, es decir, el tiempo de ciclo de nuestro modelo 1 representa el 23,08959% del tiempo de ciclo de la experimentación.
- Para el escenario 2, el tiempo de ciclo del modelo teórico 1 es de 15,2659 segundo y el de la experimentación de 67,08333 segundos, es decir, el tiempo de ciclo del modelo 1 representa el 22,7566% del tiempo de ciclo de la experimentación para este escenario.
- Finalmente, el tiempo de ciclo del modelo teórico 1 en el escenario 3, sabiendo que el tiempo de ciclo de este es 15,2498 segundos y el de la experimentación es de 65,7917 segundos, representa el 23,1789% del tiempo de ciclo de la experimentación.

Con estos datos obtenidos de la tasa de producción 1 y con el uso exclusivo de solo dicha tasa de producción, podemos llegar de manera trivial a la conclusión de que el modelo 1 no representa lo que está ocurriendo realmente en el sistema de producción.

Si observamos los valores que cuantifican la magnitud de los tiempos de ciclo del modelo 1 respecto a dichos tiempos medidos en la experimentación de los 3 escenarios, los tiempos del modelo 1 no representan ni el 25% del valor de los tiempos de la experimentación. A pesar de ello, comprobamos como el escenario 3 se asemeja más al real. Para llegar a esta conclusión, hemos realizado una comparativa únicamente entre

los distintos tiempos de ciclo de los escenarios propuestos, ya que, como se muestra en el apartado 6.7 sobre el cálculo de las variables de estado del sistema, la variable inventario medio en proceso (w_s) depende de dicho tiempo de ciclo. Es por ello que mantenemos la misma conclusión aun cumpliéndose la tasa de salida (th), puesto que esta no depende del tiempo de ciclo. Además, se han realizado los cálculos pertinentes a cada escenario, aun observando en el primero de estos la clara diferencia entre el orden de magnitud de los valores obtenidos, con el fin demostrar que la conclusión a la que llegamos no viene impuesta por los diferentes escenarios. Por lo tanto, se reafirma la necesidad de plantear un segundo modelo en el que se incluyan los tiempos de transporte, y así estos dejen de considerarse instantáneos, como ya adelantamos en el capítulo 4, ya que consideramos que estos tiempos son los culpables de las desviaciones que se producen en los tiempos de ciclo.

7.2 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FIJAS DEL MODELO 2

Tras el análisis y las conclusiones expuestas en el apartado anterior y como ya adelantamos en el capítulo 4, tenemos la necesidad de modelar los tiempos de transporte del sistema de producción. Este apartado, por tanto, tiene como objetivo el estudio teórico de las variables que caracterizan nuestro sistema, las cuales vienen definidas por las características intrínsecas de este.

Antes de comenzar, detallamos el vector a utilizar según el orden de las estaciones establecido con la novedad del modelado de las estaciones de transporte:

$$\text{Vector estaciones} = [T1 ; E1 ; T2 ; E2 ; T3 ; ER ; TR ; TNR ; TF]$$

De la misma forma que en el apartado 7.1, procederemos a presentar las variables características de nuestro sistema de producción referenciadas al modelo 2. Dichas variables comentadas son: flujo de entrada de los productos PF y PNF (λ_F y λ_{NF}), tiempo de servicio de producto equivalente (T_s), proporción de flujo de entrada a la estación respecto a la tasa de entrada al sistema (α), congestión (ρ) y tasa crítica de entrada al sistema (γ^*). El procedimiento establecido para el cálculo de estas viene debidamente expresado en el apartado 6.5.

$$\lambda_F = \left[\frac{4}{9} ; \frac{4}{9} ; \frac{4}{9} ; \frac{4}{9} ; \frac{4}{9} ; \frac{2}{15} ; \frac{2}{15} ; \frac{14}{45} ; \frac{4}{9} \right]$$

$$\lambda_{NF} = \left[\frac{5}{9} ; \frac{5}{9} ; \frac{5}{9} ; \frac{5}{9} ; \frac{5}{9} ; \frac{1}{6} ; \frac{1}{6} ; \frac{7}{18} ; \frac{5}{9} \right]$$

$$\lambda = \left[1 ; 1 ; 1 ; 1 ; 1 ; \frac{3}{10} ; \frac{3}{10} ; \frac{7}{10} ; 1 \right]$$

$$t_F = [11,1528 ; 8 ; 19,6296 ; 6 ; 11,1 ; 4 ; 8,6667 ; 8,7692 ; 4,0833]$$

$$t_{NF} = [11,1528 ; 8 ; 17,6239 ; 6 ; 10,3955 ; 4 ; 7,9118 ; 7,6629 ; 3,6667]$$

$$T_s = [11,1528 ; 8 ; 18,5153 ; 6 ; 10,7086 ; 4 ; 8,2473 ; 8,1546 ; 3,8519]$$

$$\alpha(i) = [1 ; 1 ; 1 ; 1 ; 1 ; \frac{3}{10} ; \frac{3}{10} ; \frac{7}{10} ; 1]$$

$$\rho = [11,1528 ; 8 ; 18,5153 ; 6 ; 10,7086 ; 1,2 ; 2,4742 ; 5,7082 ; 3,8519] * \gamma$$

Gracias al valor de los componentes del vector congestión, llegamos a la conclusión de que la estación que marca el límite de la estabilidad independientemente del tipo de escenario es la estación de transporte T2, por ser este el de mayor valor.

Tras esto, siguiendo el procedimiento del apartado 6.5, se calcula la tasa crítica de entrada del sistema gracias a la estación que marca el límite de la estabilidad, cuyo valor es el siguiente:

$$\text{Para } \rho = 1; \gamma^* = \frac{1}{18,5153} \text{ piezas/segundos}$$

A continuación, gracias a la tasa crítica de entrada calculada, se define cuantitativamente cada tasa de producción a partir del porcentaje de la capacidad del sistema descrito en el apartado 5.1 para, posteriormente, llevar a cabo la comparación entre la experimentación del sistema y los resultados teóricos de cada caso de estudio.

7.2.1 TASA DE PRODUCCIÓN 1: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA

Nuestra primera tasa de producción objeto de estudio del modelo 2 se basa en una tasa de entrada al sistema de 1 pieza cada 30 segundos, manteniendo de esta forma la misma tasa de entrada fijada en la tasa de producción 1 del primer modelo. En relación con la tasa de entrada crítica calculada en el apartado 7.2, la cual marca el límite de la inestabilidad del sistema, supone una capacidad del 61,70%. Esta entrada está modelada como una entrada manual y, por tanto, cuenta con una desviación típica asociada a la capacidad de reacción del ser humano aproximada a 1 segundo y, con ella, una variabilidad asociada. El cálculo de esta variabilidad fue explicado en el apartado 6.6.

A continuación, se expondrán los resultados de cada uno de los 3 escenarios de la tasa de producción 1 siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 6.6, donde las tablas 7.7, 7.9 y 7.11 recogerán los resultados de las variables de estado para cada una de las estaciones. El cálculo de las variables del sistema del modelo 2 para la posterior comparativa con la experimentación asociada a cada uno de los escenarios, cuyos datos se encuentran recogidos en las tablas 7.8, 7.10 y 7.12, se realizará a partir del procedimiento del apartado 6.7. Buscando con esto discernir sobre la veracidad del modelo propuesto respecto a estos comportamientos observados.

7.2.1.1 ESCENARIO 1

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
T1	0,0011	0	0,001	0,3717	11,1528	1	0,0037	11,1565
E1	0,001	0	0,0009	0,2667	8	1	0,0014	8,0014
T2	0,0009	0,0078	0,0035	0,6171	18,5153	1	0,1297	18,645
E2	0,0035	0	0,0034	0,2	6	1	0,0026	6,0026
T3	0,0034	0,0015	0,0031	0,357	10,7086	1	0,0144	10,723
ER	0,7009	0	0,6998	0,04	4	0,3	0,0584	4,0584
TR	0,6998	0,0064	0,6951	0,0825	8,2473	0,3	0,2618	8,5091
TNR	0,3022	0,0092	0,2916	0,1903	8,1546	0,7	0,2983	8,4529
TF	0,8253	0,0054	0,8118	0,1284	3,8519	1	0,2357	4,0875

Tabla 7.7- Cálculo de variables modelo 2 escenario 1 tasa de producción 1

ESCENARIO 1	cts (segundos)	ws (piezas)	th (piezas/segundo)
Modelo Teórico	68,3033	2,2768	1/30
Experimentación	65,9167	2,1972	1/29,9565

Tabla 7.8- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 1 tasa de producción 1

Gracias a la tabla 7.8, obtenemos las siguientes gráficas referentes a las variables del sistema:

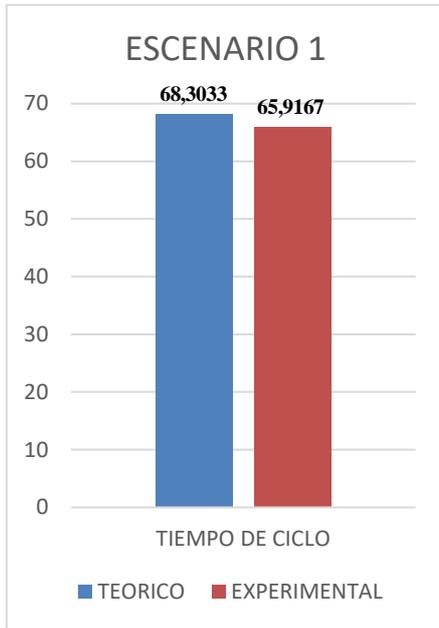


Figura 7.4- Tiempo de ciclo del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 2

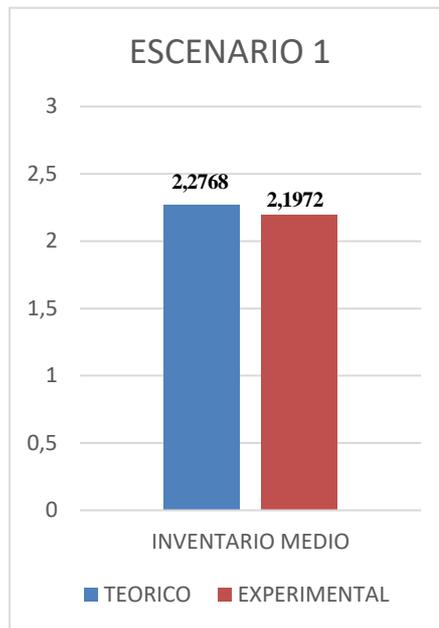


Figura 7.5- Inventario medio en proceso del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 2

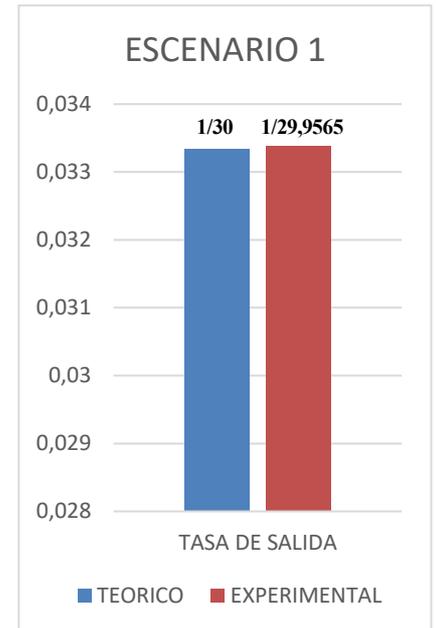


Figura 7.6- Tasa de salida del escenario 1 de tasa de producción 1 del modelo 2

7.2.1.2 ESCENARIO 2

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
T1	0,0011	0	0,001	0,3718	11,1528	1	0,0037	11,1565
E1	0,001	0,0156	0,002	0,2667	8	1	0,0241	8,0241
T2	0,002	0,0078	0,0042	0,6172	18,5153	1	0,1463	18,6616
E2	0,0042	0,0278	0,0052	0,2	6	1	0,024	6,024
T3	0,0052	0,0015	0,0047	0,357	10,7086	1	0,0196	10,7283
ER	0,7014	0,0625	0,7004	0,04	4	0,3	0,0637	4,0637
TR	0,7004	0,0064	0,6957	0,0825	8,2473	0,3	0,262	8,5093
TNR	0,3033	0,0092	0,2926	0,1903	8,1546	0,7	0,2994	8,4539
TF	0,8271	0,0054	0,8135	0,1284	3,8519	1	0,2362	4,088

Tabla 7.9- Cálculo de variables modelo 2 escenario 2 tasa de producción 1

ESCENARIO 2	ct _s (segundos)	w _s (piezas)	th (piezas/segundo)
Modelo Teórico	68,3721	2,2791	1/30
Experimentación	67,0833	2,2153	1/29,7826

Tabla 7.10- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 2 tasa de producción 1

Gracias a la tabla 7.10, obtenemos las siguientes gráficas referentes a las variables del sistema:

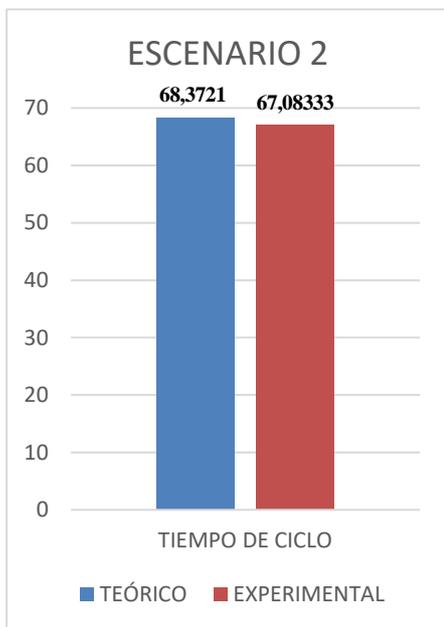


Figura 7.7- Tiempo de ciclo del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 2

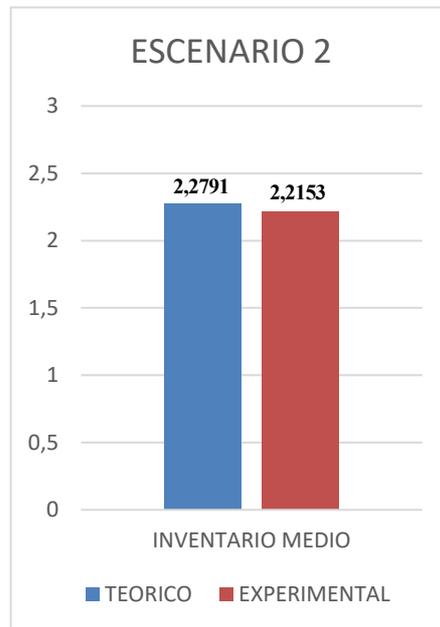


Figura 7.8- Inventario medio en proceso del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 2

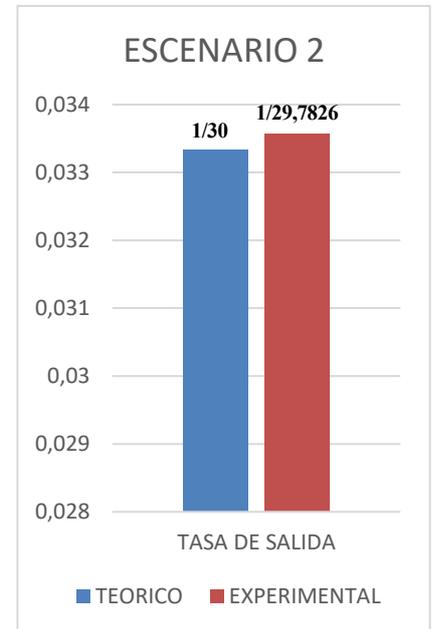


Figura 7.9- Tasa de salida del escenario 2 de tasa de producción 1 del modelo 2

7.2.1.3 ESCENARIO 3

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
T1	0,0011	0	0,001	0,3718	11,1528	1	0,0037	11,1565
E1	0,001	0,0104	0,0016	0,2667	8	1	0,0165	8,0165
T2	0,0016	0,0078	0,004	0,6172	18,5153	1	0,1407	18,656
E2	0,004	0,01852	0,0046	0,2	6	1	0,0169	6,0169
T3	0,0046	0,0015	0,0042	0,357	10,7086	1	0,0179	10,7265
ER	0,7012	0,01	0,7001	0,04	4	0,3	0,0593	4,0593
TR	0,7001	0,0064	0,6954	0,0825	8,2473	0,3	0,2619	8,5092
TNR	0,3029	0,0092	0,2923	0,1903	8,1546	0,7	0,299	8,4536
TF	0,8264	0,0054	0,8129	0,1284	3,8519	1	0,236	4,0879

Tabla 7.11- Cálculo de variables modelo 2 escenario 3 tasa de producción 1

ESCENARIO 3	cts (segundos)	ws (piezas)	th (piezas/segundo)
Modelo Teórico	68,3484	2,2783	1/30
Experimentación	65,7917	2,1931	1/30,1304

Tabla 7.12- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 3 tasa de producción 1

Gracias a la tabla 7.12, obtenemos las siguientes gráficas referentes a las variables del sistema:

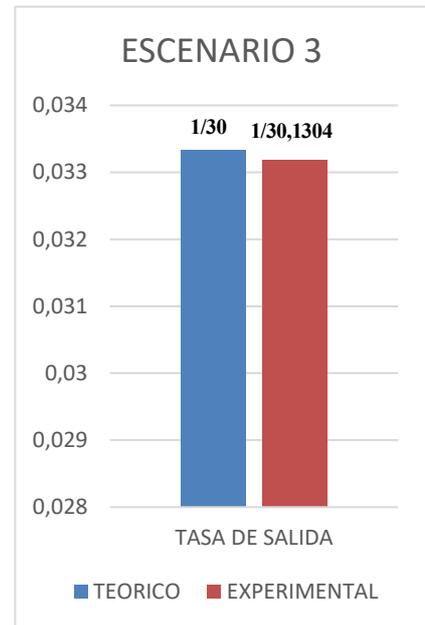
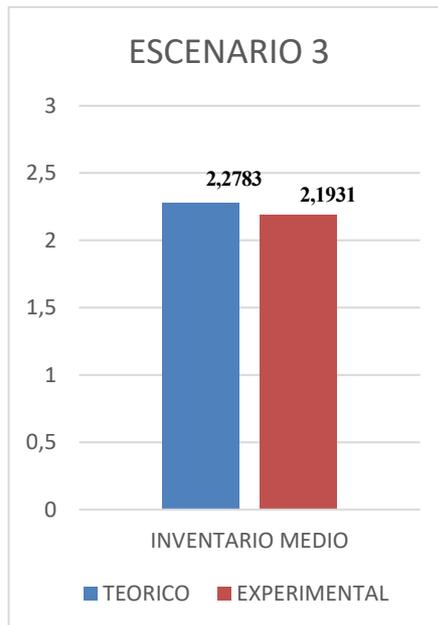
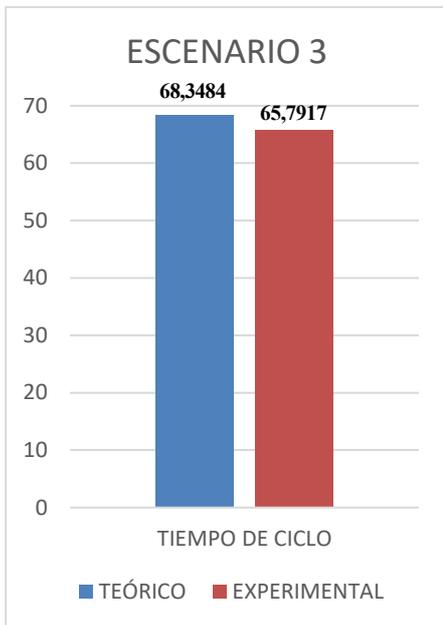


Figura 7.10- Tiempo de ciclo del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 2

Figura 7.11- Inventario medio en proceso del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 2

Figura 7.12- Tasa de salida del escenario 3 de tasa de producción 1 del modelo 2

7.2.1.4 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 1

A continuación, pasaremos a comentar los resultados obtenidos en los 3 escenarios de la tasa de producción 1 respecto al modelo 2. Para ello, haremos uso de las figuras anteriores que encontramos en cada uno de los análisis de cada escenario respecto a la tasa de producción 1:

Como podemos observar en las figuras anteriormente mostradas en el escenario 1, los valores de las variables de estado del sistema se asemejan a las teóricas estudiadas para el modelo. Las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso de la experimentación en comparación a las obtenidas a partir del modelo 2 presenta una desviación del 3,4941%. Mientras que, para la variable tasa de salida, presenta una desviación existente del 0,145%.

Para el caso del escenario 2, las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso presentan una desviación del 1,885% entre el modelo teórico 2 y la experimentación. Para la variable tasa de salida, la desviación entre el modelo 2 y la experimentación es del 0,7247%.

En el escenario 3, las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso presentan, entre el modelo teórico 2 y la experimentación, una desviación del 3,7407%. Mientras que la desviación de la tasa de salida es del 0,4328%. Debemos añadir que encontramos una pequeña anomalía en la tasa de salida de la experimentación, ya que el tiempo de ciclo de esta, al ser más pequeño que el teórico (figura 7.10), debería reflejar una tasa de salida mayor en comparación con la teórica, hecho el cual no ocurre y que podemos visualizar en la figura 7.12.

Estas desviaciones encontradas en los valores comentados se deben tanto a la hipótesis de modelado propuesta como a ciertas casuísticas que explicaremos en la conclusión del apartado 7.3.

Una vez que tenemos calculados los porcentajes de las discrepancias entre las variables de estado del sistema, observamos como, las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso en el escenario 2, presentan el menor porcentaje de desviación de los 3 escenarios. Por el contrario, dicho escenario presenta la mayor discrepancia respecto a la variable tasa de salida. Es el escenario 1 el que muestra menor variación entre estos valores de dicha variable en la experimentación y en el modelo 2.

7.2.2 TASA DE PRODUCCIÓN 2: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA

Nuestra segunda tasa de producción objeto de estudio se basa en una tasa de entrada al sistema de 1 pieza cada 20 segundos. Lo que, en relación con la tasa de entrada crítica calculada en el apartado 7.2, la cual marca el límite de la inestabilidad del sistema, supone una capacidad del 92,55%. Esta tasa de producción sigue la línea marcada en el apartado 5.1 de una tasa de entrada cercana al valor de la tasa de entrada crítica del propio modelo. Al igual que en la tasa de producción anterior, la entrada está modelada como una entrada manual y, por tanto, cuenta con una desviación típica asociada a la capacidad de reacción del ser humano aproximada a 1 segundo y, con ella, una variabilidad asociada. El cálculo de esta variabilidad fue explicado en el apartado 6.6.

Siguiendo la estructura de análisis propuesta en la tasa de producción 1, se detallarán los resultados referentes a los 3 escenarios de la tasa de producción 2, siguiendo el procedimiento expuesto en el apartado 6.6, donde los resultados de las variables de estado para cada una de las estaciones se expondrán en las tablas 7.13, 7.15 y 7.17, mientras que los resultados de la comparativa con la experimentación asociada a cada uno de ellos, procedimiento explicado en el apartado 6.7 de este documento, se encontrarán recogida en las tablas 7.14, 7.16 y 7.18.

El objetivo de la tasa de producción 2 es comprobar a través del valor marcado en la tasa de entrada, muy cercano al límite de la estabilidad ya expuesto en el apartado 7.2, que el modelo 2 propuesto sigue representando fielmente el comportamiento real del sistema de producción

7.2.2.1 ESCENARIO 1

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
T1	0,0025	0	0,0017	0,5576	11,1528	1	0,0176	11,1704
E1	0,0017	0	0,0014	0,4	8	1	0,0046	8,0046
T2	0,0014	0,0078	0,0068	0,9258	18,5153	1	1,0674	19,5828
E2	0,0069	0	0,0063	0,3	6	1	0,0089	6,0089
T3	0,0063	0,0015	0,0049	0,5354	10,7086	1	0,0477	10,7563
ER	0,7015	0	0,6989	0,06	4	0,3	0,0896	4,0895
TR	0,6989	0,0064	0,6883	0,1237	8,2473	0,3	0,4106	8,6579
TNR	0,3034	0,0092	0,2795	0,2854	8,1546	0,7	0,5091	8,6636
TF	0,8042	0,0054	0,7746	0,1926	3,8519	1	0,3719	4,2238

Tabla 7.13- Cálculo de variables modelo 2 escenario 1 tasa de producción 2

ESCENARIO 1	ct_s (segundos)	w_s (piezas)	th (piezas/segundo)
Modelo Teórico	69,6355	3,4818	1/20
Experimentación	66,125	3,3208	1/20

Tabla 7.14- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 1 tasa de producción 2

Gracias a la tabla 7.14, obtenemos las siguientes gráficas referentes a las variables del sistema:

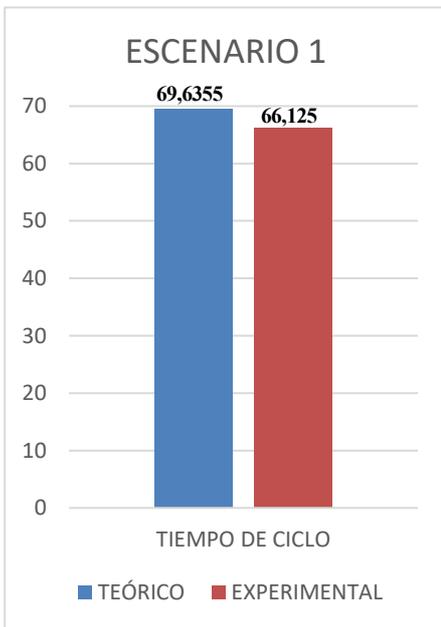


Figura 7.13- Tiempo de ciclo del escenario 1 de tasa de producción 2 del modelo 2

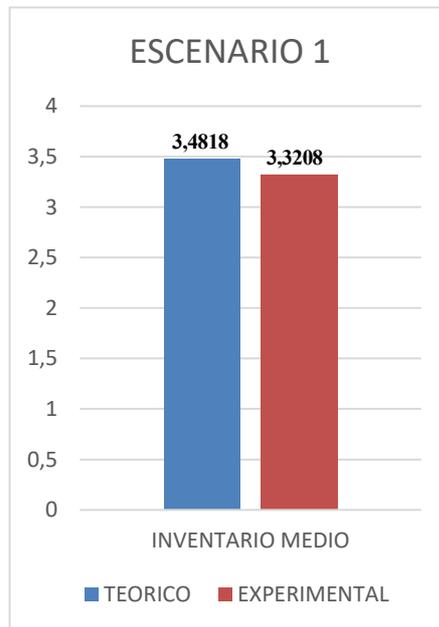


Figura 7.14- Inventario medio en proceso del escenario 1 de tasa de producción 2 del modelo 2

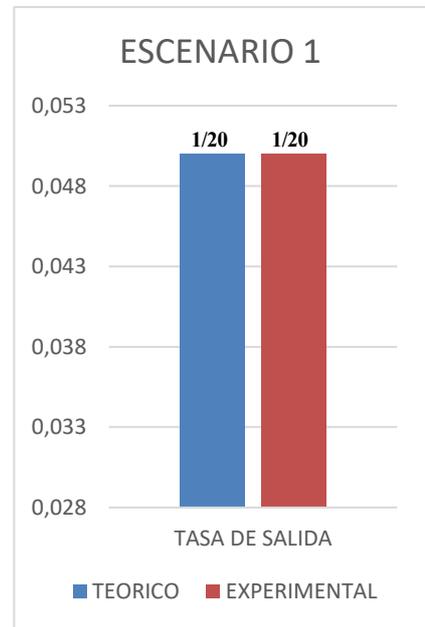


Figura 7.15- Tasa de salida del escenario 1 de tasa de producción 2 del modelo 2

7.2.2.2 ESCENARIO 2

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
T1	0,0025	0	0,0017	0,5576	11,1528	1	0,0176	11,1704
E1	0,0017	0,0156	0,0039	0,4	8	1	0,0463	8,0463
T2	0,0039	0,0078	0,0072	0,9258	18,5153	1	1,3561	19,8714
E2	0,0072	0,0278	0,0091	0,3	6	1	0,045	6,045
T3	0,0091	0,0015	0,0069	0,5354	10,7086	1	0,0651	10,7737
ER	0,7021	0,0625	0,6998	0,06	4	0,3	0,0976	4,0976
TR	0,6998	0,0064	0,6892	0,1237	8,2473	0,3	0,4111	8,6584
TNR	0,3048	0,0092	0,2807	0,2854	8,1546	0,7	0,5114	8,6659
TF	0,8065	0,0054	0,7768	0,1926	3,8519	1	0,373	4,2249

Tabla 7.15- Cálculo de variables modelo 2 escenario 2 tasa de producción 2

ESCENARIO 2	ct_s (segundos)	w_s (piezas)	th (piezas/segundo)
Modelo Teórico	70,0246	3,5012	1/20
Experimentación	68,5417	3,4271	1/19,7391

Tabla 7.16- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 2 tasa de producción 2

Gracias a la tabla 7.16, obtenemos las siguientes gráficas referentes a las variables del sistema:

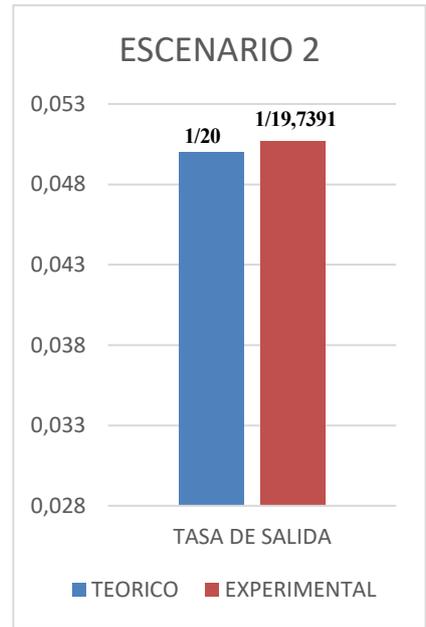
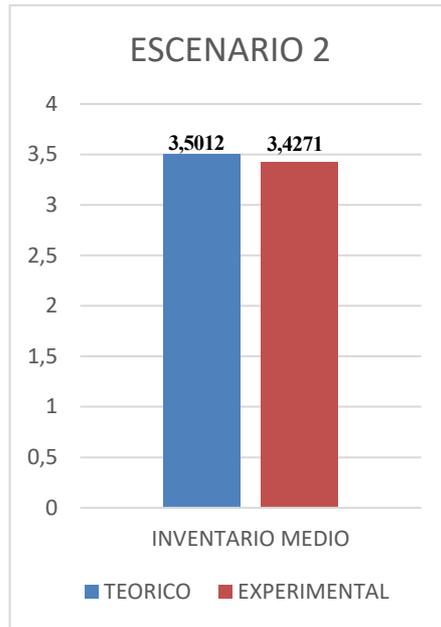
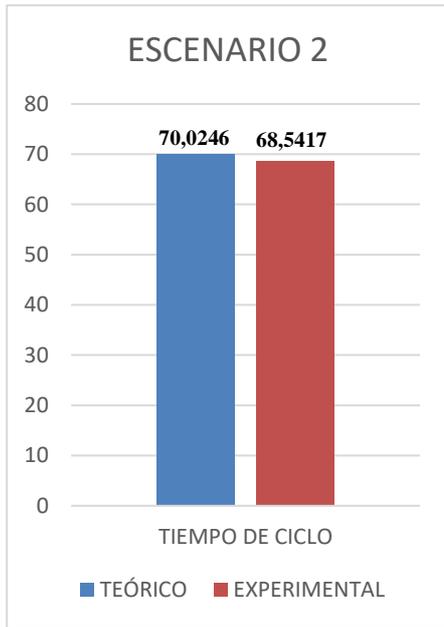


Figura 7.16- Tiempo de ciclo del escenario 2 de tasa de producción 2 del modelo 2

Figura 7.17- Inventario medio en el proceso del escenario 2 de tasa de producción 2 del modelo 2

Figura 7.18- Tasa de salida del escenario 2 de tasa de producción 2 del modelo 2

7.2.2.3 ESCENARIO 3

	$\Theta_a(i)$	$\Theta_s(i)$	$\Theta_d(i)$	$\rho(i)$	T_s	$\alpha(i)$	$qt(i)$	$ct(i)$
T1	0,0025	0	0,0017	0,5576	11,1528	1	0,0176	11,1704
E1	0,0017	0,0104	0,0031	0,4	8	1	0,0324	8,0324
T2	0,0031	0,0078	0,0071	0,9258	18,5153	1	1,2599	19,7752
E2	0,0071	0,0185	0,0082	0,3	6	1	0,033	6,033
T3	0,0082	0,0015	0,0062	0,5354	10,7086	1	0,0593	10,7679
ER	0,7019	0,0104	0,6994	0,06	4	0,3	0,0909	4,0909
TR	0,6994	0,0064	0,6888	0,1237	8,2473	0,3	0,4109	8,6582
TNR	0,3044	0,0092	0,2803	0,2854	8,1546	0,7	0,5106	8,6652
TF	0,8057	0,0054	0,776	0,1926	3,8519	1	0,3726	4,2245

Tabla 7.17- Cálculo de variables modelo 2 escenario 3 tasa de producción 2

ESCENARIO 3	cts (segundos)	ws (piezas)	th (piezas/segundo)
Modelo Teórico	69,8937	3,4947	1/20
Experimentación	67,4167	3,3854	1/20,1739

Tabla 7.18- Cálculo de variables de sistema modelo 2 escenario 3 tasa de producción 2

Gracias a la tabla 7.18, obtenemos las siguientes gráficas referentes a las variables del sistema:

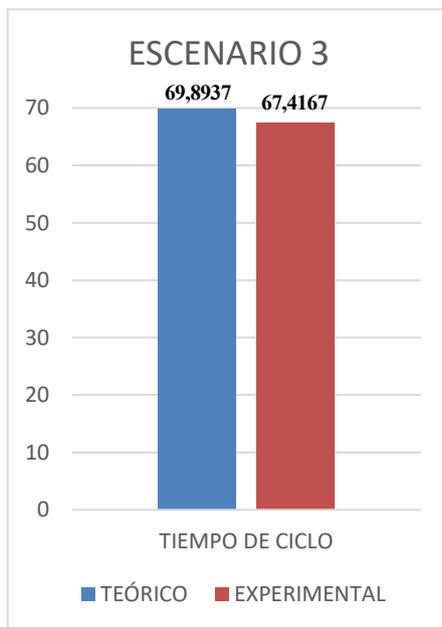


Figura 7.19- Tiempo de ciclo del escenario 3 de tasa de producción 2 del modelo 2

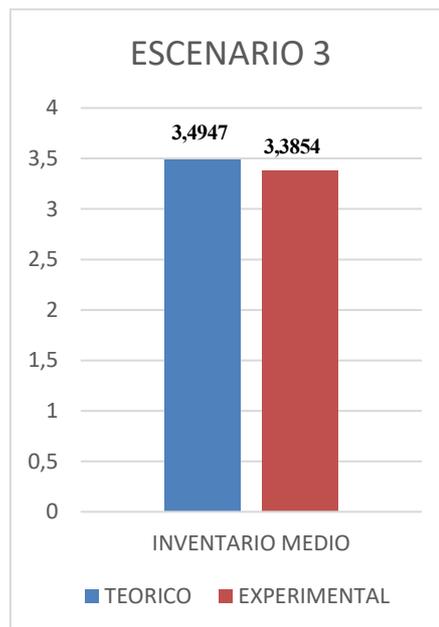


Figura 7.20- Inventario medio en proceso del escenario 3 de tasa de producción 2 del modelo 2

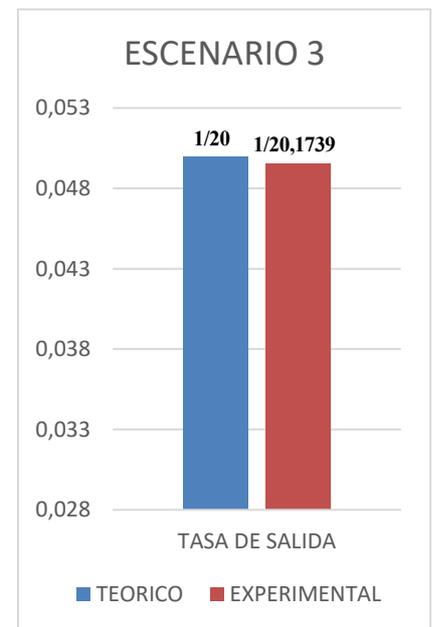


Figura 7.21- Tasa de salida del escenario 3 de tasa de producción 2 del modelo 2

7.2.2.4 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 2

A continuación, pasaremos a comentar los resultados obtenidos en los 3 escenarios de la tasa de producción 2 respecto al modelo 2. Para ello, haremos uso de las figuras anteriores que encontramos en cada uno de los análisis de cada escenario respecto a la tasa de producción 2:

Como podemos observar las figuras anteriormente expuestas en el escenario 1, los valores de las variables de estado del sistema, al igual que ocurría en la anterior tasa de producción, se asemejan a las teóricas estudiadas para el modelo. En las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso de la experimentación en comparación a las obtenidas a partir del modelo 2 se observa una desviación del 5,0413%. Mientras que, para la variable tasa de salida, observamos una desviación del 0%.

Para el caso del escenario 2, las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso presentan una desviación del 2,1177% entre el modelo teórico 2 y la experimentación. Para la variable tasa de salida, la desviación entre el modelo 2 y la experimentación es del 1,3045%.

En el escenario 3, de igual forma, la desviación existente en las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso es del 3,544%. Mientras que la desviación en la variable tasa de salida es del 0,862%. De nuevo, se repite la anomalía comentada en la tasa de producción anterior, donde la tasa de salida de la experimentación debería reflejar un valor mayor en comparación con el teórico, debido a que el tiempo de ciclo de la experimentación es más pequeño que el teórico (figura 7.19). Dicha anomalía se puede ver reflejada en la figura 7.21.

Estas desviaciones encontradas en los valores comentados se deben tanto a la hipótesis de modelado propuesta como a ciertas casuísticas que explicaremos en la conclusión del apartado 7.3.

De las discrepancias calculadas de la tasa de producción 2, podemos deducir que las variables tiempo de ciclo e inventario medio en el escenario 2, presentan el menor porcentaje de desviación de los 3 escenarios. Por el contrario, dicho escenario presenta la mayor discrepancia respecto a la variable tasa de salida. En cambio, el escenario 1 no presenta ninguna variabilidad respecto a los valores de la tasa de salida entre la experimentación y el modelo 2.

7.2.3 TASA DE PRODUCCIÓN 3: ESTUDIO TEÓRICO Y COMPARATIVA

Nuestra tercera tasa de producción objeto de estudio se basa en una tasa de entrada de 1 pieza cada 10 segundos lo que implica una capacidad del 185,10%. Esta tasa de producción continúa con el pensamiento propuesto en el apartado 5.1 de una tasa de entrada que sobrepase el valor crítico de esta, valor expuesto en el apartado 7.2, llevando al sistema hacia una situación de inestabilidad. A continuación, pasaremos a comprobar la única característica teórica cuantificable en este tipo de situaciones, se trata de la variable tasa de salida. Además, gracias a la recogida de datos en base a la experimentación, verificaremos y observaremos las características que definen a este tipo de sistemas.

7.2.3.1 ANÁLISIS DE LOS 3 ESCENARIOS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 3

Según las características fijas del modelo 2, expresadas en el apartado 7.2, teníamos conocimiento de que, si nuestro modelo se comportaba como el sistema de producción real, estábamos antes un comportamiento inestable por parte de este, como ya hemos adelantado en la introducción de este apartado.

Debido a la inestabilidad, sabemos que todas las ecuaciones expuestas en el capítulo 2 no podrían emplearse. Es por ello por lo que no podemos realizar un estudio basado en el análisis de las variables de estado asociadas a las estaciones del modelo 2, como habíamos llevado a cabo en las dos tasas de producción anteriores.

A continuación, se ilustrará la tendencia que sigue el valor del tiempo de ciclo según los datos de la experimentación, concordando con las características adelantadas en el apartado 2.4.4. De esta forma, a través de la figura 7.22, demostramos cuantitativamente el comportamiento descrito.



Figura 7.22-Gráfica del tiempo de ciclo de las muestras de los 3 escenarios de tasa de producción 3 del modelo 2

Gracias a la experimentación en nuestro sistema en base a la tasa de producción 3, analizaremos la única variable de estado posible a nivel de sistema, la cual se trata de la tasa de salida del sistema, como ya fue adelantado en la introducción de este apartado. A continuación, expondremos en la tabla 7.19 el valor de dicha variable en el

modelo en comparación con los valores de la misma registrado hacia la experimentación de los 3 escenarios. Para el cálculo de la tasa de salida del modelo nos basamos en el concepto de sistema inestable, explicado al final del apartado 2.4.4. Es debido a esto que la tasa de salida del modelo 2 viene impuesta por el valor de la capacidad de la estación T2, ya que se trata de aquella con el valor mayor de congestión en el modelo, como se expuso en el apartado 7.2.

		TASA DE PRODUCCIÓN 3	th (piezas/segundo)
EXPERIMENTACIÓN		MODELO TEÓRICO	1/18,5133
		ESCENARIO 1	1/15,2857
		ESCENARIO 2	1/14
		ESCENARIO 3	1/14,7857

Tabla 7.19-Cálculo de la variable tasa de salida del modelo 2 tasa de producción 3

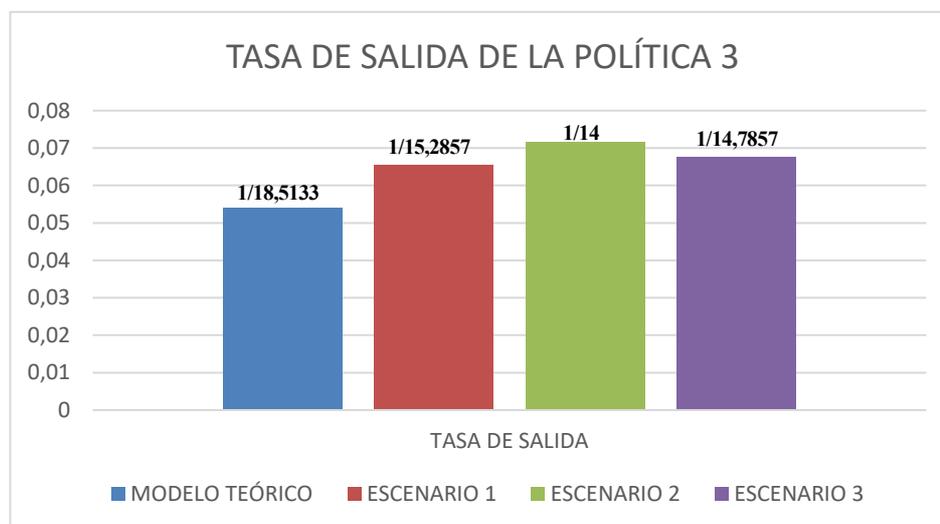


Figura 7.23-Gráfica de la tasa de salida de los 3 escenarios de la tasa de producción 3 del modelo 2

7.2.3.2 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 3

Como podemos observar de los datos de la tabla 7.19 y ver gráficamente gracias a la figura 7.23, observamos un valor de la tasa de salida ligeramente superior en la experimentación de los 3 escenarios, en comparación con el valor de la tasa de salida del modelo 2. El valor de la tasa de salida del escenario 1 con respecto al modelo 2 presenta una desviación del 17,4334%, siendo este escenario el que menor desviación presenta. Mientras, el escenario 2 presenta una desviación del 24,3787%. Por último, el escenario 3 presenta una desviación del 20,1347%. Este hecho viene dado por la limitación física sufrida en la experimentación, la cual nos hizo reducir el número de muestras de 24, como en las dos tasas de producción anteriores, a 15. Debido a esto entendemos que no cumplimos con lo explicado en el Teorema Central del Límite y que, en caso de régimen permanente, el valor de la tasa de salida de nuestro sistema elevaría un valor más cercano al marcado por nuestro modelo. Aun así, la mayor desviación registrada entre la experimentación y el valor teórico es menor del 25%, por lo que entendemos que con un mayor número de muestras esta diferenciación tendería a reducirse.

7.3 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DE LAS TASAS DE PRODUCCIÓN

Gracias a las comparativas realizadas en cada una de las tasas de producción, podemos observar que las variables de estado que gobiernan el sistema en el modelo 2 (tiempo de ciclo, inventario medio en proceso y tasa de salida) presentan sutiles desviaciones en comparación con los valores de estas variables registrados en la experimentación en base a distintos los escenarios. Pese a ello, llegamos a la conclusión de que comparando las tasas de producción 1 y 2, ya que la tasa de producción 3 se encuentra fuera de la estabilidad del sistema, es la primera de estas la que menor porcentaje de desviación presenta en las variables de estado que gobiernan el sistema, como se expone en la tabla 7.20

	DESVIACIÓN EXPERIMENTACIÓN- MODELO 2	TASA DE PRODUCCIÓN 1	TASA DE PRODUCCIÓN 2	TASA DE PRODUCCIÓN 3
ESCENARIO 1	TIEMPO DE CICLO	3,4941 %	5,0413 %	
	INVENTARIO MEDIO EN PROCESO	3,4941 %	5,0413 %	
	TASA DE SALIDA	0,145 %	0 %	17,4334 %
ESCENARIO 2	TIEMPO DE CICLO	1,885 %	2,1177 %	
	INVENTARIO MEDIO EN PROCESO	1,885 %	2,1177 %	
	TASA DE SALIDA	0,7247 %	1,3045 %	24,3787 %
ESCENARIO 3	TIEMPO DE CICLO	3,7407 %	3,544 %	
	INVENTARIO MEDIO EN PROCESO	3,7407 %	3,544 %	
	TASA DE SALIDA	0,4328 %	0,862 %	20,1247 %

Tabla 7.20- Porcentaje de desviación de variables del sistema para tasas de producción 1, 2 y 3

Siguiendo con la comparación dentro de cada tasa de producción y ayudándonos de la tabla 7.20, observamos como las variables tiempo de ciclo e inventario medio en proceso de nuestro modelo teórico presentan menor desviación en el escenario 2, independientemente de la tasa de producción. Por tanto, llegamos a la conclusión de que nuestro modelo se asemeja más a dicho escenario en la realidad. Por otro lado, la variable tasa de salida del modelo 2 presenta menor desviación respecto al escenario 1 en las 3 tasas de producción, llegando incluso a no contemplar ninguna desviación entre el modelo 2 y dicho escenario 1 en la tasa de producción 2.

Como ya hemos expuestos en este mismo apartado, los valores de la experimentación con el modelo 2 presentan ciertas desviaciones, entendemos que estas se deben a una serie de casuísticas adoptadas durante la configuración del modelo 2 y que explicaremos a continuación:

- Los tiempos de las estaciones de transporte fueron modelados de tal forma que la variabilidad propia de estos se calculaba en base a la variación de dichos tiempos, variación producida por los fallos que sufrían las piezas y cuyos datos están expuestos en la tabla 6.2. En cambio, se entendió que a las piezas que no sufrían fallos se les asociaba un tiempo de servicio fijo y que, por consiguiente, no experimentaban dicha desviación, como muestra la tabla 6.1. A partir de esta hipótesis, podemos deducir que las desviaciones de las variables de estado pueden ser debidas, en parte, al hecho de no haber tenido en cuenta la variabilidad existente en los tiempos de servicios de las estaciones de transporte de las piezas que no sufren fallos y, que, por tanto, si se hubiesen tenido en cuenta la variabilidad de dichos tiempos, los valores de las variables del modelo 2 podrían haber sido más cercanos a la experimentación y, por consiguiente, el propio modelo reflejaría de una forma más fiel el comportamiento real del sistema.
- A partir de los datos de reprocesado (Columna ¿Reprocesado?) del Anexo 1, 2 y 3, se genera la tabla 7.20 que recoge el número de piezas reprocesadas frente al número de no reprocesadas, llegando a la conclusión de que el porcentaje de reprocesado es de aproximadamente el 25,93%. Observamos, por tanto, una pequeña desviación de aproximadamente el 4% frente al porcentaje de reprocesado impuesto en el modelo 2, del 30%. Es por ello, que llegamos a la hipótesis de que esta diferencia entre el valor de reprocesado impuesto y el valor aportado por la experimentación puede afectar a las desviaciones existentes entre los valores de las variables experimentales y las del modelo 2.

		PORCENTAJE (%)
NÚMERO DE PIEZAS REPROCESADAS	49	25,93
NÚMERO DE PIEZAS NO REPROCESADAS	140	74,07
NÚMERO TOTAL DE PIEZAS	189	

Tabla 7.21-Porcentaje de piezas reprocesadas y piezas no reprocesadas

- Finalmente, la última casuística viene dada por los fallos producidos en el sistema. Estos fallos vienen dados por el uso de materiales externos que al combinarse con la tecnología LEGO® hacen que nuestro sistema no funcione de la manera correcta. Por tanto, la diferenciación existente entre las variables de estado del modelo 2 y de la experimentación también vienen condicionadas por la imposibilidad de controlar los fallos repentinos que ocurren en el transcurso de la propia experimentación. Como ya pasaba en otros puntos de este apartado, si hubiésemos estudiado el sistema con un mayor número de piezas infinito, esta desviación comentada, entendemos, que podría ser menor.

7.4 ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA

Como ya se comentó en la introducción de este capítulo y en el apartado 6.7 de este documento, se va a llevar a cabo un análisis sobre los fallos originados por la tecnología LEGO® Mindstorms® EV3 que han ocurrido durante el proceso de toma de datos de nuestro estudio.

Los datos referentes a los fallos han sido recogidos según las 3 tasas de producción y se encuentran en el Anexo 8 de este documento. Respecto a lo explicado en el apartado 6.7, se realizará un análisis común de todos los fallos donde comprobaremos cuales son las estaciones de nuestro sistema de producción en las que el número de fallos es mayor. En la figura 7.24, se recoge el número de fallos totales ocurridos durante el estudio.

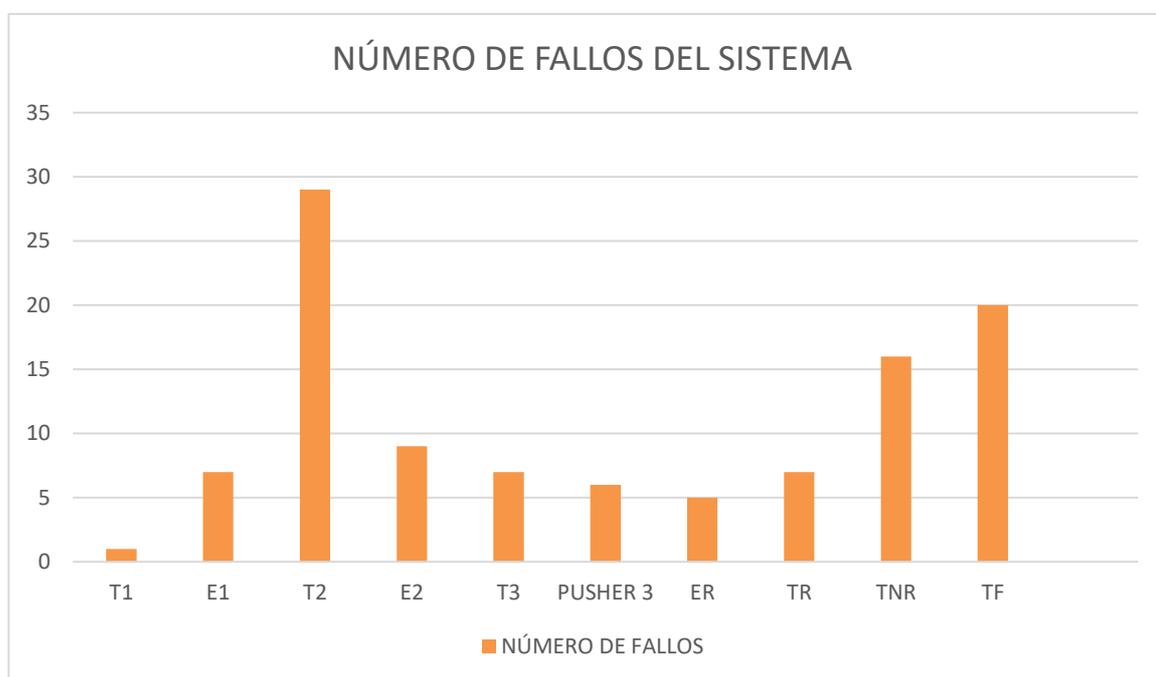


Figura 7.24-Nº fallos total del sistema

En este caso y como se puede observar en la figura 7.24 del total de fallos de las 3 tasas de producción, los mayores números de fallos están focalizados en tres puntos clave de nuestro sistema: la estación de transporte T2, la estación de transporte TNR y la estación de transporte TF. Pensamos que esto puede estar relacionado con la incorporación de nuevas piezas a estas estaciones debido a los saltos de altura existentes entre ellas, los cuales se han intentado paliar como ya se comentó en el proyecto complementario a este.

A priori, como se expuso en los apartados 6.1 y 6.2, los fallos en las estaciones de transporte han ocasionado unas variaciones temporales considerables que se han tenido en cuenta en nuestro estudio, diferenciando dos tipos de piezas. Sin embargo, como se ha expuesto en las conclusiones de los apartados 7.2.1.4 y 7.2.2.4, no hemos encontrado cambios significativos en los tiempos de ciclo ni en los inventarios en procesos de la experimentación con respecto al estudio teórico de las tasas de producción en el modelo 2. Aun así, como hemos comentado en el primer punto del apartado 7.3, los fallos que sufren las piezas, durante el transporte entre las estaciones de procesado, no acentúan, de una forma tan significativa, las diferencias entre los tiempos de transporte de los dos tipos de pieza.

Además, siguiendo la línea de lo comentado en el último punto del apartado 7.3, la utilización de piezas externas a la tecnología LEGO®, como es el caso de las cintas, ha producido un aumento del número de fallos en el sistema, ya que estos se suman a los que viene derivados de la tecnología LEGO® Mindstorms® EV3. Hay que destacar que algunos de los fallos ocurridos durante la tasa de producción 3, han sido mayoritariamente originados por el apilamiento de piezas debido a la inestabilidad del sistema. Esto no deberá afectar a nuestra percepción de la tecnología usada por el modelado del sistema puesto que estos fallos no tienen cabida en las condiciones estables de nuestras tasas de producción 1 y 2.

Los fallos más comunes en el sistema ocurren por el rozamiento de diferentes piezas de plásticos con la propia cinta de transporte y en las uniones entre ellas, el reconocimiento de la pieza por parte de los sensores, entre otros. El estudio propio del comportamiento, el cual refleja lo comentado, se encuentra en el documento complementario a este.

Estos fallos, en un primer momento, pensábamos que supondrían un mayor impacto en el modelado de nuestro sistema, pero los resultados, como por ejemplo los recogidos en las tablas 6.1 y 6.2, no reflejan tal hecho, por lo tanto, podemos deducir que la tecnología usada se adapta a nuestras necesidades al comportarse de una forma solidaria al comportamiento real de este tipo de sistemas de producción lo que valida su uso para el modelado de estos sistemas comentados.

8 CONCLUSIÓN

Tras todo lo comentado y expuesto en este documento, además de la interacción constante con el modelo tanto para su construcción como para su estudio, podemos finalizar este proyecto con una serie de ideas y conclusiones construidas a partir de lo comentado.

Como se ha visto en el análisis del diseño del sistema, el modelo final es capaz, con pequeñas discrepancias, de asimilarse al comportamiento real observado en el sistema. Esta conclusión ha sido vista siguiendo las variables de estado del modelo y del sistema real en las diferentes tasas de producción empleadas. Dicha conclusión queda demostrada en el capítulo 7 de este documento y ha sido así en los casos en los que este sistema a modelar era considerado estable. De forma distinta, se ha analizado el sistema en un comportamiento inestable (tasa de producción 3) haciendo uso solo de la variable tasa de salida, según la cual el modelo final presenta una serie de desviaciones mayores, respecto a las otras dos tasas de producción en comparación con la experimentación.

Ante el estudio que hemos comentado, debemos destacar la toma de datos diferencial respecto a los dos tipos de pieza que nos acontecen y que han marcado el mismo. La variabilidad asociada a los fallos tecnológicos por el detrimento del comportamiento del sistema se traduce en esta desviación en los tiempos promedio de las estaciones modeladas y, por lo tanto, ha sido necesario modelarlo a diferencia de nuestra primera idea inicial. A su vez, el planteamiento de los diferentes escenarios dentro de las tasas de producción marcadas no ha hecho más que remarcar la importancia del modelado de las estaciones de transporte, la desviación existente debido al mal funcionamiento de los sensores ha sido incluida en la estación de transporte que desembocaba en susodicha estación de procesado, lo que ha sido un acierto para el correcto análisis de estas.

Estas decisiones han determinado la forma de modelar el comportamiento del sistema. Esto se ve reflejado en las tablas y gráficas del capítulo 7. Por tanto, estas decisiones han dado pie, junto con las ideas aportadas por el documento y análisis complementario existente, que el diseño y el modelado de este tipo de procesos está condicionado por la toma de decisiones de sus estaciones a modelar y sus variables asociadas, y que cuanto más nos acerquemos a la realidad práctica a la hora de plantear este diseño, más nos ajustaremos a las situaciones reales de estudio planteadas.

Como complemento a todo lo comentado y en base a futuras líneas de investigación, pensamos que con el fin de adecuarnos más a la realidad existente se debería de modelar cualquier tiempo de servicio existente teniendo en cuenta cualquier desviación inherente a ello. Además, en base al Teorema Central del Límite, ya expuesto en el capítulo 3 de este documento, un mayor número de muestras nos ayudaría a aproximarnos con mayor precisión a cada uno de los valores propios de las variables características de estado del sistema real. El cálculo de las variables de estado tras el conocimiento del valor del porcentaje de reprocesado ayudaría a que las variables de nuestro modelo se acercaran más a las del sistema real. Por último, la precisión a la hora de llevar a cabo la toma de datos propia de cada muestra se ha visto condicionada por el factor humano, por lo que, entendemos que una automatización de la recogida de estos datos mencionados eliminaría o reduciría las desviaciones asociadas en las medidas de los tiempos y que no son propias del sistema, sino que, como ya hemos comentado, vienen derivadas de la recogida de datos manual.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, H., & Batanero, C. (2008). *Significado del Teorema Central del Límite en textos universitarios de probabilidad y estadística*. Estudios pedagógicos (Valdivia).
- Canal, N. (2006). *Distribuciones de probabilidad. El teorema central del límite*. Revista Seden.
- Chamorro Domínguez, A. M. (2024). Construcción y análisis del modelo de un sistema de producción con tecnología LEGO® Mindstorms® EV3. Sevilla, España.
- Contreras Sierra, E. R. (2013). *El concepto de estrategia como fundamento de la planeación estratégica. Pensamiento & gestión*, (35), 152-181.
- Framiñán, J. M. (2023). *Diseño de Procesos 4º*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Krishnamoorthy, K. (2006). *Handbook of Statistical Distributions with Applications*. New York: Chapman and Hall/CRC.
- Tawfik, L. C. (1984). *Administración de la producción*. Nueva Editorial Interamericana.

REFERENCIAS

- Alvarado, H., & Batanero, C. (2008). *Significado del Teorema Central del Límite en textos universitarios de probabilidad y estadística*. Estudios pedagógicos (Valdivia).
- Canal, N. (2006). *Distribuciones de probabilidad. El teorema central del límite*. Revista Seden.
- Chamorro Domínguez, A. M. (2024). Construcción y análisis del modelo de un sistema de producción con tecnología LEGO® Mindstorms® EV3. Sevilla, España.
- Contreras Sierra, E. R. (2013). *El concepto de estrategia como fundamento de la planeación estratégica*. *Pensamiento & gestión*, (35), 152-181.
- Framiñán, J. M. (2023). *Diseño de Procesos 4º*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Krishnamoorthy, K. (2006). *Handbook of Statistical Distributions with Applications*. New York: Chapman and Hall/CRC.
- Tawfik, L. C. (1984). *Administración de la producción*. Nueva Editorial Interamericana.

ANEXO

ANEXO 1: TASA DE PRODUCCIÓN 1

ESCENARIO 1

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	13	8	18	6	10	NO			7	4	66
PIEZA 2	12	8	17	7	11	NO			8	4	67
PIEZA 3	11	8	17	6	10	SI	4	9		4	69
PIEZA 4	11	9	16	7	10	NO			9	3	65
PIEZA 5	13	9	17	6	11	NO			8	4	68
PIEZA 6	12	9	18	7	10	NO			8	4	68
PIEZA 7	13	8	16	6	11	NO			7	3	64
PIEZA 8	13	7	16	6	11	NO			8	4	65
PIEZA 9	11	8	19	6	10	NO			8	4	66
PIEZA 10	11	8	18	5	10	NO			8	4	64
PIEZA 11	11	9	17	7	11	NO			6	3	64
PIEZA 12	12	8	18	6	10	NO			6	4	64
PIEZA 13	12	8	17	6	10	SÍ	4	8		4	69
PIEZA 14	12	8	17	6	11	NO			7	3	64
PIEZA 15	11	9	16	6	11	SÍ	4	8		4	69
PIEZA 16	12	8	17	6	10	NO			9	4	66
PIEZA 17	11	9	16	6	10	NO			8	3	63
PIEZA 18	13	8	16	6	10	NO			9	4	66
PIEZA 19	12	8	17	6	10	NO			8	4	65
PIEZA 20	17	8	12	6	11	NO			7	3	64

PIEZA 21	11	8	17	6	10	NO			7	3	62
PIEZA 22	12	8	16	7	11	NO			10	4	68
PIEZA 23	12	7	18	6	11	SÍ	5	8		4	71
PIEZA 24	12	8	17	6	10	NO			8	4	65
										TIEMPO CICLO PROMEDIO	65,91666667

ESCENARIO 2

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	13	8	18	6	10	NO			8	4	67
PIEZA 2	12	9	18	7	11	SÍ	4	8		3	72
PIEZA 3	11	9	24	7	10	SÍ	3	9		4	77
PIEZA 4	12	7	20	7	11	NO			8	4	69
PIEZA 5	11	9	19	6	11	NO			8	4	68
PIEZA 6	10	8	18	7	10	NO			7	3	63
PIEZA 7	13	8	23	6	10	NO			7	4	71
PIEZA 8	13	9	18	6	11	NO			8	4	69
PIEZA 9	12	8	15	6	10	SÍ	4	9		3	67
PIEZA 10	12	8	17	6	11	NO			7	4	65
PIEZA 11	11	8	18	7	10	NO			8	4	66
PIEZA 12	11	9	17	6	10	SÍ	4	7		3	67
PIEZA 13	10	8	18	7	11	SÍ	3	9		4	70
PIEZA 14	11	8	18	6	10	NO			9	4	66
PIEZA 15	10	8	18	6	10	NO			8	4	64
PIEZA 16	10	9	18	7	11	NO			8	3	66
PIEZA 17	11	8	18	7	11	NO			7	3	65
PIEZA 18	10	9	18	6	10	NO			8	4	65
PIEZA 19	11	8	18	6	10	NO			7	4	64
PIEZA 20	12	8	17	6	11	NO			7	3	64
PIEZA 21	10	9	18	7	11	NO			8	4	67
PIEZA 22	10	8	18	6	11	SÍ	4	7		3	67
PIEZA 23	11	9	19	7	10	NO			9	4	69
PIEZA 24	11	8	16	6	10	NO			7	4	62
										TIEMPO CICLO PROMEDIO	67,08333333

ESCENARIO 3

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	12	8	16	7	10	NO			9	4	66
PIEZA 2	10	8	17	7	11	NO			9	4	66
PIEZA 3	11	6	16	5	10	SÍ	4	9		3	64
PIEZA 4	11	8	16	7	10	NO			9	4	65
PIEZA 5	11	8	18	6	10	NO			7	4	62
PIEZA 6	10	7	19	5	11	NO			7	4	63
PIEZA 7	12	6	21	7	11	NO			7	4	68
PIEZA 8	11	8	15	6	10	NO			8	3	61
PIEZA 9	11	8	20	7	11	SÍ	4	7		4	72
PIEZA 10	11	8	16	8	11	SÍ	3	8		3	68
PIEZA 11	11	8	18	6	10	SÍ	4	8		4	69
PIEZA 12	11	8	17	6	10	NO			8	3	63
PIEZA 13	10	10	19	5	10	NO			8	4	66
PIEZA 14	12	8	19	5	11	NO			7	3	65
PIEZA 15	11	8	18	7	10	NO			9	4	67
PIEZA 16	11	8	18	5	10	NO			7	4	63
PIEZA 17	10	8	18	6	11	NO			8	4	65
PIEZA 18	10	10	17	7	10	NO			10	3	67
PIEZA 19	10	9	19	5	10	NO			8	4	65
PIEZA 20	10	8	22	6	11	NO			7	4	68
PIEZA 21	10	9	17	7	10	NO			8	3	64
PIEZA 22	11	10	15	5	10	SÍ	5	7		3	66
PIEZA 23	11	8	19	6	11	NO			8	4	67
PIEZA 24	10	8	22	6	10	NO			9	4	69
										TIEMPO CICLO PROMEDIO	65,79166667

ANEXO 2: TASA DE PRODUCCIÓN 2

ESCENARIO 1

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	12	8	17	6	10	NO			7	4	64
PIEZA 2	12	8	19	6	11	NO			8	4	68
PIEZA 3	13	7	16	6	10	SÍ	4	8		4	68
PIEZA 4	10	8	19	6	10	NO			9	3	65
PIEZA 5	10	8	18	6	11	NO			8	4	65
PIEZA 6	11	8	20	6	10	SÍ	4	7		4	70
PIEZA 7	10	8	19	7	11	SÍ	4	8		3	70
PIEZA 8	10	8	17	7	11	NO			8	4	65
PIEZA 9	11	9	16	7	10	NO			9	4	66
PIEZA 10	11	8	18	6	11	NO			6	4	64
PIEZA 11	11	8	18	6	11	NO			8	3	65
PIEZA 12	11	8	18	6	11	SÍ	4	7		4	69
PIEZA 13	10	8	18	6	10	NO			8	3	63
PIEZA 14	10	8	18	6	10	NO			7	5	64
PIEZA 15	11	8	18	6	12	NO			8	4	67
PIEZA 16	10	9	17	7	11	SÍ	4	9		4	71
PIEZA 17	11	8	18	6	10	NO			8	4	65
PIEZA 18	10	8	19	7	11	NO			6	3	64
PIEZA 19	11	8	18	6	10	NO			7	3	63
PIEZA 20	11	8	18	7	11	SÍ	4	8		4	71
PIEZA 21	10	8	18	6	10	SÍ	4	7		4	67
PIEZA 22	11	9	17	6	10	NO			7	3	63
PIEZA 23	10	8	19	6	11	NO			8	4	66

PIEZA 24	10	9	17	6	10	NO			8	4	64
									TIEMPO CICLO PROMEDIO		66,125

ESCENARIO 2

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	12	9	18	7	10	SÍ	4	9		4	74
PIEZA 2	9	9	17	6	11	SÍ	3	9		3	71
PIEZA 3	10	8	19	7	10	NO			8	4	69
PIEZA 4	10	9	18	7	11	NO			8	4	70
PIEZA 5	11	8	19	6	11	SÍ	4	10		4	75
PIEZA 6	11	8	18	6	10	NO			7	3	63
PIEZA 7	11	8	20	7	10	SÍ	5	7		4	73
PIEZA 8	11	8	18	7	11	NO			7	4	65
PIEZA 9	11	10	16	6	10	SÍ	4	10		4	72
PIEZA 10	13	8	19	6	11	NO			8	3	65
PIEZA 11	10	10	19	7	11	NO			10	4	70
PIEZA 12	13	8	19	5	10	NO			7	4	63
PIEZA 13	10	8	20	7	10	NO			7	3	64
PIEZA 14	10	9	19	6	10	NO			8	4	66
PIEZA 15	11	8	17	7	11	NO			8	4	66
PIEZA 16	10	8	19	8	10	SÍ	5	8		4	74
PIEZA 17	12	9	18	6	10	SÍ	4	8		4	69
PIEZA 18	9	9	15	6	10	SÍ	4	8		4	68
PIEZA 19	10	8	17	7	11	NO			9	4	69
PIEZA 20	9	9	16	6	11	NO			8	4	66
PIEZA 21	12	8	22	6	10	NO			8	3	67
PIEZA 22	11	8	18	7	11	SÍ	4	7		4	70
PIEZA 23	10	8	20	6	10	NO			9	4	68
PIEZA 24	9	9	20	6	11	NO	4	9	8	3	68
TIEMPO CICLO PROMEDIO											68,54166667

ESCENARIO 3

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	13	8	14	8	10	NO			7	4	64
PIEZA 2	11	7	21	6	11	NO			7	4	67
PIEZA 3	10	8	19	5	10	SÍ	4	8		3	67
PIEZA 4	12	7	18	7	10	NO			8	4	66
PIEZA 5	10	9	20	6	10	NO			7	4	66
PIEZA 6	11	8	19	6	11	NO			7	4	66
PIEZA 7	10	9	22	7	11	SÍ	4	9		4	76
PIEZA 8	12	7	17	8	10	NO			8	3	65
PIEZA 9	12	9	17	6	10	NO			8	3	65
PIEZA 10	11	10	17	5	10	NO			7	4	64
PIEZA 11	11	9	19	6	11	SÍ	4	8		4	72
PIEZA 12	13	8	19	7	11	SÍ	4	7		3	72
PIEZA 13	11	7	18	6	10	NO			7	4	63
PIEZA 14	11	8	17	6	10	NO			8	4	64
PIEZA 15	10	9	19	6	10	NO			8	4	66
PIEZA 16	10	8	23	8	11	NO			7	3	70
PIEZA 17	11	10	18	6	10	NO			8	3	66
PIEZA 18	10	8	19	8	11	SÍ	4	8		4	72
PIEZA 19	10	8	19	6	10	SÍ	5	6		4	68
PIEZA 20	11	7	19	7	10	NO			8	3	65
PIEZA 21	11	9	18	6	11	SÍ	4	8		4	71
PIEZA 22	10	9	18	7	11	SÍ	4	9		3	71
PIEZA 23	11	7	18	6	10	NO			8	4	64
PIEZA 24	10	8	19	5	11	SÍ	4	7		4	68
										TIEMPO CICLO PROMEDIO	67,41666667

ANEXO 3: TASA DE PRODUCCIÓN 3

ESCENARIO 1

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	16	9	18	7	11	NO			8	4	73
PIEZA 2	22	8	19	6	10	NO			7	4	76
PIEZA 3	25	8	20	7	10	NO			7	3	80
PIEZA 4	29	8	22	6	11	NO			7	4	87
PIEZA 5	33	8	22	6	10	NO			8	3	90
PIEZA 6	40	8	21	6	11	SÍ	4	8		4	102
PIEZA 7	45	8	24	7	11	NO			7	4	106
PIEZA 8	49	8	25	6	10	NO			8	3	109
PIEZA 9	54	8	19	6	11	NO			8	4	110
PIEZA 10	61	8	14	7	10	NO			7	4	111
PIEZA 11	68	8	14	6	10	NO			8	3	117
PIEZA 12	74	8	17	7	11	NO			8	4	129
PIEZA 13	83	9	13	6	11	NO			7	3	132
PIEZA 14	89	8	15	6	10	NO			8	4	140
PIEZA 15	94	8	17	6	11	NO			7	4	147
										TIEMPO CICLO PROMEDIO	124,375

ESCENARIO 2

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	11	7	20	5	11	SÍ	4	4		3	65
PIEZA 2	11	9	19	6	10	NO			8	3	66
PIEZA 3	15	9	24	7	11	NO			8	4	78
PIEZA 4	20	8	29	7	11	NO			8	4	87
PIEZA 5	24	8	29	6	10	NO			7	4	88
PIEZA 6	28	8	27	6	11	NO			7	4	91
PIEZA 7	35	9	22	5	10	NO			7	4	92
PIEZA 8	41	8	25	6	11	NO			8	4	103
PIEZA 9	52	8	18	4	10	NO			7	3	102
PIEZA 10	57	8	15	7	11	NO			7	3	108
PIEZA 11	61	9	22	6	11	NO			8	4	121
PIEZA 12	67	9	18	6	10	NO			7	3	120
PIEZA 13	74	8	15	5	10	SI	5	4	7	4	132
PIEZA 14	79	9	12	6	11	NO			8	4	129
PIEZA 15	85	8	11	6	11	NO			7	3	131
									TIEMPO CICLO PROMEDIO		100,4

ESCENARIO 3

	T1	E1	T2	E2	T3	¿Reprocesado?	ER	TR	TNR	TF	TIEMPO CICLO
PIEZA 1	12	8	15	5	11	NO			7	4	62
PIEZA 2	16	7	16	6	10	NO			8	4	67
PIEZA 3	19	6	15	8	11	NO			9	4	72
PIEZA 4	22	8	15	9	11	NO			7	4	76
PIEZA 5	27	7	16	5	10	NO			7	4	76
PIEZA 6	33	6	14	8	11	SÍ	5	9		3	89
PIEZA 7	35	6	26	6	10	NO			7	4	94
PIEZA 8	37	7	25	5	11	SÍ	4	9		3	101
PIEZA 9	45	9	20	6	10	NO			8	4	102
PIEZA 10	50	8	19	7	11	NO			9	4	108
PIEZA 11	54	8	18	6	11	SI	4	10		3	114
PIEZA 12	58	8	17	5	10	SI	4	11		4	117
PIEZA 13	61	8	17	6	10	NO			8	3	113
PIEZA 14	65	9	17	6	11	SI	4	12		3	127
PIEZA 15	70	9	16	6	11	SI	4	9		4	129
										TIEMPO CICLO PROMEDIO	115,71

ANEXO 4: TIEMPOS DE TRANSPORTE SEGÚN TIPO DE PIEZA

	PIEZAS SIN FALLOS					
	T1	T2	T3	TR	TNR	TF
MUESTRA 1	13	18	10		7	4
MUESTRA 2	12				8	4
MUESTRA 3	11	17	10			4
MUESTRA 4	11	16	10			3
MUESTRA 5	13	17	11			4
MUESTRA 6	12		10		8	4
MUESTRA 7	13	16			7	3
MUESTRA 8	13	16	11		8	
MUESTRA 9	11	19	10		8	4
MUESTRA 10	11	18	10		8	4
MUESTRA 11	11	17	11		6	3
MUESTRA 12	12	18	10		6	4
MUESTRA 13	12		10	8		4
MUESTRA 14	12	17	11		7	3
MUESTRA 15	11	16	11	8		
MUESTRA 16	12	17	10		9	4
MUESTRA 17	11	16	10		8	3
MUESTRA 18	13	16	10		9	4
MUESTRA 19	12	17	10		8	4
MUESTRA 20	17	12	11		7	3
MUESTRA 21	11	17	10		7	3
MUESTRA 22	12	16	11			4
MUESTRA 23	12		11	8		4
MUESTRA 24	12	17	10		8	4
MUESTRA 25	13		10	9		4
MUESTRA 26	13	17	11	9		3
MUESTRA 27	13		10		8	4
MUESTRA 28	13	18	11		8	
MUESTRA 29	13	19				4
MUESTRA 30	11	18	10		7	3
MUESTRA 31	12		10	7		4
MUESTRA 32	10	18	11		7	4
MUESTRA 33	12	16	10	10		4
MUESTRA 34	10	19	11		8	3
MUESTRA 35	9	19	11			4
MUESTRA 36	10	19	10		7	4
MUESTRA 37	9	20	10		7	3
MUESTRA 38	10	19	10		8	4

MUESTRA 39	11	17	11		8	4
MUESTRA 40	12	19	10	8		4
MUESTRA 41	10	18	10			4
MUESTRA 42	12	15	10			4
MUESTRA 43	13	17	11		9	
MUESTRA 44	12	16	11		8	4
MUESTRA 45	10		10		8	3
MUESTRA 46	11	18		7		4
MUESTRA 47	11	20	10			4
MUESTRA 48	11		11		8	3
MUESTRA 49	12	16	10		9	
MUESTRA 50	10	17	11		9	4
MUESTRA 51	11	16	10	9		3
MUESTRA 52	11	16	10			4
MUESTRA 53	11		10		7	4
MUESTRA 54	10	19	11		7	4
MUESTRA 55	12		11		7	4
MUESTRA 56	11	15	10			3
MUESTRA 57	11		11	7		4
MUESTRA 58	11	16	11	8		3
MUESTRA 59	11		10	8		4
MUESTRA 60	11	17	10		8	3
MUESTRA 61	10		10		8	4
MUESTRA 62	12	19	11		7	3
MUESTRA 63	11	18	10		9	4
MUESTRA 64	11	18	10		7	4
MUESTRA 65	10	18	11		8	4
MUESTRA 66	10	17	10			3
MUESTRA 67	10	19	10		8	4
MUESTRA 68	10		11		7	4
MUESTRA 69	10	17	10		8	3
MUESTRA 70	11	15	10	7		3
MUESTRA 71	11	19	11		8	4
MUESTRA 72	10	22	10		9	4
MUESTRA 73	12	17	10		7	4
MUESTRA 74	12				8	4
MUESTRA 75	13	16	10			4
MUESTRA 76	10	19	10			3
MUESTRA 77	10	18	11		8	
MUESTRA 78	11		10	7		4
MUESTRA 79	10	19		8		3
MUESTRA 80	10	17	11		8	4

MUESTRA 81	11	16	10		9	4
MUESTRA 82	11	18	11		6	4
MUESTRA 83	11	18	11		8	3
MUESTRA 84	11	18	11	7		4
MUESTRA 85	10	18	10		8	3
MUESTRA 86	10	18	10		7	
MUESTRA 87	11	18			8	4
MUESTRA 88	10	17	11	9		4
MUESTRA 89	11	18	10		8	4
MUESTRA 90	10	19			6	3
MUESTRA 91	11	18	10		7	3
MUESTRA 92	11		11	8		4
MUESTRA 93	10	18	10	7		4
MUESTRA 94	11	17	10		7	3
MUESTRA 95	10	19	11			4
MUESTRA 96	10	17	10		8	4
MUESTRA 97	13		10		8	4
MUESTRA 98	12	18	11	8		3
MUESTRA 99	11		10	9		4
MUESTRA 100	12	20	11		8	4
MUESTRA 101	11	19				4
MUESTRA 102	10	18	10		7	3
MUESTRA 103	13		10			4
MUESTRA 104	13	18	11		8	4
MUESTRA 105	12	15	10	9		3
MUESTRA 106	12	17	11		7	4
MUESTRA 107	11	18	10		8	4
MUESTRA 108	11	17	10	7		3
MUESTRA 109	10	18	11	9		4
MUESTRA 110	11	18	10		9	
MUESTRA 111	10	18	10		8	4
MUESTRA 112	10	18	11		8	3
MUESTRA 113	11	18	11		7	3
MUESTRA 114	10	18	10		8	4
MUESTRA 115	11	18	10		7	4
MUESTRA 116	12	17	11		7	3
MUESTRA 117	10	18			8	4
MUESTRA 118	10	18	11	7		3
MUESTRA 119	11		10		9	4
MUESTRA 120	11	16	10		7	4
MUESTRA 121	13	14	10		7	
MUESTRA 122	11	21	11		7	
MUESTRA 123	10	19	10	8		3

MUESTRA 124	12	18	10			4
MUESTRA 125	10		10		7	4
MUESTRA 126	11	19	11		7	4
MUESTRA 127	10		11	9		4
MUESTRA 128	12	17	10			3
MUESTRA 129	12	17	10		8	3
MUESTRA 130	11	17	10		7	4
MUESTRA 131	11	19	11	8		4
MUESTRA 132	13	19	11	7		3
MUESTRA 133	11	18	10		7	4
MUESTRA 134	11	17	10		8	4
MUESTRA 135	10	19	10		8	4
MUESTRA 136	10		11		7	3
MUESTRA 137	11	18	10			3
MUESTRA 138	10		11	8		4
MUESTRA 139	10	19	10	6		
MUESTRA 140	11	19	10		8	3
MUESTRA 141	11	18	11	8		
MUESTRA 142	10	18	11			3
MUESTRA 143	11		10		8	4
MUESTRA 144	10	19	11	7		4
PROMEDIO	11,1528	17,6239	10,3955	7,9118	7,6629	3,6667

	PIEZAS CON FALLOS					
	T1	T2	T3	TR	TNR	TF
MUESTRA 1						
MUESTRA 2		17	11			
MUESTRA 3				9		
MUESTRA 4					9	
MUESTRA 5		18			8	
MUESTRA 6						
MUESTRA 7			11			
MUESTRA 8						4
MUESTRA 9						
MUESTRA 10						
MUESTRA 11						
MUESTRA 12						
MUESTRA 13		17				
MUESTRA 14						
MUESTRA 15						4

MUESTRA 16						
MUESTRA 17						
MUESTRA 18						
MUESTRA 19						
MUESTRA 20						
MUESTRA 21						
MUESTRA 22					10	
MUESTRA 23		18				
MUESTRA 24						
MUESTRA 25		18				
MUESTRA 26						
MUESTRA 27		19				
MUESTRA 28						4
MUESTRA 29			11	10		
MUESTRA 30						
MUESTRA 31		20				
MUESTRA 32						
MUESTRA 33						
MUESTRA 34						
MUESTRA 35					10	
MUESTRA 36						
MUESTRA 37						
MUESTRA 38						
MUESTRA 39						
MUESTRA 40						
MUESTRA 41				8		
MUESTRA 42				8		
MUESTRA 43						4
MUESTRA 44						
MUESTRA 45		22				
MUESTRA 46			11			
MUESTRA 47					9	
MUESTRA 48		20				
MUESTRA 49						4
MUESTRA 50						
MUESTRA 51						
MUESTRA 52					9	
MUESTRA 53		18				
MUESTRA 54						
MUESTRA 55		21				
MUESTRA 56					8	
MUESTRA 57		20				
MUESTRA 58						

MUESTRA 59		18				
MUESTRA 60						
MUESTRA 61		19				
MUESTRA 62						
MUESTRA 63						
MUESTRA 64						
MUESTRA 65						
MUESTRA 66					10	
MUESTRA 67						
MUESTRA 68		22				
MUESTRA 69						
MUESTRA 70						
MUESTRA 71						
MUESTRA 72						
MUESTRA 73						
MUESTRA 74		19	11			
MUESTRA 75				8		
MUESTRA 76					9	
MUESTRA 77						4
MUESTRA 78		20				
MUESTRA 79			11			
MUESTRA 80						
MUESTRA 81						
MUESTRA 82						
MUESTRA 83						
MUESTRA 84						
MUESTRA 85						
MUESTRA 86						5
MUESTRA 87			12			
MUESTRA 88						
MUESTRA 89						
MUESTRA 90			11			
MUESTRA 91						
MUESTRA 92		18				
MUESTRA 93						
MUESTRA 94						
MUESTRA 95					8	
MUESTRA 96						
MUESTRA 97		18				
MUESTRA 98						
MUESTRA 99		24				
MUESTRA 100						

MUESTRA 101			11			
MUESTRA 102						
MUESTRA 103		23				
MUESTRA 104						
MUESTRA 105						
MUESTRA 106						
MUESTRA 107						
MUESTRA 108						
MUESTRA 109						
MUESTRA 110						4
MUESTRA 111						
MUESTRA 112						
MUESTRA 113						
MUESTRA 114						
MUESTRA 115						
MUESTRA 116						
MUESTRA 117			11			
MUESTRA 118						
MUESTRA 119		19				
MUESTRA 120						
MUESTRA 121						4
MUESTRA 122						4
MUESTRA 123						
MUESTRA 124					8	
MUESTRA 125		20				
MUESTRA 126						
MUESTRA 127		22				
MUESTRA 128					8	
MUESTRA 129						
MUESTRA 130						
MUESTRA 131						
MUESTRA 132						
MUESTRA 133						
MUESTRA 134						
MUESTRA 135						
MUESTRA 136		23				
MUESTRA 137					8	
MUESTRA 138		19				
MUESTRA 139						4
MUESTRA 140						
MUESTRA 141						4
MUESTRA 142				9		
MUESTRA 143		18				

MUESTRA 144						
PROMEDIO		19,6296	11,1	8,6667	8,7692	4,0833

ANEXO 5: TIEMPO DE SALIDA ENTRE PIEZAS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 1

		TIEMPO DE SALIDA			TIEMPO DE SALIDA ENTRE PIEZAS		
		ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
PIEZA 1	0	66	67	66			
PIEZA 2	30	97	108	96	31	41	30
PIEZA 3	60	129	128	124	32	20	28
PIEZA 4	90	155	158	155	26	30	31
PIEZA 5	120	188	202	182	33	44	27
PIEZA 6	150	218	213	213	30	11	31
PIEZA 7	180	244	261	248	26	48	35
PIEZA 8	210	275	277	271	31	16	23
PIEZA 9	240	306	307	312	31	30	41
PIEZA 10	270	334	335	338	28	28	26
PIEZA 11	300	364	366	369	30	31	31
PIEZA 12	330	394	397	393	30	31	24
PIEZA 13	360	429	430	426	35	33	33
PIEZA 14	390	454	456	455	25	26	29
PIEZA 15	420	489	484	487	35	28	32
PIEZA 16	450	516	516	513	27	32	26
PIEZA 17	480	543	545	545	27	29	32
PIEZA 18	510	576	575	577	33	30	32
PIEZA 19	540	605	604	605	29	29	28
PIEZA 20	570	634	634	638	29	30	33
PIEZA 21	600	662	667	664	28	33	26
PIEZA 22	630	698	697	696	36	30	32

PIEZA 23	660	731	729	727	31	32	31
PIEZA 24	690	755	752	759	24	23	32
VALOR PROMEDIO					29,95652174	29,7826087	30,13043478

ANEXO 6: TIEMPO DE SALIDA ENTRE PIEZAS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 2

	TIEMPO ENTRADA	TIEMPO DE SALIDA			TIEMPO DE SALIDA ENTRE PIEZAS		
		ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
PIEZA 1	0	64	74	64			
PIEZA 2	20	88	91	87	24	17	23
PIEZA 3	40	108	109	107	20	18	20
PIEZA 4	60	125	130	126	17	21	19
PIEZA 5	80	145	155	146	20	25	20
PIEZA 6	100	170	163	166	25	8	20
PIEZA 7	120	197	193	203	27	30	37
PIEZA 8	140	205	205	205	8	12	2
PIEZA 9	160	226	232	225	21	27	20
PIEZA 10	180	244	245	244	18	13	19
PIEZA 11	200	265	270	272	21	25	28
PIEZA 12	220	289	283	292	24	13	20
PIEZA 13	240	303	304	303	14	21	11
PIEZA 14	260	324	326	324	21	22	21
PIEZA 15	280	347	346	346	23	20	22
PIEZA 16	300	371	374	370	24	28	24
PIEZA 17	320	385	389	386	14	15	16

PIEZA 18	340	404	408	412	19	19	26
PIEZA 19	360	423	429	428	19	21	16
PIEZA 20	380	451	446	445	28	17	17
PIEZA 21	400	467	467	471	16	21	26
PIEZA 22	420	483	490	491	16	23	20
PIEZA 23	440	506	508	504	23	18	13
PIEZA 24	460	524	528	528	18	20	24
VALOR PROMEDIO					20	19,73913043	20,17391304

ANEXO 7: TIEMPO DE SALIDA ENTRE PIEZAS DE LA TASA DE PRODUCCIÓN 3

	TIEMPO ENTRADA	TIEMPO DE SALIDA			TIEMPO DE SALIDA ENTRE PIEZAS		
		ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
PIEZA 1	0	73	78	62	/	1	/
PIEZA 2	10	86	76	77	13	/	15
PIEZA 3	20	100	94	92	14	18	15
PIEZA 4	30	117	114	106	17	20	14
PIEZA 5	40	130	126	116	13	12	10
PIEZA 6	50	152	137	139	22	11	23
PIEZA 7	60	166	149	154	14	12	15
PIEZA 8	70	179	167	171	13	18	17
PIEZA 9	80	190	182	182	11	15	11
PIEZA 10	90	201	198	198	11	16	16
PIEZA 11	100	217	221	214	16	23	16
PIEZA 12	110	239	230	227	22	9	13
PIEZA 13	120	252	252	233	12	15	6

PIEZA 14	130	270	259	257	18	14	24
PIEZA 15	140	287	271	269	17	12	12
VALOR PROMEDIO					15,28571429	14	14,78571429

ANEXO 8: NÚMERO DE FALLOS DE LAS TRES TASAS DE PRODUCCIÓN

NÚMERO DE FALLOS EN LA TASA DE PRODUCCIÓN 1

	T1	E1	T2	E2	T3	PUSHER 3	ER	TR	TNR	TF
Nº FALLOS	0	4	11	3	2	2	1	4	7	5

NÚMERO DE FALLOS EN LA TASA DE PRODUCCIÓN 2

	T1	E1	T2	E2	T3	PUSHER 3	ER	TR	TNR	TF
Nº FALLOS	0	0	10	3	4	2	2	2	5	9

NÚMERO DE FALLOS EN LA TASA DE PRODUCCIÓN 3

	T1	E1	T2	E2	T3	PUSHER 3	ER	TR	TNR	TF
Nº FALLOS	1	3	8	3	1	2	2	1	4	6