

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de Variantes de Sistema CONWIP  
Multiproducto para el Control de la Producción

Autor: Andrés Pérez López

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Análisis de Variantes de Sistema CONWIP Multiproducto para el Control de la Producción**

Autor:

Andrés Pérez López

Tutor:

José Manuel Framiñán Torres

Catedrático de Universidad

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado: Análisis de Variantes de Sistema CONWIP Multiproducto para el Control de la  
Producción

Autor: Andrés Pérez López

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A la memoria de mi Padre, siempre presente en cada uno de mis pasos.*

*A mi madre, la persona que nunca tiró la toalla conmigo y me enseñó a ver el lado bueno de las cosas.*

*Esto no sería posible sin vosotros y vuestro ejemplo.*



# Agradecimientos

---

Mención especial para mi madre, quien supo ver siempre lo bueno que hay en mí y me hizo dar ese empujón que necesitaba. Eres la personificación del esfuerzo y el cariño de una madre, gracias por hacerme crecer día a día.

A mi padre, quien fue un ejemplo de lucha y fortaleza, siempre te dedicaré todas mis victorias. Gracias por ser mi héroe de la infancia.

A mi abuelo Andrés, mi referente en el mundo de la Ingeniería y quien me animó a tomar este camino.

A mis hermanos: Gonzalo, Irene, Elena, Manuel y Pedro.

A mi medio limón, Aida, gracias por sacarme una sonrisa en los momentos duros y ser mi suerte desde que te cruzaste en mi camino.

El presente Trabajo de Fin de Grado ha sido realizado bajo la tutela del Profesor Catedrático de Universidad José Manuel Framiñán Torres a quien agradezco el haberme dedicado su tiempo y dedicación siempre que ha sido necesario.

*Andrés Pérez López*

*Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

En este proyecto se ha realizado un estudio acerca de los distintos modelos de producción para sistemas CONWIP multiproducto. Para abordar este tema, se empezará con una breve introducción a los sistemas de producción, explicando su funcionamiento, clasificación y elementos principales, para dar paso al análisis de los modelos CONWIP multiproducto. El motivo de este análisis es la búsqueda del modelo más eficiente según el tipo de escenario de trabajo, para ello dispondremos de distintas configuraciones según el número de estaciones presentes, el tipo de trabajo y variaciones estimadas.

Por tanto, como en cualquier actividad productiva, se propugna obtener el máximo beneficio. La mejor opción sería experimentar sobre sistemas reales. Cuando eso no es posible, se crean situaciones similares al sistema mediante herramientas de simulación de procesos, en este caso el software utilizado es ARENA. El objetivo principal es modelar y ejecutar simulaciones para analizar cuál es la forma más eficiente a la hora de procesar los pedidos.



# Abstract

---

In this project a study has been executed about the different production models for multiproduct CONWIP systems. To address this issue, we will begin with a brief introduction to the production systems, explaining their operation, classification and main elements, to give way for the analysis of the multiproduct CONWIP models. The reason for this analysis is to search for the most efficient model according to the type of work scenario, for this we will have different configurations according to the number of stations present, the kind of work and the estimated variations.

Therefore, as in any productive activity, it is advocated to obtain the maximum benefit. The best option would be to experiment with real systems. When this is not possible, similar situations to the system are created by process simulation tools, in this case the software used is ARENA SIMULATION. The main objective is to model and execute simulations to analyze which is the most efficient way to process orders.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Notación</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Objeto del Trabajo</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objeto del Trabajo</i>	1
1.2 <i>Sumario</i>	1
<b>2 Descripción del problema: El control de la producción en sistemas CONWIP multiproducto</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Introducción a los Sistemas de Control de la Producción</i>	3
2.1.1 Sistema MRP	4
2.1.2 Sistema Kanban	5
2.1.3 Variaciones del sistema Kanban	5
2.1.4 Sistema CONWIP	6
2.1.5 Sistema Híbrido Kanban-CONWIP	7
2.1.6 Comparación de los sistemas de control de la producción	8
2.2 <i>CONstant Work In Process al detalle</i>	11
2.2.1 Consideraciones	11
2.2.2 Determinar el número de tarjetas	12
2.2.3 Secuenciación de los trabajos	12
2.3 <i>Políticas de control para el Sistema CONWIP</i>	13
2.3.1 Política S-CLOSED	13
2.3.2 Política M-CLOSED	13
2.3.3 Sistema TOC	13
2.4 <i>Conclusiones</i>	14
<b>3 Descripción de la metodología</b>	<b>15</b>
3.1 <i>El concepto de simulación</i>	15
3.2 <i>Herramientas de simulación</i>	16
3.3 <i>Arena Simulation</i>	17
3.4 <i>Nociones básicas del programa</i>	18
3.5 <i>Módulos</i>	19
3.6 <i>Conclusión</i>	21
<b>4 Modelado y validación</b>	<b>23</b>
4.1 <i>Variables de interés</i>	23
4.2 <i>Restricciones a considerar</i>	24
4.2.1 Transporte entre estaciones	24
4.2.2 Paradas del sistema	24
4.2.3 Cuello de Botella	24
4.2.4 Factores adicionales	25
4.3 <i>Escenario de simulación</i>	26
4.4 <i>Modelos de simulación implementados</i>	29
4.4.1 Módulo Llegada de clientes	30
4.4.2 Módulo Salida del sistema	30
4.4.3 Módulo Proceso de producción	31

4.4.4	Módulo Asignación	31
4.4.5	Modelo de simulación para política M-CLOSED	32
4.4.6	Modelo de simulación para política S-CLOSED	33
4.4.7	Modelo de simulación para política M-CLOSED/TOC	34
4.4.8	Modelo de simulación para política S-CLOSED/TOC	35
4.5	<i>Validación de los escenarios</i>	36
4.6	<i>Conclusiones</i>	36
<b>5</b>	<b>Experimentación y Resultados</b>	<b>37</b>
5.1	<i>Medidas de rendimiento</i>	37
5.2	<i>Exposición de resultados</i>	38
5.2.1	Política M-CLOSED escenario UNIF [1,2]	39
5.2.2	Política S-CLOSED escenario UNIF [1,2]	42
5.2.3	Política M-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,2]	45
5.2.4	Política S-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,2]	48
5.2.5	Política M-CLOSED escenario UNIF [1,6]	51
5.2.6	Política S-CLOSED escenario UNIF [1,6]	54
5.2.7	Política M-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,6]	57
5.2.8	Política S-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,6]	60
<b>6</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>63</b>
6.1	<i>Medidas de rendimiento e impacto de la variabilidad</i>	63
6.1.1	Average waiting time	63
6.1.2	Work In Process	65
6.1.3	Intermediate buffers	66
6.1.4	Finished good inventory	67
6.2	<i>Comparación de políticas de control</i>	68
6.2.1	Entorno UNIF [1,2]	69
6.2.2	Entorno UNIF [1,6]	72
6.3	<i>Escenario de simulación alternativo</i>	76
6.3.1	Política M-CLOSED escenario alternativo UNIF [1,2]	77
	<b>Conclusiones</b>	<b>81</b>
	<b>Referencias</b>	<b>83</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Ventajas de los sistemas de control de la producción	8
<b>Tabla 2.</b> Desventajas de los sistemas de control de la producción	9
<b>Tabla 3.</b> Tiempos de proceso para UNIF [1,2]	27
<b>Tabla 4.</b> Tiempos de proceso para UNIF [1,6]	28
<b>Tabla 5.</b> Sumatorio de tiempos de proceso para cada estación	38
<b>Tabla 6.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,2]	39
<b>Tabla 7.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,2]	40
<b>Tabla 8.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,2]	41
<b>Tabla 9.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,2]	42
<b>Tabla 10.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,2]	43
<b>Tabla 11.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,2]	44
<b>Tabla 12.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2]	45
<b>Tabla 13.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2]	46
<b>Tabla 14.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2]	47
<b>Tabla 15.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2]	48
<b>Tabla 16.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2]	49
<b>Tabla 17.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2]	50
<b>Tabla 18.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,6]	51
<b>Tabla 19.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,6]	52
<b>Tabla 20.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,6]	53
<b>Tabla 21.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,6]	54
<b>Tabla 22.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,6]	55
<b>Tabla 23.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,6]	56
<b>Tabla 24.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6]	57
<b>Tabla 25.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6]	58
<b>Tabla 26.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6]	59
<b>Tabla 27.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6]	60
<b>Tabla 28.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6]	61
<b>Tabla 29.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6]	62
<b>Tabla 30.</b> Sumatorio de los tiempos de proceso para cada tipo de trabajo	76
<b>Tabla 31.</b> Hoja 1/3 de resultados de la simulación en el escenario alternativo	77
<b>Tabla 32.</b> Hoja 2/3 de resultados de la simulación en el escenario alternativo	78
<b>Tabla 33.</b> Hoja 3/3 de resultados de la simulación en el escenario alternativo	79



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Esquema básico de sistema MRP	4
<b>Figura 2.</b> Esquema básico de sistema Kanban	5
<b>Figura 3.</b> Esquema básico de sistema Kanban de Doble Tarjeta	5
<b>Figura 4.</b> Esquema básico de sistema Kanban <i>Minimal Blocking</i>	6
<b>Figura 5.</b> Esquema básico de sistema CONWIP	6
<b>Figura 6.</b> Esquema básico de sistema híbrido CONWIP-Kanban	7
<b>Figura 7.</b> Esquema del proceso de análisis	15
<b>Figura 8.</b> Esquema del proceso de diseño	16
<b>Figura 9.</b> Estructura jerárquica del software Arena	17
<b>Figura 10.</b> Módulos Create usados en la simulación	19
<b>Figura 11.</b> Módulo Dispose usado en la simulación	19
<b>Figura 12.</b> Módulos Assign usados en la simulación	19
<b>Figura 13.</b> Módulo Seize (izquierda) y módulo Release (derecha) usados en la simulación	19
<b>Figura 14.</b> Módulos Process usados en la simulación	20
<b>Figura 15.</b> Módulos Decide usados en la simulación	20
<b>Figura 16.</b> Módulos Hold usados en la simulación	20
<b>Figura 17.</b> Módulo Batch usado en la simulación	20
<b>Figura 18.</b> Escenario general, con 20 estaciones y 3 tipos de trabajos	29
<b>Figura 19.</b> Módulo Llegada de clientes para un entorno con 3 tipos de trabajos	30
<b>Figura 20.</b> Módulo Salida del sistema para un entorno con 3 tipos de trabajos	30
<b>Figura 21.</b> Módulo Proceso de producción para un entorno con 20 estaciones	31
<b>Figura 22.</b> Módulo Asignación para un entorno con 3 tipos de trabajos	31
<b>Figura 23.</b> Modelo de simulación para política M-CLOSED	32
<b>Figura 24.</b> Modelo de simulación para política S-CLOSED	33
<b>Figura 25.</b> Modelo de simulación para política M-CLOSED/TOC	34
<b>Figura 26.</b> Modelo de simulación para política S-CLOSED/TOC	35
<b>Figura 27.</b> Tiempos de espera para los sistemas TOC	63
<b>Figura 28.</b> Tiempos de espera en M-CLOSED y S-CLOSED	64
<b>Figura 29.</b> Tiempos de espera en los escenarios UNIF [1,6]	64
<b>Figura 30.</b> Representación del WIP frente al número de trabajos y estaciones en entorno UNIF [1,2]	65
<b>Figura 31.</b> Representación del WIP frente al número de trabajos y estaciones en entorno UNIF [1,6]	65
<b>Figura 32.</b> Niveles de los buffers frente al número de trabajos y estaciones para el entorno UNIF [1,2]	66
<b>Figura 33.</b> Niveles de los buffers frente al número de trabajos y estaciones para el entorno UNIF [1,6]	66
<b>Figura 34.</b> Inventario de productos terminados para entorno UNIF [1,2]	67
<b>Figura 35.</b> Inventario de productos terminados para entorno UNIF [1,6]	67
<b>Figura 36.</b> Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,2]	69

<b>Figura 37.</b> Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,2]	69
<b>Figura 38.</b> Niveles de WIP en escenarios UNIF [1,2]	70
<b>Figura 39.</b> Niveles de los buffers del proceso productivo en escenarios UNIF [1,2]	71
<b>Figura 40.</b> Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,6]	72
<b>Figura 41.</b> Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,6]	72
<b>Figura 42.</b> Niveles de WIP en escenarios UNIF [1,6]	73
<b>Figura 43.</b> Niveles de los buffers del proceso productivo en escenarios UNIF [1,6]	74

# Notación

---

w	WIP, inventario en proceso (unidades en el sistema)
$\lambda$	Tasa de llegada en unidades/Ud. de tiempo
ct	Tiempo de ciclo en Ud.de tiempo
e.o.c.	En cualquier otro caso
NSt	Número de estaciones de producción
NJ	Número de trabajos
NC	Número de tarjetas CONWIP
X	Hace referencia a las letras A, B, C, D, E, F, G, H, I y J, marcando los tipos de trabajos
#	Hace referencia a los números enteros entre 1 y 20, marcando el número de las estaciones de producción
UNIF [a, b]	Distribución uniforme continua entre los valores a y b
J	Hace referencia al número de tipos de trabajos del sistema (gráficas de resultados)
St	Hace referencia al número de estaciones del sistema (gráficas de resultados)



# 1 OBJETO DEL TRABAJO

---

## 1.1 Objeto del Trabajo

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio de los sistemas de control de la producción que pueden usarse en un sistema Flow-Shop, con el fin de tener un inventario en proceso constante (*Constant Work In Process*) dentro de un entorno de fabricación contra stock y multiproducto. Este tipo de sistemas recibe el nombre de sistemas CONWIP multiproducto.

Concretamente se estudiarán las variantes que dicho sistema presenta, puesto que se caracteriza por tener varios métodos de actuación en función de la asignación de una serie de parámetros. Dichas variantes se expondrán a un abanico de diferentes escenarios, lo que permitirá extraer conclusiones acerca de cuál es la que ofrece un mayor rendimiento. Para ello, se han modelado los distintos escenarios usando un software de simulación de eventos discretos (ARENA) y se han analizado los resultados obtenidos.

Este tema es de especial importancia ya que los sistemas de producción están cambiando en la actualidad, pasando desde la fabricación en serie, a sistemas de producción flexibles y dinámicos que persiguen minimizar el inventario en proceso y a su vez, la reducción de costes.

## 1.2 Sumario

El trabajo se va a estructurar en una serie de bloques que darán linealidad al contenido para hacer más dinámicos los temas a tratar. De esta forma, los conceptos que vayan apareciendo se habrán explicado anteriormente en la medida de lo posible.

El primer bloque (formado por los capítulos 1 y 2) planteará el problema al que queremos hacer frente. Consistirá en una introducción a los sistemas de control de la producción de forma que cualquier persona perteneciente al ámbito de la ingeniería pueda entender sin dificultad el funcionamiento y finalidad de estos, así como el objeto de su empleo y los elementos principales que los componen. Una vez expuestos los distintos sistemas de control de la producción, se dedicará a explicar en profundidad el funcionamiento de los sistemas controlados mediante un inventario en proceso constante y un entorno multiproducto (conocidos como sistemas CONWIP), así como las diferentes configuraciones que existen en la actualidad. El bloque concluirá con una explicación más detallada de los sistemas que vamos a usar, así como la justificación de los nuevos modelos planteados.

El segundo bloque (formado por el capítulo 3) presentará la metodología que se utilizará para realizar el estudio y posterior análisis de los sistemas presentados. Se expondrá el por qué vamos a usar un software de simulación y los elementos principales del mismo, tomando así una serie de pautas necesarias para entender su funcionamiento, de forma que el uso de un software específico no dificulte la comprensión del trabajo.

El tercer bloque (formado por el capítulo 4) definirá el modelado y la validación de los escenarios que vamos a abordar, así como sus distintos elementos y los principales objetivos. De esta forma se dará validez a los modelos implementados y a las restricciones expuestas. Por último, se mostrarán los escenarios y los diferentes módulos que los componen, para entender forma clara y visual el entorno en el que nos encontramos. Este bloque es muy importante dado que la mayor parte de las técnicas de control empleadas para disminuir el inventario en proceso son relativamente recientes y todavía no existe un estudio exhaustivo de ellas.

En el cuarto bloque (formado por los capítulos 5 y 6) se van a exponer los distintos resultados obtenidos, así como su posterior análisis y discusión de estos. Este último bloque toma mayor relevancia a la hora de exponer los resultados puesto que nos dará los argumentos necesarios para saber cuál de las configuraciones estudiadas es la óptima para cada tipo de escenario.

Por último, se hará una revisión conjunta del trabajo y se enunciarán las conclusiones extraídas tras el análisis de los resultados.



# 2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA: EL CONTROL DE LA PRODUCCIÓN EN SISTEMAS CONWIP MULTIPRODUCTO

---

Por sistema de producción, nos referimos a una serie de elementos organizados, relacionados y que interactúan entre sí, que van desde las máquinas hasta las personas, los materiales e incluso los procedimientos. Todos esos componentes relacionados consiguen que los recursos y la información que interviene en el proceso, sea transformada y de lugar a un producto o servicio terminado, obteniendo un resultado de calidad en cuanto a costo y plazo de entrega.

Por consiguiente, el correcto diseño de los sistemas de producción será principalmente determinar el conjunto de recursos (máquinas, personas, almacenes, etc.) necesarios para alcanzar unos objetivos productivos definidos de ante mano (satisfacer una demanda determinada, no exceder los tiempos de entrega, minimizar costes, etc.).

El problema surge en el momento de controlar el sistema de producción, pues se dispone de muy poca información, que junto con las variaciones hacen complicado definir adecuadamente un sistema tipo, sumándose además el elevado coste de las decisiones de diseño del proceso (maquinaria, personal, ...). Por ello, tenemos cierta incertidumbre que condicionará nuestros sistemas de control, como son las previsiones de demanda sujetas a variaciones, los tiempos de proceso estimados o la utilización de los recursos. Frente a esto, surgen una serie de sistemas que tratan de dar respuesta a este problema. Los más destacados son los sistemas MRP, Kanban y CONWIP.

Más concretamente este estudio se va a centrar en los entornos multiproducto, es decir, cuando en la planificación tenemos varios tipos de producto, y en cómo el sistema CONWIP es uno de los que mejor se adapta a nuestras necesidades.

## 2.1 Introducción a los Sistemas de Control de la Producción

En este apartado, se analizarán los sistemas usados para la producción y se discutirán distintos sistemas de control de la producción, que pueden optimizar o transformar los procesos para ser más eficientes en costes, tiempos de entrega y calidad.

En primer lugar, debemos conocer las tres tipologías básicas de las series de procesos que componen los sistemas productivos, para luego centrarnos en el que nos interese por cuestiones de diseño. Así, nos encontramos:

- Procesos de flujo o línea de flujo (Flow Shop): El sistema está organizado de forma que los productos siguen (aproximadamente) la misma ruta.
- Procesos de taller (Job Shop): El sistema está organizado en torno a los procesos o recursos, pudiendo seguir cada tipo de producto una ruta distinta.
- Proyecto: El producto es único y la organización del proceso de fabricación viene dictado por las características específicas del producto.

Nos centraremos ahora, en los sistemas compuestos por procesos de flujo o línea de flujo (Flow Shop), pues el fin del proyecto es el estudio de los sistemas de producción que pueden usarse en un sistema Flow-Shop. Con estos sistemas se busca tener un inventario en proceso constante dentro de un entorno de fabricación contra stock, es decir, controlar la producción a un nivel que se haga innecesario disponer de un almacén para el producto terminado, eliminando así los costes de inventario. Reflejado en el trabajo de autores como Hopp *et al.* (1996), estos sistemas se pueden dividir en dos:

- **Sistema *Push*:** Lo componen aquellos sistemas en los que se programan las órdenes de trabajo en función de los pronósticos de la demanda, sin tener en cuenta lo que se está produciendo en las distintas estaciones, generando un empuje en la producción.
- **Sistema *Pull*:** Son sistemas en los que se realiza la programación de las órdenes de trabajo en función del estado del sistema, tomando en cuenta los cambios de estado mediante diversas señales propias del sistema. Dentro de este grupo nos encontramos los sistemas *Just In Time (JIT)* como respuesta a una necesidad de flexibilizar la producción según la variedad de modelos, unidades, ... Buscando mantener un inventario en proceso mínimo debido a que los suministros o la entrega de productos a clientes llegan en el momento exacto, “justo a tiempo”, disminuyendo su tiempo dentro del sistema.<sup>1</sup>

A continuación, se pondrán los sistemas de control de la producción para los entornos Flow Shop.

### 2.1.1 Sistema MRP

El MRP (*Materiales Requirement Planning*), que ha sido revisado en numerosas ocasiones (algunos ejemplos son Plenert *et al.* 1986, Ptak 1991 y Matsuura *et al.* 1995), es propiamente un Sistema de planificación de la producción y gestión de stocks. Este sistema trata de dar respuesta a las preguntas de cuánto y cuándo se necesitan los materiales y recursos, consiguiendo un control y coordinación de los materiales respondiendo a las órdenes de producción (tasa de salida o *Throughput*). Por otra parte, las órdenes de compra y producción tienden a acumularse o empujarse, considerándose así el MRP como un modelo básico de los sistemas *Push*. Así, se dispone de los materiales en el momento necesario y se evita la necesidad de un inventario excesivo.

Este sistema a menudo se usa de base comparativa para otros sistemas, puesto que es un sistema que tiene un carácter básico y aborda los problemas de la ordenación del flujo de materiales de manera sencilla. A continuación, se detalla un esquema con sus elementos básicos.

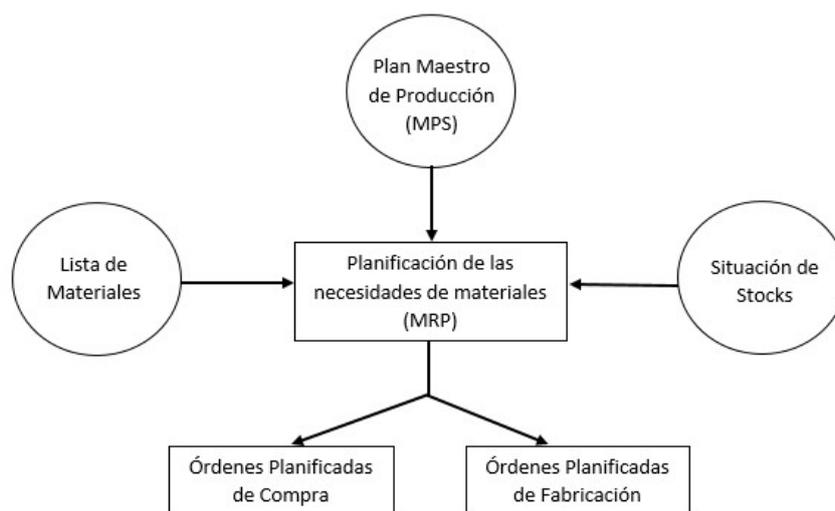


Figura 1. Esquema básico de sistema MRP [Fuente: Cruz 2014]

Englobamos en este también el **sistema MRP II**, que implica la planificación de todos los elementos que se necesitan para llevar a cabo el MPS, no sólo de los materiales a fabricar y vender, sino de las capacidades de fábrica en mano de obra y máquinas. Proporcionando así un sistema de planeamiento y control integrado.

<sup>1</sup> La principal diferencia entre ambos sistemas es que en los sistemas *Push* se controla el *Throughput* observando el WIP y en los sistemas *Pull*, al contrario, se controla el WIP y se observa el *Throughput*.

### 2.1.2 Sistema Kanban

Los sistemas *Kanban* son conocidos como sistemas de control de la producción tipo *Pull*, es decir, un sistema donde se comienza la producción a partir de la presente demanda (como indica Marek *et al.* 2001). Así, cuando un cliente origina una demanda de un producto, una señal Kanban (popularmente conocido como tarjeta) es enviada al centro de control, quien genera la etiqueta o tarjeta Kanban conteniendo el tipo de producto, número de parte, descripción, etc. Esta tarjeta se pega en los contenedores de materiales que se utilizan a lo largo del proceso productivo y es despegada cuando es utilizado, de esta forma se asegura la correcta reposición de los materiales.

Las tarjetas actúan como testigo del proceso de producción, cada vez que un trabajo (contenedor) entra en un buffer, se le asigna una tarjeta para la entrada a la estación correspondiente. Una vez que el trabajo sale de la correspondiente estación, se libera, de esta forma un nuevo trabajo puede entrar a la estación (o sistema) si existe una tarjeta que le pueda ser asignada. De esta forma, controlando el número de tarjetas presentes en el proceso productivo, así como el número de tarjetas presentes en cada estación, es fácil controlar los cuellos de botella y los desajustes de inventario.

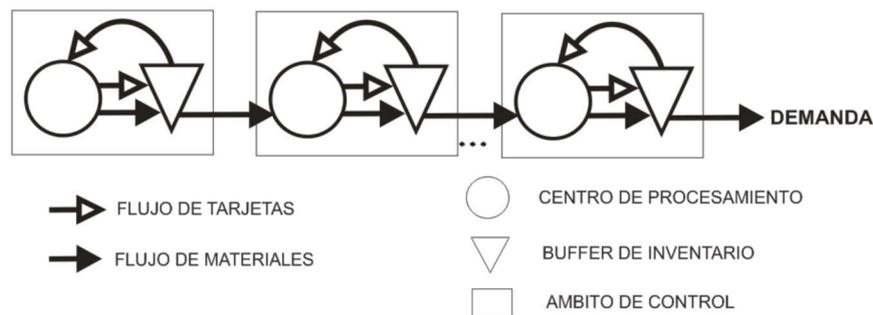


Figura 2. Esquema básico de sistema Kanban [Fuente: Mora 2012]

### 2.1.3 Variaciones del sistema Kanban

Tomando como base el sistema Kanban, pueden aparecer múltiples configuraciones y sistemas derivados del mismo:

- **Sistema Kanban de Doble Tarjeta:** Este tipo de sistema se utiliza cuando existen estaciones de trabajo con dos buffers, el primero para la entrada de inventario y el segundo para la salida. Con este sistema se pretende establecer unos límites en la cantidad de inventario que se encuentra en la estación, siendo este igual al número de tarjetas (Kanban) de ambos tipos que se encuentran en la estación.

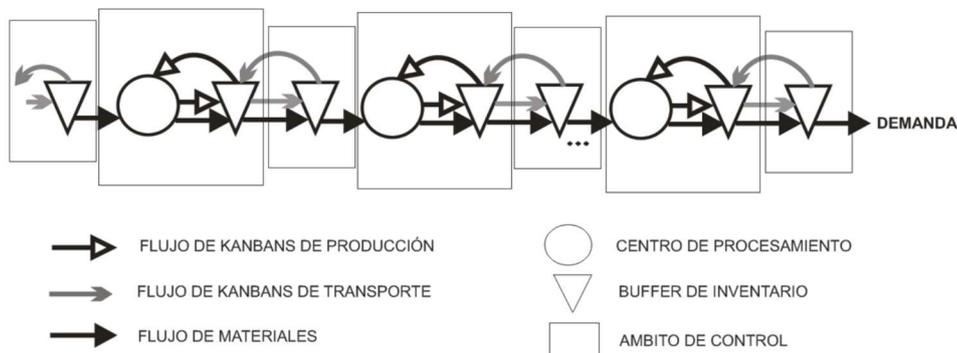
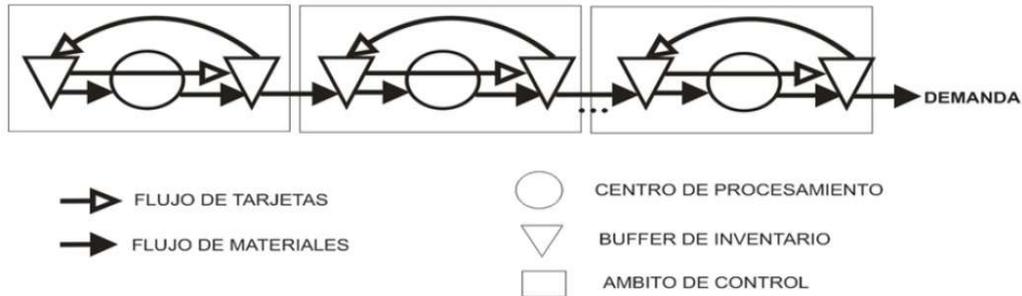


Figura 3. Esquema básico de sistema Kanban de Doble Tarjeta [Fuente: Mora 2012]

- **Sistema Kanban tipo *Minimal Blocking*:** Este sistema es utilizado cuando se busca el mínimo bloqueo entre estaciones, de esta forma, las estaciones cuentan con dos buffers (de entrada y de salida) y con un centro de trabajo. Se caracteriza porque solo se autoriza la tarjeta cuando los trabajos son retirados del buffer de salida de la estación, así el centro de trabajo solo utiliza un parámetro limitador del inventario en cada estación.



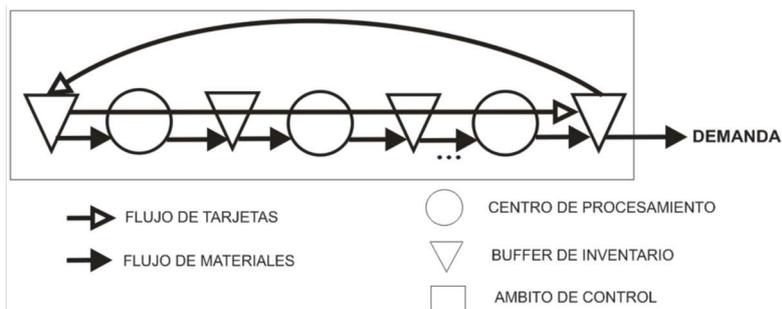
**Figura 4.** Esquema básico de sistema Kanban *Minimal Blocking* [Fuente: Mora 2012]

Estos ejemplos sirven para apreciar que, aunque puedan haber diferentes tipos de sistema kanban, todos se nutren por el control de las tarjetas en cada estación, comprendiendo así el funcionamiento de los sistemas kanbans.

#### 2.1.4 Sistema CONWIP

Como el propio nombre indica, CON - *constant*; WIP - *Work In Process*, el sistema CONWIP busca mantener los niveles de inventarios en proceso constantes. Al igual que los sistemas Kanban, se basa en una señal (tarjeta) que se fija a los trabajos (contenedores) al principio de la línea y que lo acompaña hasta que el trabajo sale de la línea y llega al cliente. En ese momento, se libera la tarjeta y regresa al comienzo de la línea para dar entrada a un nuevo trabajo.

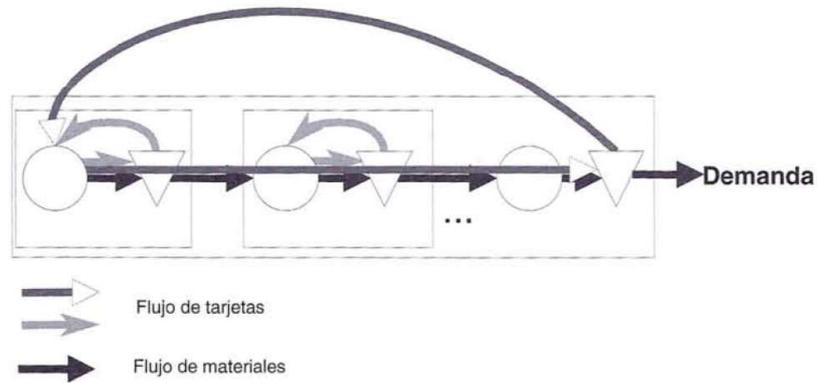
Este tipo de sistemas se puede definir como un sistema de control de la producción cerrado, híbrido entre los sistemas tipo *Pull* y *Push*, controlando la cantidad de materiales que entran al sistema y manteniendo un flujo constante de los mismos, reflejado por autores como Spearman *et al.* (1990). Así, cuando el sistema se llena no se dará entrada a ningún trabajo más hasta que no se produzca una salida, liberando así una tarjeta.



**Figura 5.** Esquema básico de sistema CONWIP [Fuente: Mora 2012]

### 2.1.5 Sistema Híbrido Kanban-CONWIP

Este tipo de sistemas aparece cuando predomina la política CONWIP, pero se complementa con el bloqueo entre estaciones del sistema Kanban. De esta manera, existe un doble flujo de tarjetas e información para las estaciones, uno de ellos global (CONWIP) y otro de carácter local (Kanban), esta última tarjeta se utiliza para limitar en mayor medida la acumulación local de inventario.



**Figura 6.** Esquema básico de sistema híbrido CONWIP-Kanban [Fuente: Crespo 1998]

### 2.1.6 Comparación de los sistemas de control de la producción

A continuación, expondremos una comparativa entre los distintos sistemas de control expuestos. Esta comparativa estará basada en ventajas y desventajas.

V E N T A J A S		
MRP	KANBAN	CONWIP
Flujo de información constante en los distintos departamentos de la empresa	Niveles de inventario reducidos, llegando a eliminar el stock entre procesos	Toma ventajas del sistema <i>Pull</i> , con tiempos de flujo o de residencia bajos y niveles muy reducidos de inventarios en proceso
Se reducen los niveles de inventario, mejorando la programación de estos	Mejor detección de los fallos de calidad durante la producción, facilitando el control de la producción gracias a que administra automáticamente la secuencia de producción	Autoriza la producción cuando se produce una demanda de producto, evitando así los inventarios finales o necesidad de almacén
Respuesta rápida a la hora de modificar los pedidos	Cumplimiento de los tiempos de entrega marcados por el cliente	Funciona correctamente cuando existe variabilidad de producto
Tiempos de inactividad bajos, acompañados de bajos costes de preparación y desmonte	Alta flexibilidad en la programación y planificación de la producción, gracias a su fácil entendimiento	No se genera exceso de inventario aguas arriba del cuello de botella
Alta calidad de servicio y satisfacción del cliente	Se reduce el manejo excesivo de los materiales, minimizando el desperdicio y el exceso de producción	Utiliza el MRP como un sistema de información, permitiendo así ajustarse en entornos <i>Pull</i> y <i>Push</i>

**Tabla 1.** Ventajas de los sistemas de control de la producción [Fuente: Elaboración propia]

D E S V E N T A J A S		
MRP	KANBAN	CONWIP
Tiene unos fundamentos muy cerrados que condenan al sistema. Como capacidad ilimitada y tiempos de entrega constantes	Menor efectividad cuando estamos en situaciones de recursos compartidos, debido a que los órdenes poco frecuentes generan inestabilidad a la hora de asegurar la producción	Requiere asumir un riesgo por parte de un soporte humano para reproducir correctamente la secuencia de los trabajos (establecer órdenes de prioridad y la variabilidad en las tarjetas)
Requiere que la información usada sea precisa para su implementación, en caso contrario, se producen errores en el planteamiento de los procesos	Inestable en sistemas con variaciones de producto, puesto que asume un sistema de producción repetitivo (creado para el área manufacturera)	Respuesta lenta ante los cambios de demanda, debido a que un cambio produce alteraciones en las señales del sistema
Debe tomarse como una herramienta de software, no genera la toma de decisiones	Las variabilidades (como el reprocesado) afectan al correcto funcionamiento del sistema generando señales confusas	Tiene el porcentaje de utilización de estaciones más bajo (exceptuando la estación cuello de botella)
Falta de compromiso de la alta gerencia, es un sistema de fabricación y no un plan empresarial	Poco efectivo en entornos de alta incertidumbre. Al llevar los niveles de inventario próximos al 0, alguna interrupción provoca que el cliente pierda el suministro, afectando a la calidad de servicio	Tiene mayor sobrecarga organizativa. Requiere de software de simulación para alcanzar las configuraciones óptimas del sistema
Suelen producirse fallos en el proceso de instalación debidos a su alta rigidez	Con plazos de abastecimientos amplios se producen periodos de inactividad en los trabajadores	Ineficiente en entornos con poca variabilidad de producto

**Tabla 2.** Desventajas de los sistemas de control de la producción [Fuente: Elaboración propia]

En resumen, esta comparación tiene como propósito enfrentar los sistemas de producción con el fin de clarificar las diferencias entre los distintos mecanismos de funcionamiento y evidenciar las ventajas del sistema CONWIP, objeto de estudio en este trabajo.

Por ello, se descarta en primer lugar el MRP (y su variante MRP II), puesto que tiene sus ventajas como un sistema de información completo, pero no es tan válido como sistema de control de la producción al ser un sistema abierto. Además, otros sistemas de control como el CONWIP lo utilizan como herramienta propia y muestran una superioridad frente a este sistema, como se expone en algunas comparaciones realizadas por otros autores como Roderick *et al.* (1992).

Spearman (1990) llega a afirmar que “en un sistema Kanban, generalmente habrá WIP (...) aguas arriba del cuello de botella (...). En un sistema CONWIP, el WIP tenderá a acumularse en el cuello de botella”. Esto se debe a que el bucle que tienen las tarjetas para ser liberadas en el sistema CONWIP es mucho mayor a los pequeños bucles que presentan las tarjetas en los sistemas Kanban, debido a que estos presentan múltiples bucles en secuencia. Por otra parte, la superioridad del CONWIP está en que utiliza menos stock en proceso y un menor número de tarjetas para llegar a controlar el sistema.

Esta superioridad la reflejan también los fabricantes, que encuentran una gran ventaja en fijar un valor para el WIP, así se establece ese límite que impide que las órdenes de producción se acumulen como material físico en el sistema. A su vez, se gana flexibilidad y se agiliza la producción y la programación cuando se mantiene este nivel de WIP, evitando de nuevo el exceso de producto o material (empleado en la producción), que de otra forma se eliminaría reflejándose en pérdidas financieras. Por consiguiente, otra ventaja del control del WIP es la reducción de la variabilidad reflejada en el tiempo de ciclo. Esto se refleja mediante la Ley de Little<sup>2</sup>, donde, manteniendo la tasa de llegada, un aumento en el nivel de WIP ( $w$ ) se reflejaría en un aumento del tiempo de ciclo ( $ct$ ), tendiendo a la acumulación del WIP y causando una variabilidad en el tiempo de ciclo. En resumen, limitando el WIP se reduce la variabilidad del tiempo de ciclo, disminuyendo los costes por acumulación de inventario. Por último, tenemos estudios, como el de Bonvik *et al.* (1998), que destacan la superioridad del sistema CONWIP respecto a otros sistemas de tipo *pull*.

Por todo ello, el sistema de control de la producción a estudiar y analizar será el sistema CONWIP. Además, al tratarse de un escenario multiproducto, se ha reflejado anteriormente que es el sistema CONWIP quien ofrece mejores resultados, el cual realmente funciona tanto con las decisiones basadas en el nivel de inventario (*push*) como sobre la base de transformar el plan maestro de producción según las necesidades de artículos (*pull*).

---

<sup>2</sup> Expresión dada por:  $w = \lambda * ct$

## 2.2 CONstant Work In Process al detalle

De acuerdo con lo expuesto por Martins y Laugeni (2005), los diferentes sistemas de control de la producción, *Pull* y *Push*, no tienen que ser mutuamente excluyentes, pueden coexistir. Aunque presentan diferencias significativas entre ellos. Su aplicabilidad dependerá del tipo de sistema (o fábrica) y de las características de la demanda de los clientes. Por ello, CONWIP se presenta como un sistema híbrido de control de la producción, compartiendo los reducidos niveles de inventarios propios del Kanban.

Mantener constante el inventario en proceso (que equivale a la nivelación de la producción propia del Kanban), autorizar la producción solo cuando llegue el cliente (propio de los sistemas *pull*), el chequeo de los cuellos de botella para verificar la capacidad, tener en cuenta la variabilidad, reconocer el MRP como sistema de información o las ventajas de los sistemas *push* a la hora de limitar el inventario, son algunos conceptos que acuñaron sus creadores, Wallace Hopp y Mark Spearman (1995).

En resumen, el sistema CONWIP utiliza tarjetas para poder controlar de forma eficaz el nivel de inventario en proceso. Dichas tarjetas se asignan a cada trabajo (producto, pieza, contenedor, etc.) al comienzo de la línea de producción. Cuando dicho trabajo es procesado en la última estación, se envía a la línea de inventarios de productos terminados. Una vez que el cliente se lleva el producto terminado, se libera la tarjeta y es enviada de nuevo al comienzo de la línea, donde esperará para ser asignada a otro trabajo. Esto limita en gran medida el inventario en proceso, pues ninguna orden de trabajo puede entrar a la línea de producción si no está acompañada de su tarjeta.

### 2.2.1 Consideraciones

A continuación, se expondrán una serie de consideraciones que definirán de forma más detallada el funcionamiento del sistema:

- Una tarjeta acompaña a cada trabajo (o conjunto de piezas, contenedor, etc.) al inicio de la línea de producción.
- Cuando el trabajo llega al final de la línea, la tarjeta queda liberada, extrayéndose de dicho trabajo y enviándose al principio de la línea.
- La tarjeta espera en una cola a la espera de la asignación de un nuevo trabajo. La asignación generalmente se realiza mediante el criterio FCFS.
- En ningún caso un trabajo entrará a la línea de producción si no tiene una tarjeta asignada, aunque la primera estación de la línea esté ociosa.
- Las tarjetas son utilizadas para controlar el WIP total a lo largo de cada punto del sistema.
- La tarjeta autoriza tanto el transporte del trabajo dentro del sistema como su producción.
- La tarjeta se adhiere a un nuevo trabajo cuando existe una nueva demanda.
- Las tarjetas limitan el WIP total del sistema, siendo este nivel constante.

### 2.2.2 Determinar el número de tarjetas

Como todo sistema de control de la producción, su objetivo principal es reducir los costes asociados a la producción. El sistema CONWIP consigue esta reducción de coste mediante unos niveles de inventario en proceso reducidos y constantes. Esta reducción se consigue mediante la correcta determinación del número de tarjetas, problema para el que aún no hay una regla definida. Se busca conseguir ese número de tarjetas mediante un equilibrio entre el nivel de servicio (tasa de salida) que se quiere alcanzar y el inventario en proceso que se quiera mantener.

Sin embargo, para la determinación del número de tarjetas, se puede acompañar los modelos de simulación con los valores obtenidos mediante la fórmula de Hopp y Spearman (1995), que estima el número de tarjetas necesarios en función del *Throughput* (TH) y nos da una primera estimación del valor óptimo:

$$TH(w) = \frac{w * r_b}{w + W_0 - 1}$$

Donde,

$w$  = Número de tarjetas

$r_b$  = Tasa de producción del cuello de botella, en trabajos por unidad de tiempo

$W_0$  = Cantidad del tamaño óptimo

$$W_0 = r_b * T_0$$

$T_0$  = Tiempo de ciclo global del proceso

### 2.2.3 Secuenciación de los trabajos

La secuenciación hace referencia a elegir qué tipo de trabajo debe entrar en el sistema y, por consiguiente, la configuración adecuada de las tarjetas para cada tipo de trabajo, cuando estamos en un entorno de fabricación con más de un tipo de producto. Esta configuración es importante debido a que, al tener varios productos, se tiene que comprobar si los distintos trabajos comparten el cuello de botella o este es dependiente del trabajo que entre al sistema (el concepto de cuello de botella se tratará de forma concisa más adelante).

Esta cuestión suele generar conflicto, pues al no tener reglas definidas, un fallo en la secuenciación de las órdenes puede generar una acumulación de los trabajos durante el proceso, dificultando el establecimiento de las prioridades de los trabajos conforme a las fechas de entrega a los clientes. Por ello, en entornos contra stock la decisión debe enfocarse en la ordenación de los trabajos en los buffers intermedios y la correcta regla de entrada de los trabajos en el sistema. Spearman *et al.* (1990), establece que la mejor regla entre estaciones es la regla FCFS, conclusión a la que también se llegan en estudios como los de Duenyas (1994) y Framiñán *et al.* (2000).

## 2.3 Políticas de control para el Sistema CONWIP

Como se ha mencionado anteriormente, CONWIP es aplicable a muchos entornos productivos, funcionando tanto con las decisiones que se basan en el nivel de inventario (*Pull*), como con las decisiones propias del Plan Maestro de Producción para las necesidades de artículos (*Push*). Por tanto, desde el concepto original han ido surgiendo distintas aportaciones y otras tantas modificaciones.

Estas modificaciones surgen a raíz de elegir la correcta programación de los trabajos de forma dinámica en los sistemas, tomando una serie de decisiones con respecto a ciertos parámetros de entrada, como es la forma de liberar las órdenes de trabajo (tarjetas) de nuestro sistema. Para un sistema CONWIP multiproducto, se definieron en un primer momento dos políticas de control para la liberación de las órdenes de trabajo (Duenyas 1994), que son las políticas S-CLOSED y M-CLOSED. Por ello, a continuación, se empezará tratando y presentando ambas políticas. Posteriormente, se expondrán nuevas variaciones surgidas a partir de ambas políticas de control.

### 2.3.1 Política S-CLOSED

Conocida como *Single-chain Closed-Loop input policy*, es una política de entrada de bucle cerrado con cadena única. Se trata de implementar un sistema que usa solo un tipo de tarjeta que se adjuntará a todas las órdenes de trabajos que vayan a entrar, independientemente del tipo.

Su funcionamiento es simple, la entrada de un nuevo trabajo al sistema se produce cuando otro trabajo es retirado del inventario de productos terminados, pero ambos trabajos no tienen por qué ser del mismo tipo, es decir, puedo retirar un trabajo de tipo B y entrará al sistema uno del tipo A. Así, la entrada al sistema es independiente del tipo de trabajo que sale, pues se utiliza una misma tarjeta para todos los trabajos, lo que permite llevar el control de inventario total dentro del sistema de forma adecuada y compacta.

### 2.3.2 Política M-CLOSED

Esta política consiste en establecer un conteo de tarjetas para cada tipo de producto, definiendo la entrada de tarjetas como un bucle cerrado con cadena múltiple. Así, la entrada de un nuevo trabajo es autorizada cuando se ha retirado del inventario de productos terminados un trabajo del mismo tipo, liberando así la tarjeta asociada. De esta forma, se lleva un control más detallado del inventario presente en el sistema, puesto que se define un número concreto de tarjetas asociadas a cada tipo de trabajo, limitando así el número de trabajos de cada tipo en el proceso de producción.

Esta política también permite adaptar más el sistema a la demanda al poder establecer un número de tarjetas distintas para cada tipo de trabajo. De esta manera, la calidad del servicio se puede mantener aumentando las tarjetas para los tipos de trabajos que presenten una mayor demanda, dejando un número de tarjetas menor para aquellos que presenten una demanda más reducida, permitiendo así controlar el WIP total y adaptarlo a las diferentes situaciones.

### 2.3.3 Sistema TOC

Este tipo de sistema es muy útil en entornos con un cuello de botella marcado, aludiendo así a la Teoría de las Restricciones (*Theory Of Constraints - TOC*). La teoría TOC expone que hay ciertos procesos con restricciones en la capacidad, dictadas por el tiempo de la producción. Como respuesta surge el método DBR (*Drum Buffer Roper*), que busca reconocer dicha restricción y propone un sistema alternativo basado en el sistema de control de la producción aplicado, evitando así la transmisión de fluctuaciones en los procesos.

En este caso, el sistema propuesto hace que la recirculación de las señales (tarjetas) no se produzca una vez que el producto ha sido entregado al cliente, sino cuando ha finalizado su paso por la estación en la que se encuentra el cuello de botella. Una vez que la tarjeta ha sido liberada en la estación correspondiente del cuello de botella, el mecanismo empleado en las operaciones de las estaciones siguientes es *Push*, marcado hasta el final del sistema.

De esta forma, este sistema da lugar a dos políticas más, una de S-CLOSED/TOC y otra de M-CLOSED/TOC. Para hacer estas dos variantes óptimas, la entrada de las nuevas órdenes de trabajo se realizará con mayor o menor frecuencia en función del punto de inventario final, evitando así acumulaciones innecesarias de inventario que podrían alterar los resultados.

## 2.4 Conclusiones

En resumen, dejar de implementar mejores resultados y sistemas de control en las empresas significaría dar ventaja a la competencia. Por ello, las diferentes políticas de los sistemas CONWIP multiproducto mostradas, representan distintas opciones estratégicas para competir en el mercado y buscar un mayor beneficio para la propia empresa. Esto se consigue mejorando el servicio a los clientes y buscando una forma de optimizar los recursos, mediante diseños mejores, disminuyendo los tiempos de servicio, evitando costes de inventario, etc.

Elegir cuál de las políticas se debe implementar en las líneas de producción de una empresa es una tarea complicada, puesto que la información existente acerca del funcionamiento de algunas de ellas es muy limitada. Esto es debido a la inexistencia de un marco de directrices unificado para modelar los sistemas de control de la producción, llegándose a encontrar resultados contradictorios para muchos autores (Framiñan *et al.* 2003 o Gstettner *et al.* 1996 son algunos ejemplos).

Para dar una solución a este problema, se procederá a realizar un estudio mediante la construcción de modelos simulados de las políticas de control del sistema CONWIP multiproducto. Estos modelos, que se pretenden construir, simular y analizar, pretenden reproducir las diferentes situaciones y complejidades con las que se encuentran las empresas. Para ello, se presentarán una serie de escenarios diferentes, con el fin de encontrar un marco comparativo válido.

# 3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En todas las actividades productivas, se busca alcanzar el máximo beneficio. Pero surge un problema, experimentar sobre nuestro propio sistema no es sencillo ni recomendable, por ello se intentan crear situaciones similares y parejas que se acerquen a nuestro sistema (modelos o prototipos). El conjunto de herramientas que nos permiten evaluar nuestro sistema es muy variado, desde herramientas básicas de calidad (diagrama DAFO, curvas de rendimiento, etc.) a otras más avanzadas.

Dentro de este abanico de opciones, se encuentra el software de simulación, como herramientas o alternativas para simular procesos y escenarios, desde simulaciones de carácter general, a otras más específicas. Así, la simulación es el elemento esencial de la planificación para llevar a cabo la presupuestación y estimación de futuras necesidades de una empresa.

A continuación, se presentará la simulación como un método viable y el conjunto de herramientas que permiten llevarla a cabo. Posteriormente, se tomará una de las herramientas mencionadas con el fin de que sea la que más se adapta a las necesidades de este estudio. Esta herramienta, Arena Simulation, será presentada para poder conocer su forma de actuar y comprender su funcionamiento. Por último, se expondrán los escenarios realizados mediante la simulación, para posteriormente aplicarlos a las variantes del sistema CONWIP multiproducto.

## 3.1 El concepto de simulación

La simulación “es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con el mismo con la finalidad sea de aprehender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para entender el funcionamiento del sistema”<sup>3</sup>. Por ello, la simulación es la opción elegida a la hora de realizar este trabajo, puesto que presenta grandes ventajas que permiten modelar un marco comparativo real.

Así, la aplicación de la simulación a nuestro sistema busca alcanzar unos objetivos que quedan recogidos en los siguientes puntos (Schmidt 1995):

- Análisis del sistema existente: Se busca mejorar la comprensión y optimizar el sistema mediante la evaluación de distintas estrategias frente al mismo problema. Se consigue así, obtener un ciclo de mejora continua que permite adaptar al máximo el sistema implementado a la realidad.

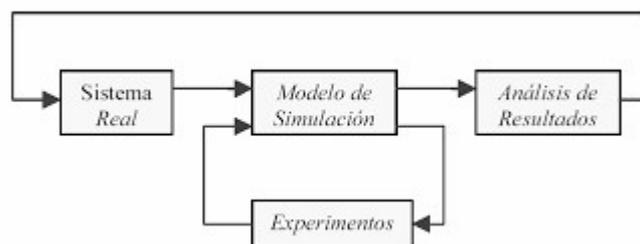
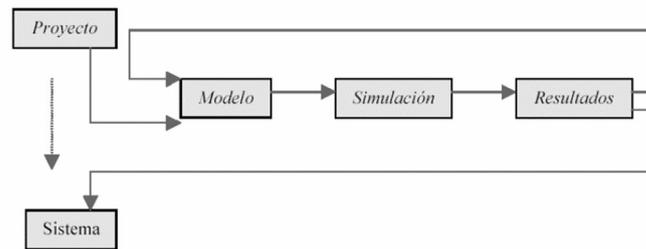


Figura 7. Esquema del proceso de análisis [Fuente: Espinosa 2012]

<sup>3</sup>Definición por Robert Shannon, 1975.

- **Diseño de nuevos sistemas:** En este punto, enfrentamos el problema a nuevos modelos para obtener otras soluciones que minimicen los aspectos negativos del sistema real y se adapten al proyecto.



**Figura 8.** Esquema del proceso de diseño [Fuente: Espinosa 2012]

Con todo ello, la simulación consigue crear un modelo del sistema y evaluar las distintas modificaciones sobre el mismo evitando el riesgo y con coste cero. A continuación, se realizará una introducción a las distintas herramientas de simulación, para posteriormente elegir la que más se ajuste a la realización de este proyecto.

## 3.2 Herramientas de simulación

La simulación de los sistemas productivos se realiza con programas de simulación por eventos discretos, esto es, sistemas que cambian el estado interno del sistema debido a la ocurrencia de algún evento, como puede ser la entrada de nuevas órdenes de trabajo o terminar el tiempo de proceso en una estación.

A su vez, los modelos generados en la simulación pueden clasificarse en dos grupos, deterministas o estocásticos, según la naturaleza de sus variables. En el primer grupo, los modelos deterministas, se encuentran aquellos modelos que en función de unos parámetros y variables de entrada siempre va a producir la misma salida. Por otro lado, en el segundo grupo, los modelos estocásticos, se encuentran aquellos modelos que sí tienen en cuenta variables aleatorias, lo que generará distintas variables de salida cada vez que se realiza una ejecución del modelo. En este análisis, emplearemos los modelos que engloba este segundo grupo, puesto que los sistemas productivos a menudo están ligados a las variables aleatorias (variaciones en la demanda, disponibilidad de materiales, ...). El hecho de simular dichos modelos estocásticos implicará la realización de múltiples simulaciones, cuyo fin será analizar el comportamiento de las variables de interés dentro del sistema.

Para realizar los modelos, existen herramientas de simulación comerciales como ProModel, Aspen Plus, Simio, Arena, etc. En general, estos programas pertenecen a grupos empresariales que proporcionan a su vez herramientas de ingeniería, diseño, y visualización, facilitando la integración de estos programas mediante la incorporación de librerías, consiguiendo que la modelización de los distintos sistemas sea sencilla.

En resumen, mediante las herramientas de simulación presentan una serie de ventajas que convierten a la simulación en un método efectivo de obtener resultados fiables (Fishman 1997):

- Se reduce el tiempo de desarrollo y actuación del sistema.
- Permite la experimentación de manera artificial del sistema.
- El coste se reduce al uso de las licencias de los software de simulación.
- Es una técnica más sencilla que el empleo de modelos analíticos y permite realizar un modelo de los escenarios a tratar y permite añadir cualquier tipo de restricción
- No afecta al sistema real, evitando el desgaste y permitiendo controlar la simulación en todo momento
- Permite verificar y validar los modelos, comparando los datos obtenidos con sistemas reales
- Mediante la hoja de resultados se pueden analizar las principales salidas del sistema simulado, logrando un ciclo continuo de optimización

Dentro de este grupo se encuentra el software Arena Simulation, que es el elegido (después de un proceso de selección) para realizar este proyecto. La elección de este software está basada en su utilidad a la hora de la simulación de sistemas productivos con una complejidad media y elevada, dando una gran consistencia a los modelos tanto en la fase de diseño como en la fase de mejora, destacando su carácter intuitivo y visual.

### 3.3 Arena Simulation

Arena es una herramienta que consigue combinar la facilidad de los simuladores de alto nivel con la flexibilidad de los lenguajes de programación (como lenguaje C o Microsoft), consiguiendo la correcta adecuación del nivel de programación necesario dentro del mismo modelo (Allende 2000). Es un software orientado al proceso, permitiendo la descripción de la experiencia que las entidades desarrollan en el interior del sistema. Todo ello se consigue a través del modelamiento de plantillas basadas en diagramas de flujo. Estas plantillas se organizan en distintos paneles intercambiables que contienen unidades gráficas llamadas módulos (bloques específicos), de forma que la creación de los modelos está asistida gráficamente en todo momento.

La flexibilidad a la hora de realizar el modelado se debe a su estructura jerárquica, que engloba el uso de componentes SIMAN para formar los módulos y la posibilidad de importar archivos de otros programas como Visual Basic, AUTOCAD o Microsoft Office. La versión que se utilizará para este proyecto es la 14.00.

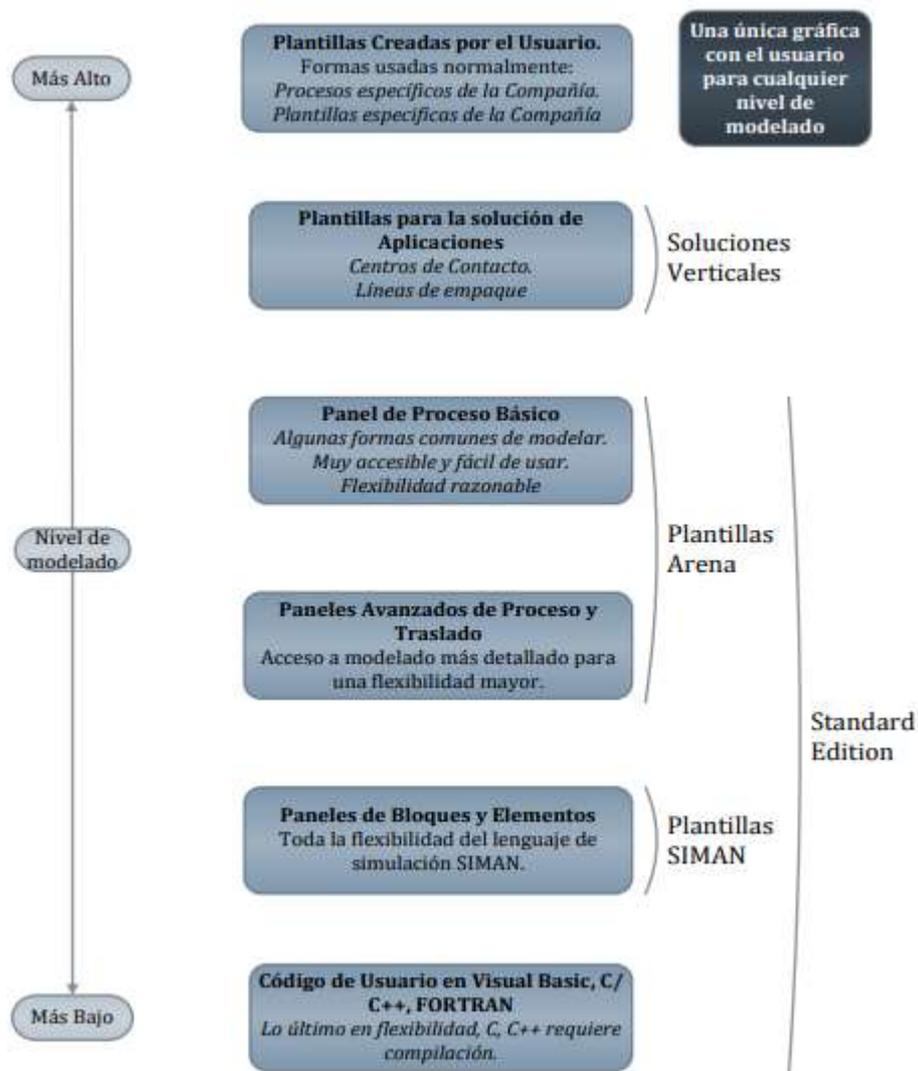


Figura 9. Estructura jerárquica del software Arena [Fuente: Gómez 2006]

### 3.4 Nociones básicas del programa

En este apartado se van a definir las partes que intervienen en un modelo de simulación (Kelton *et al.* 2008):

- Entidades: Representan cualquier objeto real que se mueve a través del sistema pudiendo causar cambios en los estados del sistema o interactuar con otras entidades. Son los objetos dinámicos en la simulación. En este proyecto utilizaremos las entidades para representar las órdenes de trabajos, trabajos en proceso y los clientes.
- Atributos: Se utilizan para individualizar y caracterizar las entidades, diferenciándolas de las demás. Los valores de los atributos están unidos a entidades específicas, tomando así el carácter de variable local. Como ejemplo de atributo nos encontramos los tiempos de proceso, que serán propios de cada orden de trabajo.
- Módulos: Los módulos son los elementos básicos con los que se construyen todos los modelos, permitiendo describir la dinámica asociada a los procesos del sistema, siendo los nodos de la red del sistema por la que circulan e interactúan las entidades.
- Recursos: Representan aquello que es necesario para realizar un proceso, esto es, un operario, máquina, herramienta, etc. Dichos recursos son elementos estáticos donde se alojan las entidades, mostrando los posibles estados definidos por el programador (ocupado, libre, etc.). En concreto, en este proyecto los operarios que trabajan en las diferentes estaciones serán representados como recursos, existiendo uno por estación. Si fuera necesario se podría incluir más de un operario (recurso) por estación, aumentando así la velocidad de esta.
- Colas: Caracterizan a los buffers, que son los espacios donde las entidades esperarán su movimiento dentro del sistema cuando un recurso o estación esté ocupado.
- Estaciones: Son los subsistemas existentes en el modelo, haciéndolo más manejable y proporcionando la definición del movimiento entre las entidades.
- Transporte: Representa la conexión entre las distintas estaciones. En este proyecto se establece una conexión directa entre estaciones con una duración de cero unidades de tiempo, aludiendo al transporte instantáneo definido anteriormente.
- Variables: Es parte de la información que refleja las características del sistema. No hay un límite establecido para el número de variables en relación con el número de entidades. Dentro del software se emplean dos tipos de variables, las definidas por Arena (como el número de entidades o número de recursos ocupados) y las variables creadas por el programador. Al contrario que los atributos, las variables tienen un carácter general dentro del sistema, siendo accesibles por todas las entidades para su obtención.
- Acumuladores estadísticos: Se utilizan para conseguir medidas de rendimientos o salidas llevadas a cabo por el sistema. Pueden estar definidas por el programador y hacer uso de varias variables que actúen como acumuladores. Un ejemplo es el tiempo medio de espera en cola o el porcentaje de ocupación de las estaciones.
- Reloj de Simulación: Es la variable principal del sistema, donde se recoge el tiempo actual de la simulación, marcando el transcurso de los eventos.

### 3.5 Módulos

Los módulos se consideran el bloque básico de construcción para definir los diferentes modelos en Arena. Por ello, se expondrán brevemente los módulos usados en las diferentes simulaciones con el fin de agilizar el entendimiento de los modelos.

- **Create:** Es el módulo que crea nuevas entidades. Para definirlo, se debe proporcionar un tiempo entre llegadas (tasa de entrada), definir el número y tipo de entidades por llegada.

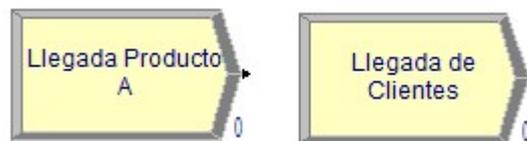


Figura 10. Módulos Create usados en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

- **Dispose:** Es el módulo que permite a las entidades abandonar el sistema. Indica la tasa de salida del mismo, permitiendo recolectar las estadísticas de cada entidad (como el tiempo promedio en el sistema).

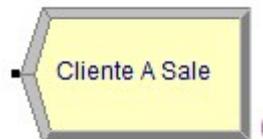


Figura 11. Módulo Dispose usado en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

- **Assign:** Este módulo se emplea para asignar los valores a las variables y las características a las entidades (atributos, tipo, etc.), pudiendo relacionar variables y entidades facilitando el reporte de estadísticas.

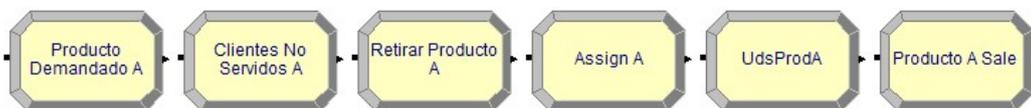


Figura 12. Módulos Assign usados en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

- **Seize/Release:** El módulo Seize permite asignar recursos a las distintas entidades presentes el sistema. Consta de un buffer (cola) donde esperan las entidades hasta que haya un nuevo recurso libre para poder ser asignado. Por el contrario, el módulo Release representa la liberación del recurso. Para este proyecto, se emplearán para asignar y liberar las tarjetas de las órdenes de trabajo.

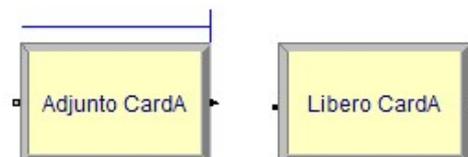


Figura 13. Módulo Seize (izquierda) y módulo Release (derecha) usados en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

- **Process:** Este módulo representa las estaciones de procesamiento dentro del sistema, incluyendo máquina, operario (recurso) y el buffer de entrada (cola). Representa la transformación de las órdenes de trabajo en productos, ocupando y liberando los recursos.

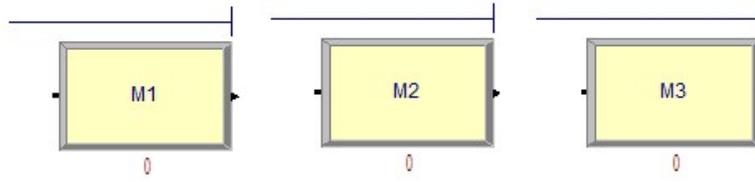


Figura 14. Módulos Process usados en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

- **Decide:** Es el módulo encargado de la toma de decisiones dentro del sistema, permitiendo que las entidades tomen un camino u otro del sistema. La decisión puede estar basada en una o varias condiciones (como el tipo de tarjeta) o en función de probabilidades (por ejemplo, 40% opción A, 30% opción B y resto C). Las condiciones se pueden basar en el valor de los atributos, las variables, el tipo de entidad o alguna expresión (de desigualdad, igualdad, condicional, etc.).



Figura 15. Módulos Decide usados en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

- **Hold:** Este módulo permitirá que una entidad espere en una cola a la espera de que una señal o condición llegue a ser verdadera para poder seguir avanzando en el sistema, dispone de un buffer de entrada. En este proyecto se empleará como inventario de productos terminados o punto de espera de la demanda de los clientes.

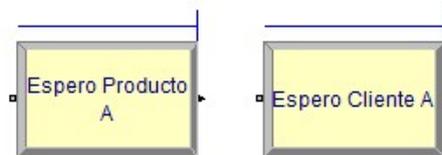


Figura 16. Módulos Hold usados en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

- **Batch:** Es el módulo que funciona como un mecanismo de agrupación dentro del sistema, pudiendo agrupar varias entidades en una, o recrear la agrupación de lotes. En el proyecto se utilizará para representar al cliente llevándose el producto.

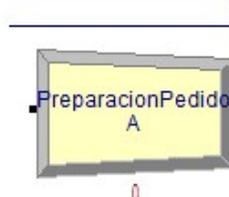


Figura 17. Módulo Batch usado en la simulación [Fuente: Elaboración propia]

### **3.6 Conclusión**

En resumen, en este capítulo se ha descrito el enfoque con el que se va a abordar el problema planteado en este trabajo, siendo la simulación de eventos discretos elegida como mejor opción. Por otra parte, hemos definido la herramienta concreta elegida para ello, Arena Simulation, tras analizar las ventajas e inconvenientes de las distintas opciones.

Una vez que se ha entendido la metodología empleada en este trabajo, se procederá a definir de forma más detallada el escenario que es objeto de estudio para poder aplicarlo al sistema CONWIP multiproducto. Esto consistirá en definir de forma clara las variables, restricciones y otros aspectos que puedan afectar al análisis de los resultados, así como la exposición de los parámetros que lo definirán. Por último, se realizará la validación de los modelos.



# 4 MODELADO Y VALIDACIÓN

---

En este capítulo se pretende alcanzar el conocimiento necesario acerca de las variables y restricciones que influyen dentro de los modelos expuestos en el capítulo anterior. El propósito es verificar y comprender los datos que posteriormente aparecerán en los resultados. Seguidamente, se definirán de forma clara los parámetros de los escenarios, creando un entorno definido a la hora de comparar las distintas variantes del sistema CONWIP multiproducto. Por último, se realizará un breve comentario acerca de la validación de dichos modelos empleados, fijando así, que el marco de estudio definido es válido.

## 4.1 Variables de interés

A continuación, se van a presentar una serie de conceptos que hay que definir a la hora de elegir una correcta política durante la implantación de un sistema CONWIP, esto es, las variables a tener en cuenta para optimizar nuestro sistema.

- **Número de tarjetas:** Hace referencia a la optimización del orden y número en el que las tarjetas están dispuestas, es decir, debemos de elegir un número para cada tipo de trabajo y una configuración que haga que nuestro sistema sea óptimo.
- **Fill rate:** Indicador que alude a la satisfacción del cliente y consecuentemente, al buen funcionamiento de la política adoptada. El problema con el *Fill rate* o tasa de servicio surge a raíz de que, si el escenario de simulación presenta un tiempo de simulado (*short-run*) demasiado pequeño, la demanda a corto plazo coincide con la demanda a largo plazo. Esto impide reflejar datos correctos sobre el *Fill rate*, los puntos de rotura de inventario o los tiempos de espera de los clientes. Por consiguiente, debemos adoptar un tiempo de simulación adecuado.
- **Tasa de entrada:** Número de trabajos que entran en el sistema por unidad de tiempo. La tasa de entrada debe ser adecuada para que se produzca un inventario en proceso constante y unos niveles altos de utilización de las estaciones, sin llegar a saturar. Una tasa de entrada demasiado elevada llevaría a la saturación del sistema, pero nuestro sistema mantendría el inventario en proceso a costa de aumentar los tiempos de entrega, lo que arrojaría una información fuera del óptimo del sistema.
- **Tiempo de espera:** Alude al tiempo medio que tendrían que esperar los clientes por cada producto. En este tiempo se ve reflejado el transporte entre estaciones, el tiempo que tardan los productos en ser procesados y los tiempos en los diferentes buffers. Para este estudio se tomará el promedio de tiempos de espera que sea más elevado entre los tipos de trabajos, evitando así mejorar el *fill rate* a costa de ofrecer un mal servicio de alguno de los productos.
- **Tipo de política:** Como se presentaron en el punto anterior, existen distintas políticas a adoptar para un sistema CONWIP (M-CLOSED, S-CLOSED, etc.). Por consiguiente, se debe de realizar un análisis de cada una ellas y explorar otras alternativas, sin recurrir al fallo de otros estudios de elegir la política a emplear en función de un estudio en un escenario no representativo. Es decir, lo que se puede aplicar para un sistema con 4 estaciones quizás no sea lo más adecuado para un sistema de 20 estaciones.
- **Tiempo de proceso:** En otros estudios, se cae en el error de asignar un tiempo de proceso para cada máquina, independiente del tipo de trabajo, y la distribución más usada es la UNIF [1,4]. En este análisis buscaremos ampliar un poco más los tiempos de proceso y se asignará a cada tipo de trabajo y máquina, dando lugar a un escenario más amplio y representativo.
- **Porcentaje de utilización:** Presenta el tiempo de ocupación o utilización de las estaciones. Cuando se busca el óptimo de algún sistema de producción se pretende que no se produzcan periodos de inactividad, pues llevan asociados tiempos de *Set-Up* (Puesta en marcha) y hacen que los recursos (operarios) se estén desaprovechando.

## 4.2 Restricciones a considerar

En este apartado, se tratarán una serie de cuestiones que influirán notablemente a la hora de implementar y resolver el estudio presentado.

### 4.2.1 Transporte entre estaciones

El transporte entre estaciones, o el paso de las unidades de flujo del sistema de una estación a otra, pueden modificar los tiempos entre llegadas o la variabilidad del sistema. Por ello, este problema se puede modelar según dos formas diferentes:

- Transporte instantáneo: Es la forma más común considerada en los experimentos, donde las unidades procesadas pasan a la siguiente estación en un tiempo despreciable.
- Transporte no instantáneo: Las unidades procesadas tardan un tiempo característico en pasar a la siguiente estación, lo que debe considerarse como una nueva variable aleatoria. No obstante, por norma general este caso se modela mediante la creación de nuevas estaciones ficticias que modelan los tiempos de transporte, aludiendo así a la formación de lotes, transportes mediante unidades móviles o cintas transportadoras.

### 4.2.2 Paradas del sistema

Durante su funcionamiento, el sistema puede sufrir paradas que le obliguen a reiniciar ciertas actividades y a volver a poner el sistema en puesta en marcha (aunque en los escenarios no se van a contemplar). Las más características son:

- Reprocesado: Los trabajos suelen ser examinados a la salida de las estaciones de trabajo. Así, cuando se detecta algún defecto, vuelven a entrar en la estación correspondiente con prioridad (generalmente) para volver a ser procesados y sufragar los defectos. Esto genera distintos efectos sobre el sistema, como son el oscilamiento dentro del tiempo de procesado de las unidades al aumentar el tiempo efectivo que la unidad está en la estación, la reducción de la capacidad efectiva de las máquinas o el aumento de la varianza del proceso.
- Interrupciones/averías: Una parada no prevista en una de las máquinas genera una interrupción en el sistema. Este tipo de interrupciones suele estar generado por la obsolescencia de las máquinas o un error durante la puesta en marcha (error en programación) y tienen que ser solventadas mediante un mantenimiento correctivo hasta que se arregla la avería. Este tipo de paradas se suele modelar parando el sistema de forma aleatoria o dando una probabilidad  $T$  de que se produzca una avería dentro del sistema.
- Paradas planificadas: Hacen referencia al intervalo de tiempo en el que el sistema no funciona debido a un cambio de turno en los trabajadores o a un mantenimiento preventivo. Dicho mantenimiento se realiza para evitar averías inesperadas.

### 4.2.3 Cuello de Botella

Se define el cuello de botella (*bottleneck*) como la estación que ralentiza nuestro sistema, siendo esta la fase de nuestro proceso productivo más lento y con el porcentaje de utilización más elevado. Esto provoca que las etapas posteriores del sistema van a sufrir retrasos en forma de periodos de inactividad no deseados, provocando una reducción de la productividad y, por consiguiente, un aumento en el coste final del producto. Dicho de otra forma, es una restricción de la capacidad del sistema que repercute en la eficiencia de este. Dicha capacidad se puede exceder puntualmente, pero a largo plazo provocaría inestabilidad.

Siempre va a haber un cuello de botella dentro del sistema, eliminarlo significa moverlo hacia otra estación. Por ello, como se pretende llegar a un estado óptimo del sistema, se deben localizar y conocer los diferentes cuellos de botella que se encuentren en el sistema.

#### 4.2.4 Factores adicionales

Hay varios factores que influyen en la elección de los procesos:

- Variabilidad de las operaciones: La variabilidad en las operaciones es algo inherente, sin ella, alcanzar unos objetivos definidos en el diseño y gestión de los sistemas sería tarea fácil, pues todo se mantendría siempre igual y ofrecería resultados sostenibles.

Pero no es así, la variabilidad se presenta en casi todas las operaciones y se llega a multiplicar cuando interviene el factor humano, que influye tanto en los valores de demanda como en el proceso productivo. Se puede observar empíricamente que el tiempo de servicio de un operario puede variar según de factores como la experiencia, el tipo de turno en el que trabaje (mañana, tarde o noche) y otros factores que definen la curva de aprendizaje<sup>4</sup>, como son el número de veces que se repite la tarea y la duración y complejidad de esta.

Esto indica que si queremos realizar un análisis conciso de algún sistema tenemos que tener en cuenta la variabilidad. Como lo refleja Adam *et al.* (1986) en su estudio sobre la productividad, la variabilidad de los procesos siempre afecta al comportamiento futuro del sistema.

- Número de productos distintos: Al tener varios productos diferentes entrando en cada una de las estaciones, cada uno lleva asociado un tiempo de servicio característico definido por su tiempo de proceso y la variabilidad asociada. Como consecuencia, se genera una variabilidad conjunta proporcional a esos valores que ralentiza nuestro sistema, haciéndolo más complejo que los sistemas que procesan un único tipo de producto.

---

<sup>4</sup> Dada por la expresión  $t_s(n) = k * n^{-b}$ , donde k es constante empírica y b refleja la complejidad y duración de la tarea

### 4.3 Escenario de simulación

Para realizar este estudio no se va a disponer de un único escenario de simulación, sino que tendremos una combinación de diversas configuraciones en función de los siguientes valores:

- Número de estaciones: El número de estaciones vendrá determinado por el número de máquinas dentro del sistema. Cada máquina tendrá un buffer propio para la entrada de trabajos. Se estudiarán 5 niveles distintos de 4, 8, 12, 16 y 20 máquinas.
- Transporte entre estaciones: Se define un transporte instantáneo entre estaciones.
- Número de trabajos: El número de trabajos hace alusión a distintos tipos de productos a fabricar, creándose 3 niveles distintos de 3, 5 y 10 trabajos diferentes. El tipo de trabajo estará asignado por una letra, siendo estas A, B, C, D, E, F, G, H, I y J. El tipo de trabajo que entrará al sistema vendrá dado de forma aleatoria.
- Tiempos de proceso: Para cada máquina se asignará un tiempo de proceso aleatorio para cada trabajo distinto, dados por una distribución Lognormal (Media, Coef.Variación). La Media de la distribución vendrá indicada por una distribución uniforme, comprendida en 2 niveles distintos, una UNIF [1,2] y otra UNIF [1,6]. Los tiempos de procesos se exponen en las tablas 1 y 2. No se contemplará el reprocesado ni otras paradas por planificación o avería.
- Política empleada: Se analizarán las distintas políticas para cada escenario empleado, sin prescindir de ninguna, aunque la mayoría de los escenarios (o su totalidad) sean desfavorables.
- Variabilidad: Como en todo sistema, debe existir una variabilidad a la que el sistema debe hacer frente y la cual no se puede controlar, ya sea causada por el operario, la máquina o cualquier otro tipo de imprevisto. Esta variación vendrá recogida dentro del tiempo de proceso en su Coef.Variación mediante 3 niveles distintos, baja variación (Coef. = 0.25), media variación (Coef. = 0.75) y alta variación (Coef. = 1.5).
- Regla de entrada: La llegada para cada estación se va a regir por la regla FCFS (*First-come, first-served*), ejecutándose los pedidos en el orden que lleguen a la estación y pasando el resto a formar parte del buffer. Usamos esta regla debido a que es la que mejor resultados ofreció en el estudio comparativo de las distintas reglas de entradas llevado a cabo por Framiñán *et al* (2000), donde la comparativa se llevó a cabo para un sistema CONWIP y las distintas políticas que se pueden aplicar.
- Tasa de llegada: La tasa de llegada de las órdenes de trabajo simulará a la demanda, que será de un orden de trabajo por cada cuatro unidades de tiempo para el escenario UNIF [1,2]. Para el escenario UNIF [1,6] vendrá promediada en función de los tiempos de proceso para evitar saturaciones (se tomará un tiempo entre llegadas de siete unidades de tiempo). Dicha simulación de la demanda contará con que habrá la misma probabilidad de ser elegido un tipo de trabajo u otro por los clientes. Con estas dos tasas se pretende tener un escenario donde la producción no dependa de la congestión de las estaciones de trabajo (máquinas) y otro en el que el correcto funcionamiento del sistema si dependa de las estaciones.
- Periodo de simulación: El periodo de simulación comprenderá de un mínimo de 20 000 unidades de tiempo, con un *warm-up* (puesta a punto) de 2 000 unidades de tiempo. Este periodo se incrementará en función de obtener unos resultados más fiables.
- Set-Up: Los tiempos de set-up no son considerados.

A parte de estos parámetros, se tendrá en cuenta un entorno *make-to-stock* y la espera de la demanda no servida por parte de los clientes. Con todo ello, se pretende dar lugar distintos escenarios (360 en total) que puedan simular correctamente distintos tipos de sistemas en función del número de estaciones de procesado, tipos de trabajos y variabilidad aplicada.

Los parámetros que posteriormente serán objetivo de estudio en los resultados serán principalmente el *Fill rate* (con un 95% de intervalo de confianza), los tiempos de espera (*Average Waiting time*), los buffers intermedios (*Intermediate buffers*), las entregas efectuadas correctamente (*Finished goods inventory*), el *WIP*, y las unidades procesadas (*Processed units*).

Average process times*																				
Job type	Station 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10	St. 11	St. 12	St. 13	St. 14	St. 15	St. 16	St. 17	St. 18	St. 19	St. 20
A	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	2
B	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1
C	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1
D	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2
E	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1
F	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2
G	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2
H	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2
I	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2
J	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	1	1

\*St.: Station

**Tabla 3.** Tiempos de proceso para UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Average process times*																				
Job type	Station 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10	St. 11	St. 12	St. 13	St. 14	St. 15	St. 16	St. 17	St. 18	St. 19	St. 20
A	5	3	1	1	3	2	2	3	4	5	6	5	5	6	1	5	6	5	1	2
B	4	6	6	6	6	1	1	6	4	4	5	4	6	6	4	4	6	2	4	4
C	5	4	1	6	5	6	4	3	1	5	6	2	5	3	1	2	5	6	6	6
D	3	4	4	3	6	4	6	4	1	5	3	4	2	5	5	4	5	5	4	6
E	6	1	4	5	5	1	6	6	4	6	6	3	1	4	4	3	4	6	4	2
F	5	4	4	2	4	1	3	2	3	5	2	4	3	5	5	6	6	3	5	3
G	3	3	2	1	3	3	3	4	4	2	1	2	6	6	4	5	3	4	4	5
H	4	2	5	1	5	6	5	2	4	5	4	5	3	2	2	4	5	3	6	5
I	3	5	1	4	3	5	6	5	3	6	3	3	2	2	1	2	6	2	6	4
J	6	1	3	5	2	6	2	5	1	1	4	5	3	3	2	2	4	4	5	1

\*St.: Station

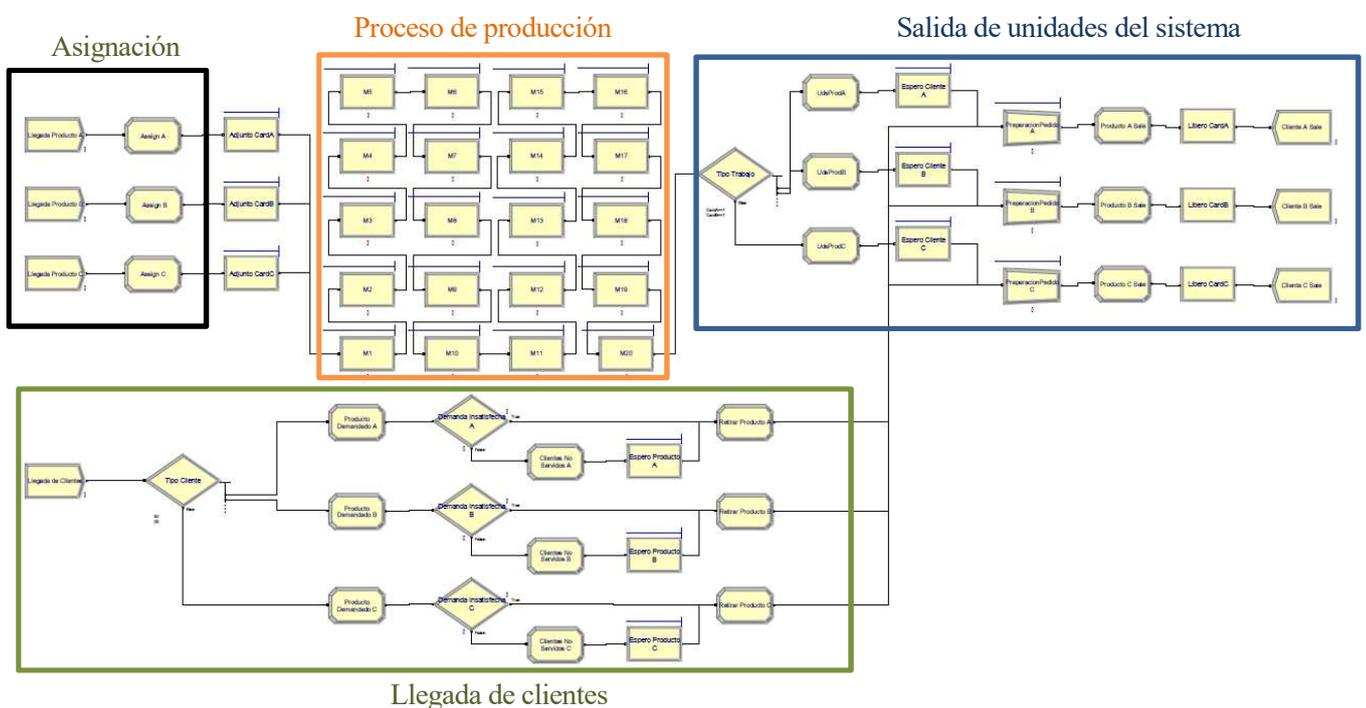
**Tabla 4.** Tiempos de proceso para UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

## 4.4 Modelos de simulación implementados

Una vez que se han definido las variables y parámetros que intervienen en el entorno que se quiere abordar en este trabajo. Este entorno es variable en función de tres valores, número de estaciones, variabilidad y número de trabajos.

Por ello, para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis de este, con el fin de determinar las interacciones que hay presentes. Por ello, se procederá a mostrar cómo se han desarrollado los modelos que son objeto de estudio en este trabajo. Dichos modelos son abstracciones de las partes esenciales del sistema, se exponen en este apartado por el hecho de que había una serie de conceptos que estaban por definir y de esta forma se facilita la comprensión de los mismos.

Se mostrará un primer escenario general donde se destacarán los diferentes módulos que componen las partes comunes a todos los escenarios, estos son, la llegada de clientes, la salida de unidades del sistema y el proceso de producción.



**Figura 18.** Escenario general, con 20 estaciones y 3 tipos de trabajos [Fuente: Elaboración propia]

A continuación, se describirán de forma más detallada los módulos señalados para facilitar la comprensión de los modelos.

### 4.4.1 Módulo Llegada de clientes

Este módulo se compone de la llegada de clientes, con su posterior elección del tipo de trabajo demandado y una sección donde se recogería la demanda insatisfecha a la espera de recoger su producto. Los bloques señalados en azul ('Producto Demandado X' y 'Retirar Producto X') se utilizan para realizar un recuento de las unidades de cada tipo de producto que son demandas y recogen la información para el sistema. El bloque siguiente en verde ('Demanda Insatisfecha') pregunta al sistema por las existencias del producto, en caso de no haber en punto de stock final, la orden del cliente pasará por los módulos en rojo ('Clientes No Servidos X' y 'Espera Producto X') que se encargan del recuento de demanda insatisfecha y su posterior espera para recoger el producto cuando esté disponible.

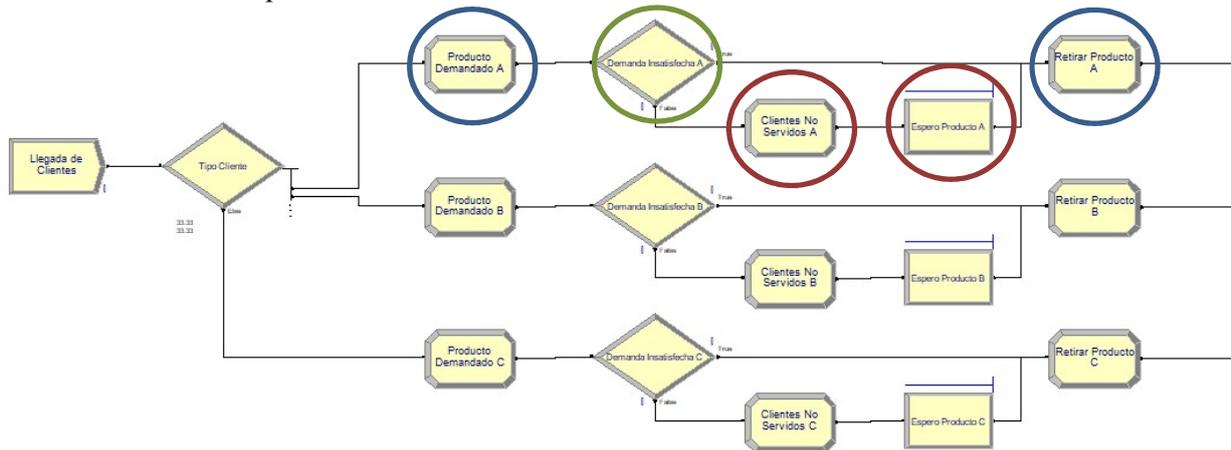


Figura 19. Módulo Llegada de clientes para un entorno con 3 tipos de trabajos [Fuente: Elaboración propia]

Las variantes que veremos de este módulo serán en función del número de tipos de trabajos presentes en cada escenario, aumentando o disminuyendo el número de bloques en el proceso de elección del tipo de producto.

### 4.4.2 Módulo Salida del sistema

En este módulo se realiza la asignación de los productos a los clientes y la posterior liberación de las tarjetas. Los bloques marcados en azul realizan un recuento del inventario ('UdsProdA' y 'Producto A Sale'). Los siguientes bloques marcados en verde ('Espero Cliente A' y 'PreparaciónPedido A') son el punto de stock final y la asignación del producto al cliente correspondientemente. Por último, el bloque marcado en rojo se encarga de recoger las salidas del sistema.

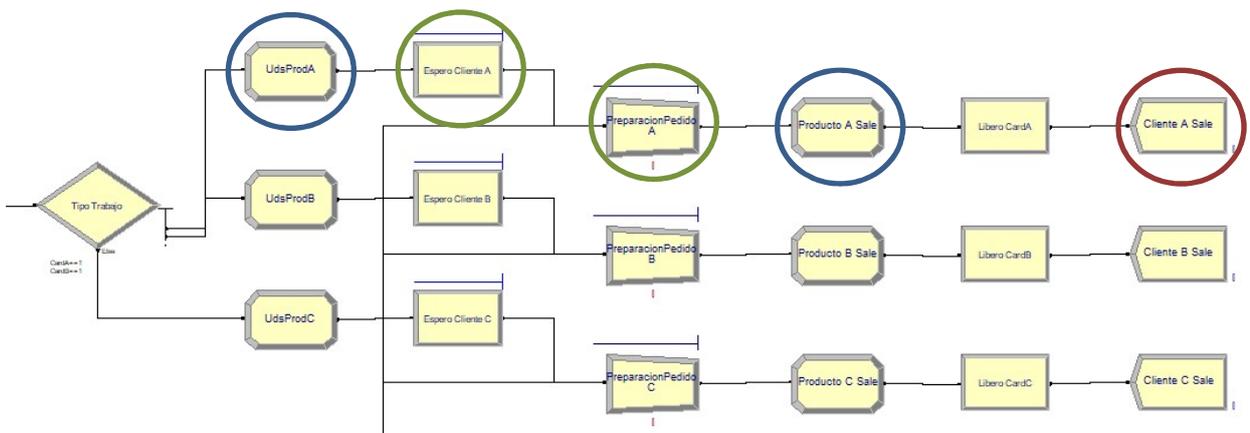


Figura 20. Módulo Salida del sistema para un entorno con 3 tipos de trabajos [Fuente: Elaboración propia]

Las variaciones que existirán en este módulo serán en función del número de tipos de trabajos presentes en cada escenario.

#### 4.4.3 Módulo Proceso de producción

Este módulo recoge el conjunto de las estaciones del sistema que compone el proceso productivo. Cada estación se identificada con el bloque marcado en verde y con el nombre ‘M#’, dicho nombre alude al número de la estación o máquina asignado. En cada estación se encuentra un operario (recurso) que trabajará sobre el producto a fabricar en función del tiempo de proceso correspondiente. La asignación de un único operario por cada estación es para tener la misma velocidad de procesado en todas las estaciones, si fuera necesario cambiar a doble o triple velocidad, para generar otro entorno de fabricación, simplemente se realizaría cambiando el número de recursos en función de la velocidad deseada. El bloque marcado azul (‘Tipo Trabajo’) se encarga de identificar el tipo de producto que sale del proceso de producción.

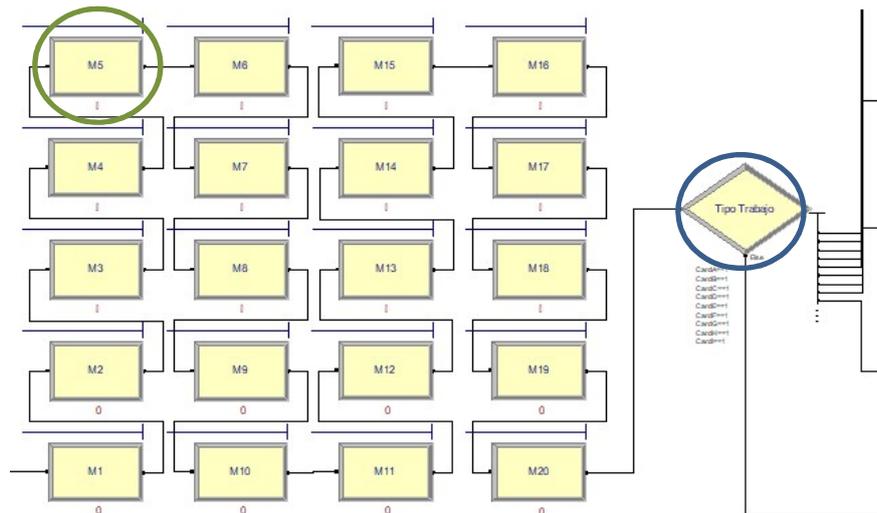


Figura 21. Módulo Proceso de producción para un entorno con 20 estaciones [Fuente: Elaboración propia]

Este módulo variará en función del número de estaciones de procesado existentes en el escenario.

#### 4.4.4 Módulo Asignación

El módulo Asignación se encarga de otorgar los tiempos de proceso, la variabilidad y la identificación del tipo de trabajo a cada orden de trabajo entrante, todo ello mediante el bloque ‘Assign X’ marcado en azul.

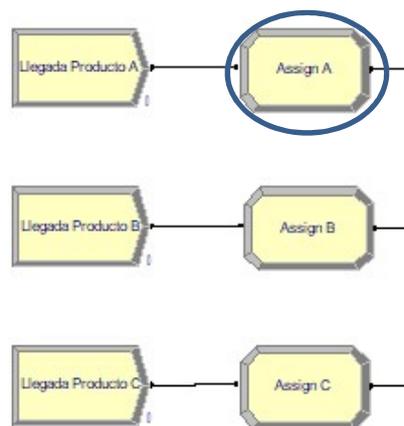


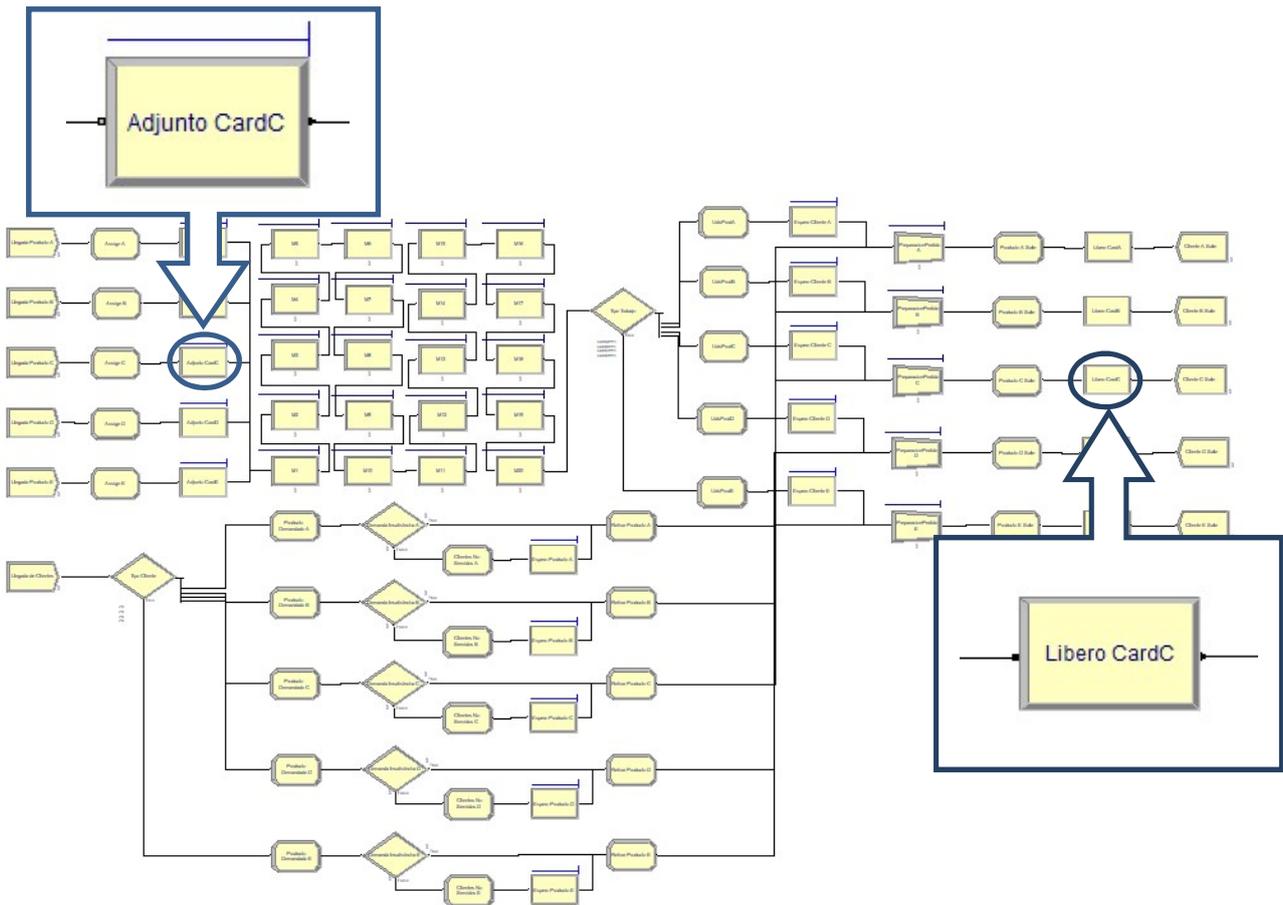
Figura 22. Módulo Asignación para un entorno con 3 tipos de trabajos [Fuente: Elaboración propia]

Por último, se expondrán a modo explicativo las partes características de cada tipo de política implementada dentro de los escenarios realizados con Arena Simulation.

### 4.4.5 Modelo de simulación para política M-CLOSED

Recordando lo expuesto anteriormente, este tipo de política empleaba un tipo de tarjeta distinto para cada tipo de trabajo. Por ello, en el modelo correspondiente con esta política (Figura X), se aprecia que está compuesto por los módulos comunes explicados en los apartados anteriores además de tener configurados unos bloques propios.

Estos son los señalados en azul. El primero, ‘Adjunto CardX’, se encarga de asociar a cada orden de trabajo su respectiva tarjeta en función del tipo de trabajo. Este bloque tiene su propio buffer, estando preparadas otras órdenes de trabajo para cuando haya tarjetas disponibles, adjuntarlas. El siguiente bloque, ‘Libero CardX’, es el encargado de liberar la tarjeta una vez que el cliente se ha hecho con el producto.

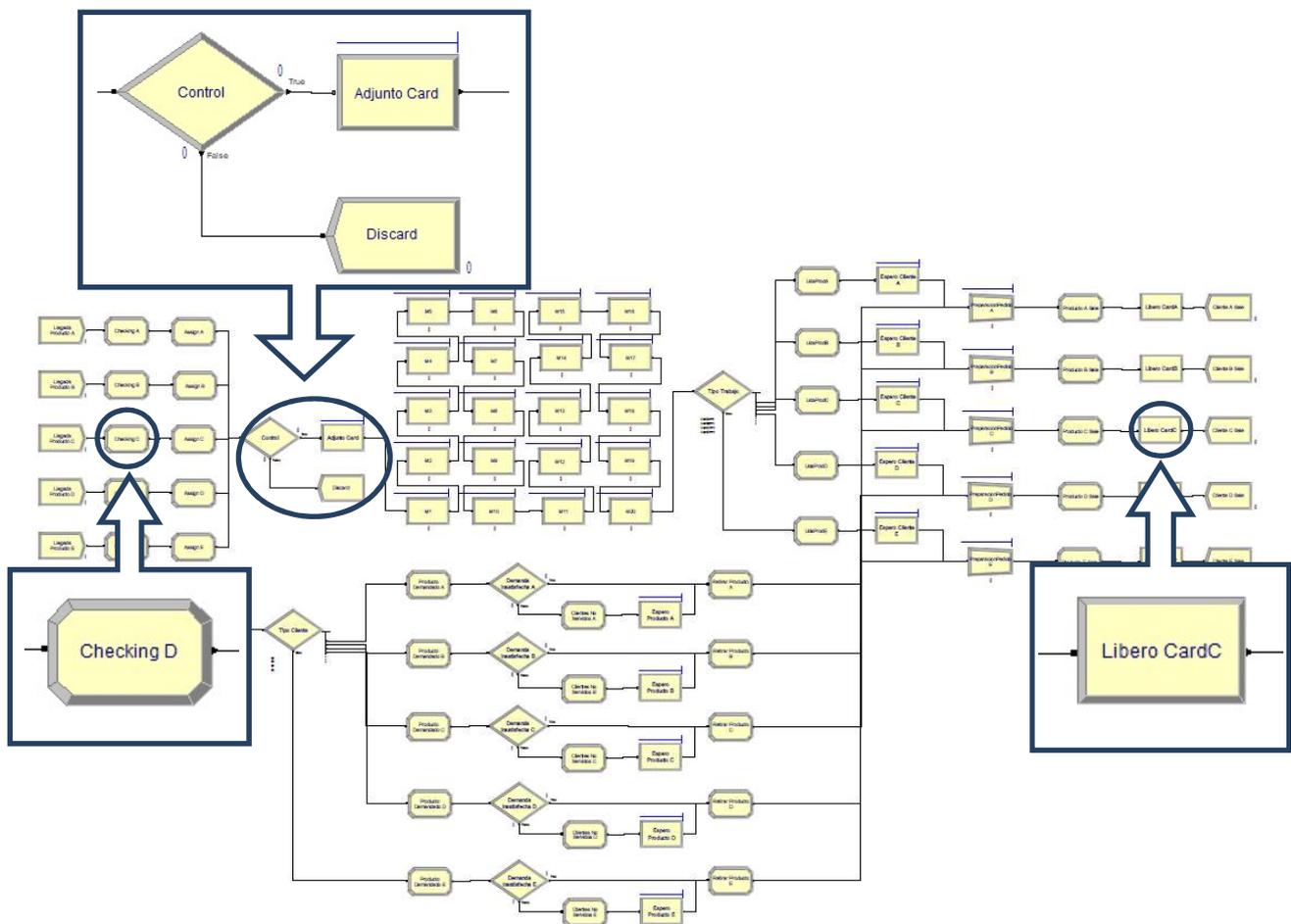


**Figura 23.** Modelo de simulación para política M-CLOSED, escenario de 20 estaciones y 5 tipos de trabajo  
[Fuente: Elaboración propia]

#### 4.4.6 Modelo de simulación para política S-CLOSED

La política S-CLOSED era aquella que empleaba un único tipo de tarjeta para todos los trabajos, ya fueran del tipo A, B o X. Por ello, en su modelo (Figura X), se aprecia que está compuesto por unos bloques únicos para esta política que se adicionan a los módulos comunes.

Estos bloques, señalados en tres partes distintas en azul, permiten llevar un recuento de las tarjetas totales y adjuntarlas en función de sus necesidades. Empezando por la izquierda, ‘Checking X’ realiza un conteo de las órdenes de trabajo que entran al sistema que, junto con los siguientes bloques ‘Control’ y ‘Discard’, gestionan las órdenes de trabajos para que siempre haya una a la espera de la liberación de una tarjeta. El siguiente bloque, ‘Adjunto Card’ es el encargado de asignar las tarjetas a los trabajos. Por último, los bloques ‘Libero CardX’ realizan la liberación de las tarjetas una vez que el cliente se ha llevado el producto<sup>5</sup>.



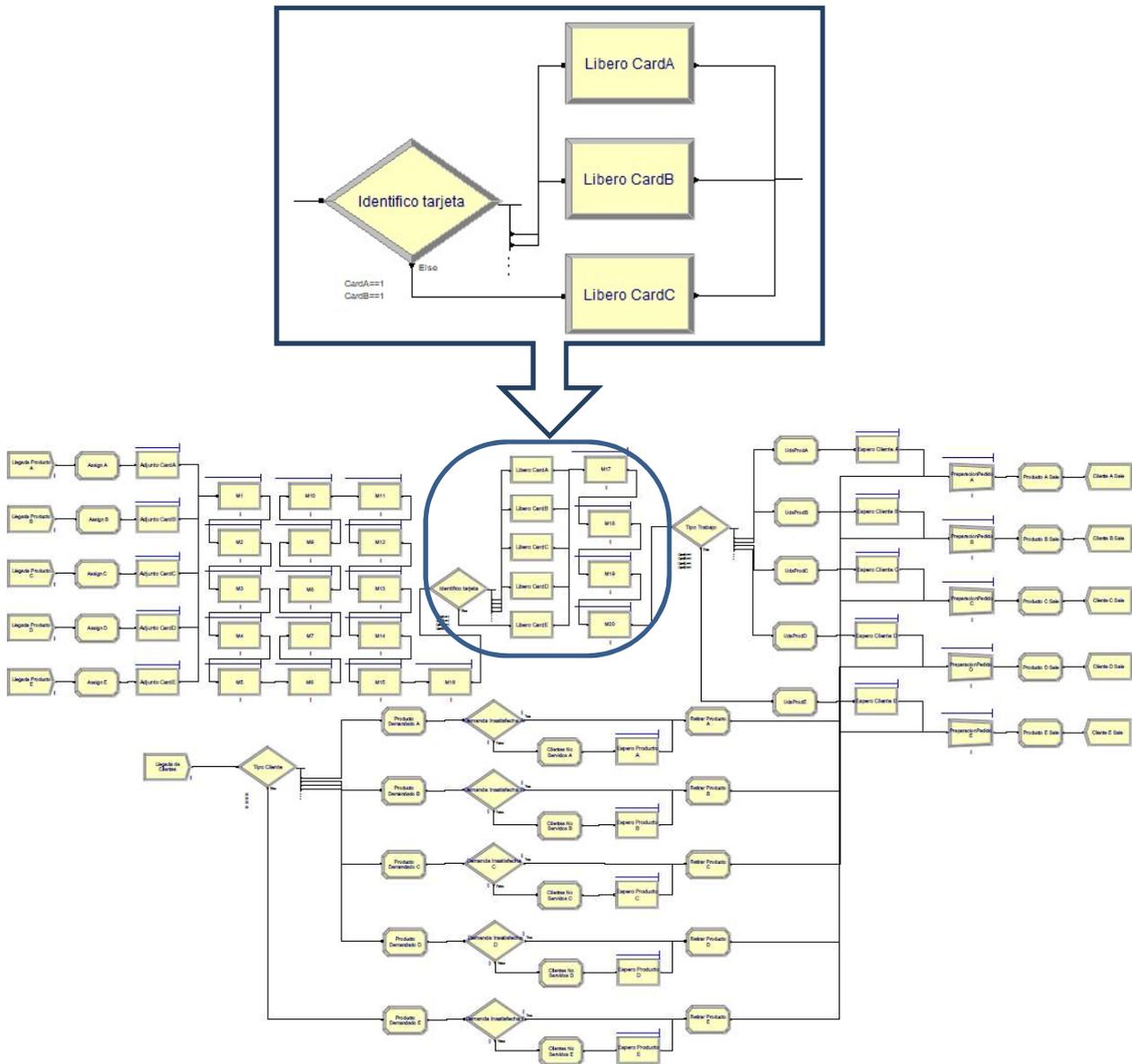
**Figura 24.** Modelo de simulación para política S-CLOSED, escenario de 20 estaciones y 5 tipos de trabajo  
[Fuente: Elaboración propia]

<sup>5</sup> A diferencia que con la política M-CLOSED, la asignación de una letra a los bloques, por ejemplo 'Libero CardA', es simplemente para contabilizar el trabajo que se ha demandado, las tarjetas son idénticas para todos los tipos de trabajos

### 4.4.7 Modelo de simulación para política M-CLOSED/TOC

En este modelo se presenta la política M-CLOSED/TOC, la cual, asigna a cada tipo de trabajo un tipo de tarjeta diferente. Posteriormente, las tarjetas serán liberadas al pasar por la estación en la que se sitúe el cuello de botella.

Dicho modelo está basado en el M-CLOSED expuesto anteriormente, teniendo una modificación (marcada en azul). Dicha modificación, compuesta por los bloques ‘Identifico tarjeta’ y ‘Liberó CardX,’ se encarga de la liberación de las tarjetas en mitad del proceso de producción. En función de los escenarios estos bloques se irán moviendo entre las estaciones, localizándose detrás de la estación que presente el cuello de botella. Esto da lugar a varios esquemas diferentes dentro de una misma política. A modo de ejemplo, se presenta el esquema que tiene el cuello de botella en la estación 16 (Figura 30).

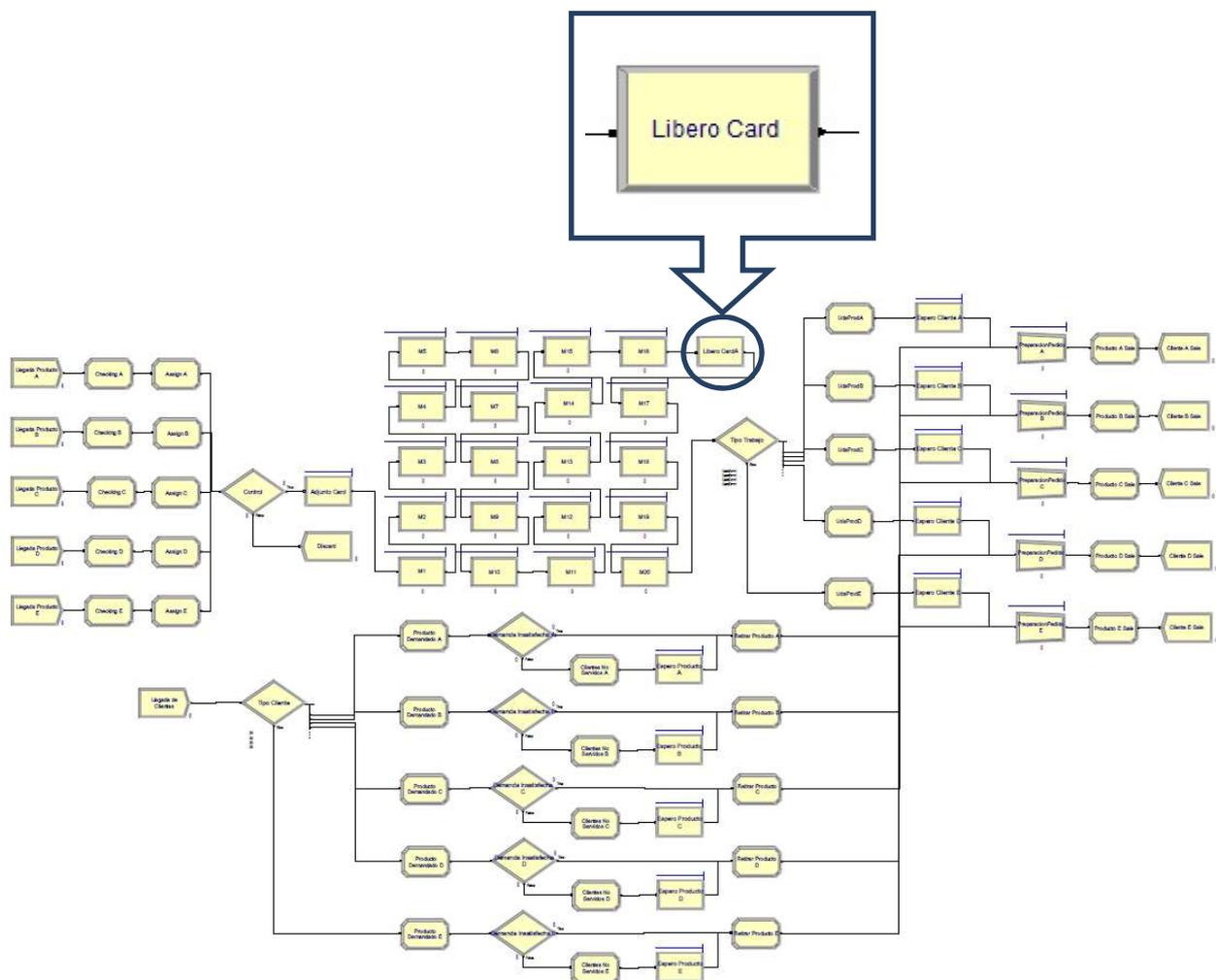


**Figura 25.** Modelo de simulación para política M-CLOSED/TOC, escenario de 20 estaciones y 5 tipos de trabajo [Fuente: Elaboración propia]

#### 4.4.8 Modelo de simulación para política S-CLOSED/TOC

En este modelo se presenta la política S-CLOSED/TOC, la cual, asigna un único tipo de tarjeta para cualquier orden de trabajo que entre, sin distinguir si es A, B, C, etc. Posteriormente, las tarjetas serán liberadas al pasar por la estación en la que se sitúe el cuello de botella.

Dicho modelo está basado en el S-CLOSED presentado en los puntos anteriores. Presentando una pequeña modificación (marcada en azul). Dicha modificación, compuesta por un único bloque 'Libero Card', se encarga de la liberación de las tarjetas en mitad del proceso de producción, como aplicaba esta política. Así, la ubicación de este bloque variará en función de la estación que presente el cuello de botella, dando lugar a varios esquemas diferentes dentro de una misma política. A modo de ejemplo, se presenta el esquema que tiene el cuello de botella en la estación 16 (Figura 31).



**Figura 26.** Modelo de simulación para política S-CLOSED/TOC, escenario de 20 estaciones y 5 tipos de trabajo  
[Fuente: Elaboración propia]

## 4.5 Validación de los escenarios

Los escenarios que se van a presentar previamente han tenido una comprobación y corrección, verificando que los códigos empleados y la estructura mostrada son correctos. Esta comprobación se ha realizado tomando de base la implementación de otros estudios nombrados anteriormente (Bonvik *et al.* 1998, Duenyas 1994 o Framiñán *et al.* 2000) y su posterior comparación de los resultados.

Las diferencias en los resultados únicamente residen en que dichos estudios no tenían en cuenta la variabilidad. Esta variabilidad queda reflejada en la variación del número de unidades de salida del sistema (del orden de 5 000 unidades como en el trabajo de Framiñán *et al.* (2000) que utilizaba una tasa de llegada para los clientes similar) y en que se tomaba el promedio de tiempo de espera por los clientes, mientras que en este estudio se tomará el tiempo de espera más elevado para realizar una visión más crítica y evitar caer en generalizaciones.

## 4.6 Conclusiones

Mediante el modelado y la creación del abanico de escenarios presentado, se busca dar un marco de directrices unificado para modelar los sistemas de control de la producción, en pos de comparar los sistemas bajo la combinación de los parámetros que reporten mejor rendimiento de acuerdo con la medida deseada. De esta manera, es posible analizar las diferentes alternativas de diseño, predecir las prestaciones que pueden alcanzar las diferentes variantes, analizar aquellos fenómenos que más afectan a estas e identificar que variables se ven más afectadas.

En el siguiente capítulo, se presentarán los resultados obtenidos, facilitando así la visualización de los datos y su posterior análisis. Todo ello, para poder concluir con cuál es la mejor opción para un sistema CONWIP multiproducto.

# 5 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

---

En este punto, se abordarán los resultados obtenidos a raíz de las simulaciones llevadas a cabo en los distintos escenarios. Dichas simulaciones se han realizado en un total de 360 escenarios, aplicándose a cada escenario unas 50 réplicas para permitir unos intervalos de confianza válidos. Todo ello hace un total de 18 000 simulaciones diferentes.

En primer lugar, se presentarán las medidas de rendimientos, como parámetros a tener en cuenta a la hora de extraer los resultados. Posteriormente se mostrarán los resultados, que estarán recogidos en las diferentes tablas expuestas en el capítulo y habiendo una para cada tipo de política dentro de los diferentes escenarios (el UNIF [1,2] y el UNIF [1,6]). Con todo ello, se pretende ofrecer unos resultados de confianza que permitan analizar en profundidad las variantes de los sistemas CONWIP multiproducto.

## 5.1 Medidas de rendimiento

En referencia a los datos a mostrar, se han seleccionado una serie de parámetros representativos que indicarán si la política empleada es la correcta mediante tablas comparativas, además de marcar posibles rutas de mejora en busca de mejorar dichos parámetros. Estos son:

- *Fill rate*: Al tratarse de un entorno *Make-to-stock* debemos tener claro que uno de los parámetros básicos de comparación, como son las fechas de entrega (o *due date*), no podemos tenerlo en cuenta debido a que no existe dicha fecha de entrega, los trabajos terminados se corresponden con una demanda previa. Para marcar un parámetro que nos indique si los trabajos procesados se han entregado correctamente emplearemos el *Fill rate*, es decir, la fracción de trabajos que se han entregado correctamente sin causar demoras. Dicho parámetro ya fue marcado por otros autores (*Hopp and Spearman 1995*) como una medida que muestra correctamente el rendimiento de los sistemas.
- *Average Waiting time*: Los tiempos de espera de los clientes que tienen que esperar su producto (demanda insatisfecha), medida que nos marcara la eficiencia a la hora ofrecer un servicio y el tiempo que un trabajo permanece en el sistema. Si este valor es demasiado elevado, será un indicador de que las estaciones están colapsada y los trabajos permanecen más tiempo del estimado en los buffers. Para este valor se tomará la media más alta entre todos los tipos de trabajo existente.
- *Intermediate buffers*: Este parámetro marcará el número medio de trabajos presente en los buffers durante la producción.
- *Finished goods inventory*: Los productos terminados son activos a corto plazo, bienes que han sido completados en el proceso de fabricación a la espera de ser vendidos a los clientes. Por tanto, este valor nos indica la cantidad de activo parado que tenemos a la espera de ser recogido por los clientes, entendiéndose este activo como un coste de inventario.
- *WIP*: Trabajo en proceso (*work-in-process*). Muestra el número de trabajos que están presentes en nuestro sistema durante el proceso de producción. De nuevo, este valor nos supone un coste en inventario, debido a que son unidades que están a la espera de ser terminadas.
- *Processed units*: Unidades procesadas, es decir, los trabajos que se han producido correctamente.

En resumen, mediante la maximización (para unidades procesadas y *fill rate*) o minimización (para tiempos de espera e inventario) se busca dar respuesta a una de las cuestiones que nos marcábamos al principio del proyecto, encontrar la configuración adecuada a la hora de asignar las tarjetas a cada tipo de trabajo.

## 5.2 Exposición de resultados

A continuación, se mostrarán las tablas que recogen los resultados obtenidos. Dentro de las implementaciones, se tendrá en cuenta la adaptación del cuello de botella para cada escenario dentro de la política TOC. Este caso, implicará que el cuello de botella será aquella estación que presente unos tiempos de proceso mayor para todos los trabajos (en promedio). Con esto se pretenderá adaptar los distintos escenarios a la política empleada.

Para localizar el cuello de botella, en la siguiente tabla se muestran las diferentes estaciones junto con el sumatorio de los tiempos de proceso para el total de los trabajos a procesar en cada uno de los distintos escenarios a implementar en función de las estaciones y número de trabajos. Se ha dividido con línea de puntos los escenarios según el número de estaciones, dentro de cada columna, el sombreado marca el cuello de botella. Si dentro de la misma columna hay un cambio de intensidad en el color del sombreado, indicará que esa estación pasa a ser el nuevo cuello de botella.

Work Station	Average summation of process time					
	UNIF [1,2]			UNIF [1,6]		
	3 Jobs	5 Jobs	10 Jobs	3 Jobs	5 Jobs	10 Jobs
1	5	8	15	14	23	44
2	5	8	17	13	18	33
3	4	6	12	8	16	31
4	4	7	14	13	21	34
5	3	5	12	14	25	42
6	5	8	15	9	14	35
7	5	8	17	7	19	38
8	4	6	12	12	22	40
9	4	6	15	9	14	29
10	5	8	13	14	25	44
11	3	5	12	17	26	40
12	4	6	14	11	18	37
13	4	7	15	16	19	36
14	3	6	11	15	24	42
15	5	7	15	6	15	29
16	5	9	19	11	18	37
17	3	5	12	17	26	50
18	5	8	16	13	24	40
19	5	9	17	11	19	45
20	4	7	16	12	20	38

**Tabla 5.** Sumatorio de tiempos de proceso para cada estación [Fuente: Elaboración propia]

Por ejemplo, en el caso de 12 estaciones y 5 tipos de trabajos para UNIF [1,2], el cuello de botella estaría en una de las estaciones con sumatorio de tiempos de proceso igual a 8 (estaciones 1, 2, 6, 7 y 10), pero en el caso de 20 estaciones y 10 tipos de trabajos para UNIF [1,2] sería la estación 16 con un sumatorio de 19. En caso de haber dos o más estaciones con el mismo sumatorio de tiempos de proceso, se tomará el cuello de botella en la estación que presente un mayor porcentaje de ocupación en sus políticas originales (M-CLOSED y S-CLOSED).

Adicionalmente, si en alguno de los escenarios se obtuviera un *Fill rate* menor al 0.94 y se pudiera aumentar teniendo un mayor número de tarjetas, se procedería a un reajuste de las tarjetas para llegar al nivel deseado. Esto es debido a que un aumento del número de tarjetas conllevaría a aumentar el WIP y el inventario final, provocando dicha mejora del *Fill rate*, pero también implicaría un aumento del coste de inventario. Este reajuste se realiza para obtener el mejor resultado para todas las medidas de rendimientos.

## 5.2.1 Política M-CLOSED escenario UNIF [1,2]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	4	3	(3, 3, 3)	0.977±0.002	2.061	0.266	7.234	9	4993
	0.75	4	3	(3, 3, 3)	0.970±0.006	2.376	0.427	7.074	9	4984
	1.50	4	3	(4, 3, 3)	0.954±0.005	4.262	0.868	7.644	10	4955
	0.25	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.992±0.005	1.388	0.255	13.297	15	4994
	0.75	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.989±0.004	2.327	0.428	13.124	15	4988
	1.50	4	5	(3, 3, 3, 2, 2)	0.950±0.006	5.087	0.847	10.711	13	4959
	0.25	4	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1)	0.972±0.005	3.601	0.249	17.299	19	5003
	0.75	4	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1)	0.967±0.007	3.774	0.401	17.162	19	4961
	1.50	4	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1)	0.951±0.004	5.763	0.848	16.702	19	5000
	0.25	8	3	(4, 4, 4)	0.973±0.006	2.972	0.390	8.714	12	4964
	0.75	8	3	(4, 4, 4)	0.963±0.001	3.911	0.748	8.340	12	4985
	1.50	8	3	(5, 5, 4)	0.945±0.004	6.495	1.785	9.316	14	4966
	0.25	8	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.970±0.006	3.203	0.364	11.850	15	4975
	0.75	8	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.956±0.005	4.089	0.703	11.514	15	4965
	1.50	8	5	(4, 4, 4, 3, 3)	0.953±0.004	6.453	1.702	13.518	18	4966
	0.25	8	10	(3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.961±0.007	4.707	0.366	17.849	21	4973
	0.75	8	10	(3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.953±0.005	5.384	0.714	17.474	21	5014
	1.50	8	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 2, 2)	0.953±0.006	7.958	1.702	21.509	26	4975

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 6.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	12	3	(5, 5, 5)	0.978±0.005	3.533	0.481	10.263	15	5005
	0.75	12	3	(5, 5, 5)	0.967±0.015	4.781	1.035	9.728	15	4980
	1.50	12	3	(6, 6, 6)	0.945±0.006	8.531	2.788	10.925	18	5024
	0.25	12	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.982±0.006	4.087	0.461	15.483	20	5004
	0.75	12	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.975±0.007	5.408	0.989	14.968	20	4985
	1.50	12	5	(5, 5, 4, 4, 4)	0.954±0.005	7.365	2.544	15.416	22	4990
	0.25	12	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.986±0.005	3.893	0.461	25.504	30	4979
	0.75	12	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.980±0.006	5.166	0.994	24.984	30	4966
	1.50	12	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.955±0.015	10.370	2.691	23.236	30	5019
	0.25	16	3	(6, 6, 6)	0.978±0.015	3.485	0.582	11.755	18	4993
	0.75	16	3	(6, 6, 6)	0.964±0.006	5.598	1.361	10.955	18	5009
	1.50	16	3	(8, 8, 7)	0.954±0.016	8.842	3.966	13.304	23	5048
	0.25	16	5	(5, 5, 5, 5, 5)	0.989±0.004	4.293	0.591	18.929	25	4979
	0.75	16	5	(5, 5, 5, 5, 5)	0.979±0.006	5.561	1.349	18.160	25	4989
	1.50	16	5	(5, 5, 5, 5, 5)	0.943±0.015	8.990	3.507	16.091	25	4920
	0.25	16	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.969±0.006	5.626	0.608	23.840	30	5047
	0.75	16	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.961±0.007	7.800	1.333	23.190	30	4982
	1.50	16	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3)	0.957±0.015	10.149	3.787	27.696	37	5005

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 7.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	20	3	(7, 7, 7)	0.977±0.009	4.490	0.661	13.252	21	4998
	0.75	20	3	(7, 7, 7)	0.963±0.002	6.539	1.616	12.317	21	4987
	1.50	20	3	(9, 9, 8)	0.950±0.005	9.919	4.632	14.368	26	4938
	0.25	20	5	(6, 6, 6, 6, 6)	0.992±0.007	1.986	0.678	22.384	30	4991
	0.75	20	5	(6, 6, 6, 6, 6)	0.985±0.006	5.489	1.642	21.425	30	4982
	1.50	20	5	(7, 7, 6, 6, 6)	0.950±0.005	12.801	4.837	20.197	32	5007
	0.25	20	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.988±0.004	3.871	0.668	32.419	40	4975
	0.75	20	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.984±0.009	6.864	1.666	31.339	40	5026
	1.50	20	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.951±0.011	13.418	4.881	28.116	40	5033

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 8.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

## 5.2.2 Política S-CLOSED escenario UNIF [1,2]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED	0.25	4	3	14	0.974±0.003	3.230	0.228	12.101	14	4991
	0.75	4	3	14	0.956±0.011	5.269	0.415	11.989	14	5043
	1.50	4	3	17	0.978±0.003	7.023	0.903	14.585	17	4984
	0.25	4	5	24	0.960±0.015	6.648	0.244	22.296	24	5020
	0.75	4	5	28	0.959±0.014	7.622	0.418	22.136	24	5003
	1.50	4	5	28	0.954±0.016	11.349	0.889	21.655	24	5018
	0.25	4	10	50	0.962±0.011	10.361	0.246	48.076	50	5049
	0.75	4	10	50	0.967±0.006	13.816	0.412	47.632	50	5079
				80	0.998±0.003	1.712	0.386	77.034	80	4975
	1.50	4	10	50	0.953±0.011	18.387	0.901	47.641	50	5063
	0.25	8	3	17	0.971±0.006	5.944	0.417	13.629	17	5049
	0.75	8	3	17	0.962±0.007	6.449	0.758	13.312	17	5019
	1.50	8	3	20	0.971±0.011	6.985	1.783	15.236	20	4959
	0.25	8	5	28	0.973±0.010	9.538	0.387	24.798	28	5022
	0.75	8	5	28	0.969±0.005	10.210	0.639	24.427	28	5043
	1.50	8	5	28	0.954±0.015	12.550	1.800	23.397	28	4997
	0.25	8	10	50	0.960±0.006	12.842	0.369	46.673	50	5064
	0.75	8	10	50	0.962±0.007	13.849	0.708	45.813	50	5049
	1.50	8	10	50	0.949±0.006	16.593	1.743	45.485	50	5015

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 9.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED	0.25	12	3	20	0.979±0.005	5.690	0.605	15.170	20	5004
	0.75	12	3	20	0.967±0.011	5.763	1.456	14.726	20	4972
	1.50	12	3	23	0.969±0.006	8.579	2.541	15.760	23	4977
	0.25	12	5	28	0.959±0.005	5.763	0.433	23.458	28	5008
	0.75	12	5	28	0.960±0.012	10.903	0.999	22.926	28	5022
	1.50	12	5	33	0.972±0.004	13.471	2.616	26.376	33	4957
	0.25	12	10	50	0.956±0.004	5.998	0.948	45.042	50	5038
	0.75	12	10	60	0.979±0.005	7.323	1.668	54.459	60	5052
	1.50	12	10	60	0.973±0.006	16.085	2.668	53.296	60	5022
	0.25	16	3	23	0.984±0.007	5.100	0.404	16.292	23	4962
	0.75	16	3	23	0.981±0.011	6.152	1.129	15.754	23	4953
	1.50	16	3	26	0.960±0.008	8.327	3.275	15.605	26	4967
	0.25	16	5	28	0.945±0.010	11.827	1.341	21.849	28	5037
	0.75	16	5	33	0.969±0.006	11.098	1.349	26.142	33	5003
	1.50	16	5	33	0.945±0.007	15.467	4.027	23.738	33	4994
	0.25	16	10	60	0.976±0.005	13.328	0.587	53.766	60	5043
	0.75	16	10	60	0.970±0.010	16.028	1.315	52.441	60	5058
	1.50	16	10	60	0.966±0.003	17.518	3.686	50.577	60	5015

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 10.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED	0.25	20	3	23	0.971±0.009	6.851	0.541	15.035	23	4984
	0.75	20	3	23	0.956±0.006	8.614	1.534	14.269	23	4959
	1.50	20	3	32	0.961±0.010	12.127	4.649	20.197	32	4964
	0.25	20	5	33	0.962±0.015	9.769	0.665	25.401	33	4976
	0.75	20	5	33	0.955±0.006	13.512	1.650	24.399	33	5011
	1.50	20	5	38	0.945±0.007	15.998	4.846	26.200	38	4999
	0.25	20	10	60	0.972±0.010	15.389	0.641	51.813	60	5012
	0.75	20	10	60	0.973±0.005	14.120	1.600	51.041	60	5039
	1.50	20	10	60	0.951±0.006	15.439	4.858	47.885	60	5065

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 11.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

## 5.2.3 Política M-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,2]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED/TOC	0.25	4	3	(1, 1, 1)	0.987±0.002	3.464	0.138	12.912	15	4964
	0.75	4	3	(1, 1, 1)	0.986±0.005	3.308	0.251	12.856	15	4995
	1.50	4	3	(1, 1, 1)	0.980±0.004	4.652	0.565	13.102	15	4933
	0.25	4	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.986±0.003	4.880	0.174	19.598	21	5026
	0.75	4	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.986±0.004	4.597	0.292	19.856	22	4975
	1.50	4	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.980±0.003	5.715	0.682	20.053	22	4974
	0.25	4	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.987±0.003	6.674	0.217	37.179	39	5020
	0.75	4	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.985±0.002	6.956	0.354	38.040	40	4930
	1.50	4	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.984±0.002	7.898	0.783	37.502	40	4983
	0.25	8	3	(1, 1, 1)	0.980±0.007	4.571	0.335	13.009	16	5056
	0.75	8	3	(1, 1, 1)	0.978±0.003	4.388	0.545	13.266	17	4990
	1.50	8	3	(1, 1, 1)	0.955±0.006	7.888	1.694	13.770	19	4991
	0.25	8	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.976±0.002	5.251	0.285	19.831	23	4991
	0.75	8	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.976±0.006	5.223	0.599	19.880	23	4990
	1.50	8	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.961±0.005	10.728	2.073	20.970	26	5023
	0.25	8	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.981±0.007	7.165	0.344	37.787	41	4.999
	0.75	8	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.980±0.002	7.873	0.700	38.025	42	4975
	1.50	8	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.975±0.004	11.389	1.781	39.333	44	4.967

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 12.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED/TOC	0.25	12	3	(1, 1, 1)	0.975±0.006	6.008	0.336	13.733	18	4990
	0.75	12	3	(1, 1, 1)	0.968±0.005	6.236	0.817	13.889	19	4991
	1.50	12	3	(1, 1, 1)	0.956±0.006	9.805	2.661	14.662	22	4929
	0.25	12	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.970±0.006	6.800	0.397	20.309	25	5023
	0.75	12	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.971±0.007	7.108	0.885	20.773	26	4983
	1.50	12	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.954±0.005	12.164	3.027	22.490	30	4988
	0.25	12	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.979±0.003	9.755	0.439	39.129	44	4977
	0.75	12	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.975±0.007	12.767	1.000	39.534	45	4962
	1.50	12	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.964±0.008	13.388	3.204	43.274	51	5012
	0.25	16	3	(1, 1, 1)	0.969±0.006	6.077	0.406	14.335	20	4972
	0.75	16	3	(1, 1, 1)	0.963±0.005	8.336	1.169	14.451	21	4999
	1.50	16	3	(2, 2, 2)	0.941±0.005	11.965	5.562	18.349	30	4997
	0.25	16	5	(5, 5, 5, 5, 5)	0.965±0.006	8.241	0.654	21.106	28	5065
	0.75	16	5	(5, 5, 5, 5, 5)	0.961±0.007	9.173	1.389	21.571	29	4978
	1.50	16	5	(6, 6, 5, 5, 5)	0.959±0.005	9.247	3.740	24.221	34	4964
	0.25	16	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.969±0.008	14.300	0.485	45.290	54	4951
	0.75	16	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.984±0.003	9.574	1.159	46.191	52	4996
1.50	16	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.980±0.003	8.071	3.526	47.216	56	5006	

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 13.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED/TOC	0.25	20	3	(1, 1, 1)	0.962±0.005	7.144	0.502	14.931	23	4960
	0.75	20	3	(1, 1, 1)	0.958±0.005	7.519	1.567	15.259	24	4956
	1.50	20	3	(2, 2, 2)	0.971±0.008	9.205	6.293	23.023	37	4998
	0.25	20	5	(5, 5, 5, 5, 5)	0.963±0.005	8.454	0.721	21.992	30	5025
	0.75	20	5	(5, 5, 5, 5, 5)	0.954±0.003	11.007	1.683	22.523	32	4954
	1.50	20	5	(6, 6, 6, 6, 6)	0.951±0.006	13.994	5.300	26.000	39	4993
	0.25	20	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.987±0.002	7.427	0.610	46.875	55	4976
	0.75	20	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.982±0.006	10.662	1.480	47.050	56	4.982
	1.50	20	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.968±0.005	14.834	4.430	46.614	60	5000
				(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.974±0.005	13.400	4.681	48.112	60	4998
			(4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.976±0.002	16.478	4.924	49.572	62	4975	

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 14.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

## 5.2.4 Política S-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,2]

Input control	Coefficient of variation	NM*	NJ*	NC*	Average use (Cards)	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED/TOC	0.25	4	3	1	0.84	0.994±0.015	6.731	0.001	18.559	21	5034
				2	0.45	0.999±0.001	0.964	0.110	18.813	21	4984
	0.75	4	3	2	0.47	0.998±0.001	2.157	0.200	19.155	21	4970
				2	0.52	0.999±0.001	1.904	0.455	35.877	39	4971
	0.25	4	5	2	0.44	0.998±0.002	1.773	0.111	35.937	38	4968
				2	0.46	0.997±0.001	3.051	0.216	35.727	37	5001
	1.5	4	5	2	0.50	0.997±0.002	2.890	0.479	35.984	37	4974
				1	0.76	0.982±0.016	9.304	0.001	58.145	59	5031
	0.75	4	10	2	0.44	0.998±0.001	0.285	0.122	79.462	80	4986
				2	0.46	0.998±0.003	2.585	0.235	77.933	78	4972
	1.5	4	10	2	0.51	0.995±0.003	2.449	0.529	74.007	75	4986
				2	0.46	0.996±0.003	3.236	0.219	18.402	21	5031
	0.25	8	3	2	0.46	0.996±0.003	3.236	0.219	18.402	21	5031
				2	0.48	0.997±0.002	3.159	0.440	18.375	21	5019
	0.75	8	3	2	0.51	0.999±0.001	0.875	1.225	34.073	39	4992
				2	0.45	0.997±0.002	3.511	0.221	34.135	36	5105
	1.5	8	5	2	0.46	0.997±0.001	2.675	0.433	35.004	40	4962
				2	0.50	0.993±0.004	4.126	1.241	34.967	40	4993
	0.25	8	10	1	0.74	0.980±0.015	12.596	0.042	58.582	62	5037
				2	0.44	0.997±0.002	1.575	0.226	77.831	80	4983
0.75	8	10	2	0.46	0.994±0.003	1.558	0.480	74.369	78	4968	
			2	0.52	0.993±0.004	4.507	1.289	69.388	70	5058	

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 15.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NM*	NJ*	NC*	Average use (Cards)	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED/TOC	0.25	12	3	2	0.46	0.994±0.004	3.044	0.272	18.060	22	5002
	0.75	12	3	2	0.47	0.991±0.005	4.588	0.629	18.042	22	4970
	1.5	12	3	2	0.52	0.998±0.001	4.717	2.008	31.763	39	5036
	0.25	12	5	2	0.44	0.996±0.001	4.222	0.294	34.253	40	5025
	0.75	12	5	2	0.46	0.996±0.002	4.178	0.651	34.419	40	5000
	1.5	12	5	2	0.47	0.997±0.003	3.051	0.216	35.727	37	5001
	0.25	12	10	1	0.80	0.975±0.016	12.579	0.083	58.443	57	4987
				2	0.44	0.995±0.003	2.501	0.319	74.178	77	5030
	0.75	12	10	2	0.46	0.995±0.004	5.425	0.7022	73.075	80	4961
	1.5	12	10	2	0.51	0.990±0.004	12.940	2.032	67.610	73	5036
	0.25	16	3	2	0.46	0.989±0.004	4.872	0.326	17.466	23	4988
	0.75	16	3	2	0.47	0.986±0.005	4.946	0.882	17.118	24	5007
	1.5	16	3	2	0.51	0.999±0.002	3.671	2.805	30.426	39	4958
	0.25	16	5	7	0.84	0.989±0.007	8.154	0.357	34.496	40	5015
	0.75	16	5	12	0.81	0.987±0.005	10.221	0.942	34.516	41	5002
	1.5	16	5	8	0.72	0.974±0.010	10.890	3.144	34.080	45	4980
	0.25	16	10	8	0.74	0.987±0.012	10.619	0.454	62.999	69	4996
	0.75	16	10	8	0.81	0.961±0.015	14.074	1.009	52.763	60	4992
1.5	16	10	12	0.72	0.968±0.016	18.832	3.135	55.986	65	4969	

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 16.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NM*	NJ*	NC*	Average use (Cards)	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED/TOC	0.25	20	3	2	0.46	0.983±0.006	5.365	0.389	16.637	24	5017
	0.75	20	3	2	0.48	0.971±0.005	6.712	1.123	16.315	24	5021
	1.5	20	3	2	0.52	0.991±0.012	5.601	3.793	27.536	39	5020
	0.25	20	5	7	0.84	0.980±0.011	7.729	0.408	34.537	43	4994
	0.75	20	5	8	0.80	0.984±0.006	8.392	1.239	34.544	45	4963
	1.5	20	5	12	0.72	0.971±0.011	14.045	4.036	33.223	45	5017
	0.25	20	10	8	0.75	0.986±0.003	10.026	0.523	61.532	76	5000
	0.75	20	10	8	0.82	0.967±0.015	16.045	1.263	53.355	60	5023
	1.5	20	10	12	0.73	0.954±0.018	20.250	4.124	53.198	65	5018

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 17.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

## 5.2.5 Política M-CLOSED escenario UNIF [1,6]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	4	3	(4, 4, 4)	0.948±0.005	9.256	1.216	8.851	12	2840
	0.75	4	3	(4, 4, 4)	0.945±0.006	9.642	1.312	8.405	12	2854
	1.50	4	3	(5, 5, 4)	0.958±0.015	11.384	1.609	10.120	14	2841
	0.25	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.958±0.003	9.348	1.059	11.717	15	2851
	0.75	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.961±0.005	9.984	1.089	11.705	15	2821
	1.50	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.946±0.006	13.362	1.359	11.419	15	2840
	0.25	4	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.957±0.007	12.132	0.790	17.179	20	2857
	0.75	4	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.954±0.006	11.976	0.884	17.088	20	2859
	1.50	4	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.951±0.005	12.410	1.048	16.922	20	2861
	0.25	8	3	(6, 6, 6)	0.966±0.005	9.802	1.833	11.889	18	2850
	0.75	8	3	(6, 6, 6)	0.962±0.006	9.894	2.093	11.548	18	2903
	1.50	8	3	(6, 6, 6)	0.946±0.007	15.017	2.531	11.214	18	2838
	0.25	8	5	(5, 5, 4, 4, 4)	0.958±0.005	16.032	1.934	15.666	22	2846
	0.75	8	5	(5, 5, 4, 4, 4)	0.951±0.006	15.631	2.053	15.439	22	2853
	1.50	8	5	(5, 5, 4, 4, 4)	0.943±0.005	17.476	2.564	14.966	22	2826
	0.25	8	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.964±0.006	16.809	1.576	24.182	30	2861
	0.75	8	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.965±0.006	17.995	1.680	24.089	30	2852
	1.50	8	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.956±0.007	22.171	2.239	23.545	30	2844

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 18.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	12	3	(8, 8, 8)	0.959±0.006	14.759	2.540	14.846	24	2814
	0.75	12	3	(8, 8, 8)	0.955±0.005	15.236	2.942	14.366	24	2848
	1.50	12	3	(9, 9, 8)	0.951±0.015	21.584	4.150	15.106	26	2868
	0.25	12	5	(6, 6, 6, 6, 6)	0.967±0.006	14.615	2.439	20.722	30	2837
	0.75	12	5	(6, 6, 6, 6, 6)	0.964±0.005	16.943	2.918	20.157	30	2869
	1.50	12	5	(6, 6, 6, 6, 6)	0.952±0.016	19.956	3.842	19.303	30	2841
	0.25	12	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3)	0.965±0.003	18.755	2.025	28.529	37	2858
	0.75	12	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3)	0.958±0.003	22.531	2.295	28.299	37	2861
	1.50	12	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3)	0.953±0.006	24.617	2.960	27.737	37	2818
	0.25	16	3	(10, 10, 10)	0.962±0.005	13.933	2.966	18.029	30	2858
	0.75	16	3	(10, 10, 10)	0.961±0.006	16.384	3.454	17.536	30	2861
	1.50	16	3	(10, 10, 10)	0.947±0.010	19.546	4.514	16.592	30	2818
	0.25	16	5	(7, 7, 7, 7, 7)	0.968±0.005	14.982	2.866	23.115	35	2845
	0.75	16	5	(7, 7, 7, 7, 7)	0.962±0.006	20.372	3.225	22.784	35	2836
	1.50	16	5	(7, 7, 7, 7, 7)	0.949±0.004	25.019	4.374	21.665	35	2828
	0.25	16	10	(5, 5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 4)	0.967±0.005	22.810	2.526	34.089	45	2796
	0.75	16	10	(5, 5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 4)	0.969±0.007	22.718	2.774	33.831	45	2947
	1.50	16	10	(5, 5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 4)	0.953±0.015	26.440	3.832	32.787	45	2833

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 19.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	20	3	(12, 12, 12)	0.962±0.005	11.700	3.496	21.090	36	2831
	0.75	20	3	(12, 12, 12)	0.958±0.016	14.096	4.203	20.308	36	2848
	1.50	20	3	(13, 13, 13)	0.948±0.015	29.894	6.373	21.144	39	2844
	0.25	20	5	(8, 8, 8, 8, 7)	0.959±0.006	17.708	3.333	24.173	39	2831
	0.75	20	5	(8, 8, 8, 8, 7)	0.950±0.006	20.654	3.805	23.639	39	2845
	1.50	20	5	(8, 8, 8, 8, 7)	0.954±0.005	24.775	5.523	25.934	43	2846
	0.25	20	10	(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 4, 4)	0.961±0.006	28.506	3.132	33.947	48	2855
	0.75	20	10	(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 4, 4)	0.954±0.007	26.109	3.477	33.655	48	2845
	1.50	20	10	(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 4, 4)	0.949±0.010	29.416	4.704	32.536	48	2816

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 20.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

### 5.2.6 Política S-CLOSED escenario UNIF [1,6]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED	0.25	4	3	20	0.965±0.006	23.364	1.198	16.547	20	2816
	0.75	4	3	20	0.968±0.011	19.410	1.352	16.364	20	2859
	1.50	4	3	20	0.964±0.010	20.959	1.583	16.144	20	2843
	0.25	4	5	34	0.966±0.015	34.458	1.165	30.589	34	2891
	0.75	4	5	34	0.970±0.016	36.517	1.217	30.545	34	2870
	1.50	4	5	34	0.966±0.010	23.643	1.398	30.377	34	2859
	0.25	4	10	65	0.960±0.011	48.456	0.834	62.098	65	3033
	0.75	4	10	65	0.962±0.015	51.242	0.900	61.997	65	3036
	1.50	4	10	65	0.951±0.016	52.697	1.071	61.662	65	3017
	0.25	8	3	22	0.954±0.005	23.098	1.810	15.889	22	2865
	0.75	8	3	22	0.949±0.011	18.577	1.991	15.719	22	2859
	1.50	8	3	22	0.945±0.015	21.397	2.481	15.240	22	2849
	0.25	8	5	37	0.953±0.016	32.352	1.946	30.535	37	2871
	0.75	8	5	37	0.954±0.017	24.109	2.280	30.164	37	2893
	1.50	8	5	37	0.951±0.015	27.370	2.686	29.766	37	2890
	0.25	8	10	65	0.959±0.006	67.844	1.600	59.041	65	3034
	0.75	8	10	65	0.950±0.015	55.632	1.721	58.955	65	3019
	1.50	8	10	68	0.954±0.016	56.675	2.153	61.546	68	2990

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 21.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED	0.25	12	3	27	0.963±0.006	22.783	2.657	17.660	27	2841
	0.75	12	3	27	0.961±0.009	25.660	2.813	17.554	27	2824
	1.50	12	3	28	0.954±0.010	26.228	3.854	17.477	28	2836
	0.25	12	5	43	0.954±0.015	24.631	2.464	33.653	43	2859
	0.75	12	5	43	0.955±0.016	23.608	2.640	33.579	43	2814
	1.50	12	5	46	0.956±0.015	36.441	3.640	35.538	46	2827
	0.25	12	10	70	0.963±0.005	44.157	2.092	61.415	70	3015
	0.75	12	10	70	0.953±0.007	55.929	2.288	61.077	70	3027
	1.50	12	10	70	0.944±0.009	62.559	2.969	60.713	70	2975
	0.25	16	3	30	0.959±0.006	22.999	2.964	18.079	30	2842
	0.75	16	3	30	0.955±0.007	28.457	3.374	17.677	30	2840
	1.50	16	3	34	0.959±0.009	28.489	5.065	19.894	34	2869
	0.25	16	5	48	0.962±0.016	21.146	2.992	35.901	48	2877
	0.75	16	5	48	0.955±0.015	18.082	3.420	35.413	48	2893
	1.50	16	5	48	0.953±0.006	29.776	4.692	34.152	48	2890
	0.25	16	10	75	0.950±0.009	68.247	2.355	63.955	75	2994
	0.75	16	10	75	0.947±0.015	45.206	2.737	63.715	75	2988
	1.50	16	10	75	0.945±0.017	66.733	3.778	62.783	75	2985

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 22.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED	0.25	20	3	34	0.951±0.015	24.243	3.577	18.967	34	2842
	0.75	20	3	34	0.953±0.005	23.697	4.012	18.540	34	2839
	1.50	20	3	37	0.962±0.006	25.162	5.769	19.810	37	2831
	0.25	20	5	52	0.955±0.016	39.086	3.430	37.016	52	2846
	0.75	20	5	53	0.947±0.015	31.945	3.368	37.818	53	2829
	1.50	20	5	55	0.944±0.025	33.828	5.780	37.572	55	2867
	0.25	20	10	82	0.949±0.015	50.583	3.070	67.879	82	2967
	0.75	20	10	82	0.944±0.016	40.813	3.499	67.546	82	2969
	1.50	20	10	88	0.952±0.010	38.599	4.758	72.454	88	2922

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 23.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

## 5.2.7 Política M-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,6]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED/TOC	0.25	4	3	(1, 1, 1)	0.999±0.001	2.297	0.729	21.707	24	2862
	0.75	4	3	(1, 1, 1)	0.999±0.002	5.267	0.796	21.632	24	2876
	1.50	4	3	(1, 1, 1)	0.999±0.003	4.012	0.932	21.996	23	2831
	0.25	4	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.992±0.005	5.733	0.668	31.232	33	2852
	0.75	4	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.992±0.005	3.668	0.710	31.689	35	2821
	1.50	4	5	(1, 1, 1, 1, 1)	0.994±0.006	3.670	0.952	31.195	35	2871
	0.25	4	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.989±0.007	1.983	0.580	76.815	77	2854
	0.75	4	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.991±0.005	1.279	0.631	76.571	79	2862
	1.50	4	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.992±0.006	3.326	0.759	77.168	80	2823
	0.25	8	3	(1, 1, 1)	0.997±0.003	5.698	1.267	22.324	28	2834
	0.75	8	3	(1, 1, 1)	0.996±0.006	8.791	1.479	22.438	30	2849
	1.50	8	3	(1, 1, 1)	0.996±0.004	8.700	2.007	22.699	29	2823
	0.25	8	5	(2, 2, 2, 2, 2)	0.980±0.006	6.910	1.285	31.529	40	2851
	0.75	8	5	(2, 2, 2, 2, 2)	0.981±0.005	10.773	1.398	31.839	37	2842
	1.50	8	5	(2, 2, 2, 2, 2)	0.984±0.007	15.412	1.847	31.817	38	2838
	0.25	8	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.986±0.005	0.571	1.178	75.510	82	2830
	0.75	8	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.988±0.004	1.372	1.265	75.751	79	2823
	1.50	8	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.983±0.006	3.477	1.672	74.946	81	2834

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 24.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED/TOC	0.25	12	3	(3, 3, 3)	0.954±0.015	39.061	1.188	19.095	30	2855
	0.75	12	3	(4, 4, 3)	0.961±0.016	55.422	1.525	20.402	31	2832
				(4, 4, 4)	0.984±0.015	17.226	1.692	21.366	31	2850
	1.50	12	3	(4, 4, 4)	0.969±0.009	24.103	2.523	20.226	32	2873
	0.25	12	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.968±0.006	17.865	1.634	31.878	43	2860
	0.75	12	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.971±0.004	17.427	1.867	31.661	43	2866
	1.50	12	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.965±0.004	22.489	2.613	31.461	42	2851
	0.25	12	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.986±0.005	3.937	1.685	74.374	82	2875
	0.75	12	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.984±0.005	2.294	1.717	75.269	83	2827
	1.50	12	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.977±0.007	2.326	2.407	76.352	80	2828
	0.25	16	3	(4, 3, 3)	0.957±0.008	17.254	1.554	19.850	32	2848
	0.75	16	3	(4, 4, 4)	0.990±0.014	23.546	2.108	21.484	34	2851
	1.50	16	3	(4, 4, 4)	0.967±0.015	24.717	3.201	20.572	33	2855
	0.25	16	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.956±0.005	20.445	1.988	31.818	43	2869
	0.75	16	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.961±0.016	27.696	2.273	31.801	45	2861
	1.50	16	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.945±0.015	34.145	3.307	31.648	45	2842
	0.25	16	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.981±0.017	7.407	1.976	76.366	86	2840
	0.75	16	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.983±0.009	2.552	2.236	76.393	85	2845
1.50	16	10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	0.975±0.015	8.520	3.214	77.361	90	2844	

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 25.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED/TOC	0.25	20	3	(4, 4, 4)	0.979±0.005	20.784	2.332	21.875	37	2827
	0.75	20	3	(4, 4, 4)	0.974±0.006	20.732	2.856	21.595	37	2839
	1.50	20	3	(4, 4, 4)	0.958±0.015	36.745	4.342	20.651	39	2830
	0.25	20	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.956±0.016	20.153	2.657	33.861	42	2823
	0.75	20	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.956±0.016	26.915	3.423	33.300	52	2862
	1.50	20	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.949±0.007	29.384	4.832	33.184	47	2850
	0.25	20	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.966±0.010	21.827	2.392	76.370	90	2871
	0.75	20	10	(2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.962±0.011	24.512	2.628	76.932	90	2835
	1.50	20	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.969±0.012	32.812	3.900	77.725	92	2849

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 26.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

## 5.2.8 Política S-CLOSED/TOC escenario UNIF [1,6]

Input control	Coefficient of variation	NM*	NJ*	NC*	Average use (Cards)	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED/TOC	0.25	4	3	1	0.67	1.000±0.000	0.000	0.441	32.137	35	2831
	0.75	4	3	1	0.67	1.000±0.000	0.000	0.481	31.755	33	2856
	1.5	4	3	1	0.66	1.000±0.000	0.000	0.590	32.080	35	2825
	0.25	4	5	1	0.65	0.990±0.003	0.093	0.322	61.033	67	2805
	0.75	4	5	1	0.65	0.990±0.002	0.126	0.356	50.659	62	2830
	1.5	4	5	1	0.65	0.991±0.002	0.248	0.493	60.532	62	2833
	0.25	4	10	1	0.62	0.992±0.001	0.103	0.231	118.410	117	2832
	0.75	4	10	1	0.63	0.991±0.003	0.246	0.274	116.619	120	2855
	1.5	4	10	1	0.63	0.989±0.002	0.504	0.408	113.207	115	2869
	0.25	8	3	1	0.66	0.999±0.001	1.080	0.893	30.711	38	2848
	0.75	8	3	1	0.67	0.999±0.001	1.153	1.015	30.755	37	2856
	1.5	8	3	1	0.67	0.999±0.001	3.771	1.442	30.629	35	2872
	0.25	8	5	5	0.74	0.984±0.007	0.093	1.069	61.506	64	2814
	0.75	8	5	5	0.76	0.978±0.005	0.292	1.187	61.180	62	2836
	1.5	8	5	5	0.81	0.969±0.006	3.048	1.610	57.905	65	2856
	0.25	8	10	1	0.65	0.990±0.002	0.112	0.836	112.704	119	2852
	0.75	8	10	1	0.63	0.986±0.003	0.322	0.942	109.779	117	2869
1.5	8	10	1	0.63	0.985±0.004	0.452	1.217	111.925	116	2840	

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 27.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NM*	NJ*	NC*	Average use (Cards)	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED/TOC	0.25	12	3	8	0.90	0.996±0.005	9.596	1.051	28.704	41	2838
	0.75	12	3	8	0.93	0.976±0.007	29.957	1.264	26.221	39	2852
	1.5	12	3	10	0.84	0.988±0.005	17.242	2.254	28.083	40	2866
	0.25	12	5	10	0.78	0.974±0.006	0.246	1.447	59.492	66	2854
	0.75	12	5	10	0.82	0.968±0.011	13.986	1.706	57.610	70	2895
	1.5	12	5	11	0.80	0.963±0.005	6.957	2.446	57.108	68	2856
	0.25	12	10	1	0.63	0.983±0.006	5.170	1.176	110.297	111	2869
	0.75	12	10	1	0.63	0.984±0.002	1.263	1.329	110.198	121	2847
	1.5	12	10	1	0.62	0.980±0.004	2.905	1.829	110.346	114	2816
	0.25	16	3	8	0.91	0.982±0.006	22.289	1.312	27.516	41	2860
	0.75	16	3	9	0.84	0.996±0.003	9.004	1.758	27.978	39	2858
	1.5	16	3	10	0.86	0.974±0.007	31.204	3.097	25.797	40	2888
	0.25	16	5	10	0.78	0.973±0.005	2.802	1.721	59.237	67	2838
	0.75	16	5	10	0.80	0.966±0.010	5.599	2.008	57.907	70	2844
	1.5	16	5	12	0.73	0.955±0.006	5.296	3.131	57.563	67	2851
	0.25	16	10	1	0.63	0.981±0.005	3.827	1.565	108.916	117	2862
	0.75	16	10	1	0.62	0.980±0.003	3.292	1.735	110.057	119	2847
	1.5	16	10	1	0.63	0.975±0.006	2.180	2.631	108.946	116	2868

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 28.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NM*	NJ*	NC*	Average use (Cards)	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
S-CLOSED/TOC	0.25	20	3	8	0.89	0.988±0.010	20.626	1.721	26.676	43	2808
	0.75	20	3	9	0.84	0.985±0.011	18.305	2.352	26.608	43	2842
	1.5	20	3	10	0.84	0.971±0.015	30.148	4.023	24.874	43	2855
	0.25	20	5	10	0.79	0.963±0.011	16.562	2.181	57.693	70	2856
	0.75	20	5	10	0.80	0.953±0.010	19.109	2.525	56.548	71	2847
	1.5	20	5	12	0.74	0.962±0.005	21.187	4.110	57.264	71	2854
	0.25	20	10	15	0.76	0.958±0.006	36.277	2.339	89.523	101	2836
	0.75	20	10	15	0.78	0.950±0.015	58.464	2.701	85.158	106	2851
	1.5	20	10	17	0.74	0.952±0.006	46.264	3.833	86.246	100	2821
					22	0.57	0.969±0.005	18.260	3.819	99.517	114
				50	0.26	0.969±0.006	2.430	4.539	105.568	119	2842

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 29.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

# 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para determinar el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto, se han analizado los resultados mediante la realización de gráficas comparativas a partir de los datos obtenidos, permitiendo así obtener información de forma detallada y sencilla de las medidas de rendimientos nombradas anteriormente.

Al realizarse más de 18 000 simulaciones en total, y para agilizar la exposición de resultados, se analizará en primer lugar cada política por separado, teniendo en cuenta la evolución de las medidas de rendimiento y el impacto de la variabilidad en cada una de ellas. Posteriormente, la comparación estará compuesta por datos de las diferentes políticas pero que tengan el mismo coeficiente de variabilidad. De esta forma, se podrá observar la respuesta que ofrece cada una de las políticas conforme aumenta la incertidumbre en el escenario. El objetivo es analizar al completo los resultados para poder encontrar cual es la política que más se adapta a los distintos entornos que pueden existir dentro de un sistema de producción CONWIP para el entorno multiproducto.

Por último, se presentará un segundo experimento que presenta modificaciones en la demanda, con el fin de observar si las políticas estudiadas pueden adaptarse según varíen las necesidades de los clientes.

## 6.1 Medidas de rendimiento e impacto de la variabilidad

En los sistemas de producción, asegurar la calidad en los procesos de producción y respetar los tiempos de entrega es fundamental para llevar a cabo una buena gestión que nos permita obtener beneficios. A nivel interno, la calidad es inversamente proporcional a la variabilidad en un sistema, donde interactúan operarios (mano de obra), maquinaria, estaciones de procesado, etc. Por ello, a la hora de tomar una decisión debemos de tener una estimación acerca de cómo evolucionará nuestro sistema antes las adversidades que se presenten, para así, poder elegir la política de control que mejor se adapte a nuestro entorno.

A continuación, se analizará el comportamiento de las medidas de rendimiento para cada política, así como su evolución en función de los tres niveles de variabilidad representados por los coeficientes 0.25 (baja), 0.75 (media) y 1.50 (alta).

### 6.1.1 Average waiting time

Los tiempos de espera para la demanda no servida aumentan conforme lo hacen el número de tipos de trabajos diferentes a procesar en el sistema y con el número de máquinas, presentando picos más notables para el sistema S-CLOSED. Además, para los escenarios con tiempos de proceso rápido (recogidos en la UNIF [1,2]), los sistemas se ven más afectados por la media y alta variabilidad que para los escenarios con un tiempo de proceso mayor (UNIF [1,6]).

Para sistemas con tiempos de procesados cortos, se aprecia que las políticas recogidas dentro del sistema TOC presentan mayor estabilidad (figura 27)<sup>6</sup>, especialmente para escenarios con un número de estaciones menor a 12.

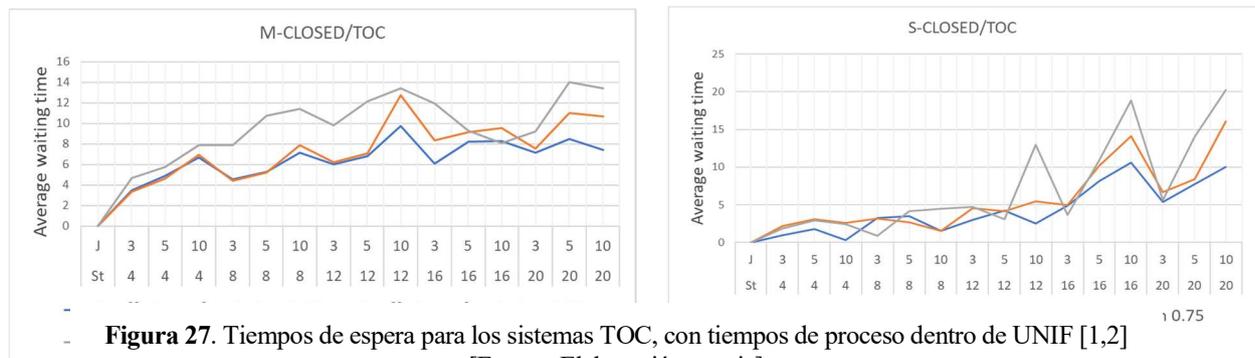
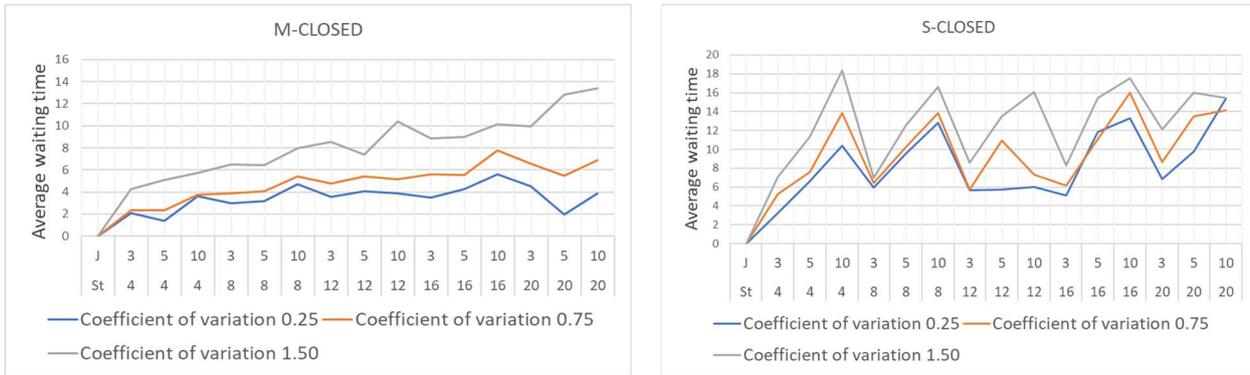


Figura 27. Tiempos de espera para los sistemas TOC, con tiempos de proceso dentro de UNIF [1,2]

[Fuente: Elaboración propia]

<sup>6</sup> En las gráficas, J se refiere al número de trabajos y St al número de estaciones

Como se puede observar, tenemos variaciones más bruscas dentro del escenario de mayor variabilidad (Coeficiente 1.50), pero absorben bien la pequeña y media variación en comparación con las políticas originales (M-CLOSED y S-CLOSED), como lo muestra la figura 28.



**Figura 28.** Tiempos de espera en M-CLOSED y S-CLOSED, con tiempos de proceso dentro de UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

En el caso de tiempos de proceso mayor ocurre la variabilidad afecta en menor medida, pero las políticas M-CLOSED y S-CLOSED se adaptan mejor, tanto a la alta variabilidad como a la media y baja (figura 29).

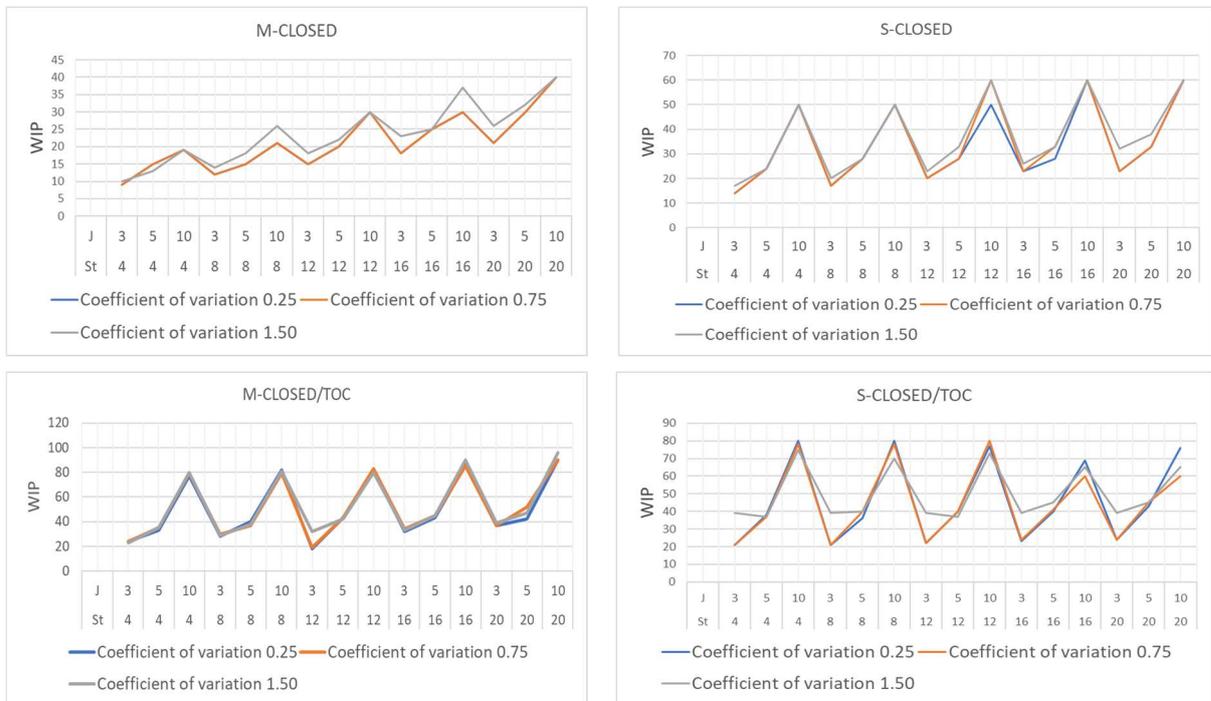


**Figura 29.** Tiempos de espera en los escenarios UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Se observa, que el sistema S-CLOSED/TOC presenta una mayor sensibilidad a verse afectado por la variabilidad cuando el número de estaciones aumenta. Este aumento de la sensibilidad se hace notar aún más cuando el sistema presenta el cuello de botella alejado del principio de la línea de producción, debido a que, al tener un mayor número de estaciones entre el punto de adjudicación y el de liberación de las tarjetas, genera un escenario de mayor incertidumbre al que el sistema tiene que responder sin conocer el comportamiento de la demanda, cosa que si ocurre para las políticas M-CLOSED y S-CLOSED, donde al ser liberadas las tarjetas una vez que se entrega el producto al cliente, permite tener una estimación de las necesidades de los productos. Esta incertidumbre es compensada con un aumento del WIP como se aprecia en el siguiente punto (figura 35), donde el orden de magnitud del WIP llega a ser el doble entre ambas variantes.

### 6.1.2 Work In Process

Al igual que con los tiempos de espera, el inventario en proceso aumenta en mayor medida conforme aumenta el número de trabajos antes que con el número de estaciones, volviendo a presentar mayores picos en la política S-CLOSED y en los sistemas TOC, siendo la M-CLOSED la que absorbe mejor el aumento del número de trabajos.



**Figura 30.** Representación del WIP frente al número de trabajos y estaciones en entorno UNIF [1,2]  
[Fuente: Elaboración propia]

Por otra parte, la variabilidad repercute menos cuando los tiempos de proceso son mayores, conclusión a la que también se llegó para los tiempos de espera.



**Figura 31.** Representación del WIP frente al número de trabajos y estaciones en entorno UNIF [1,6]  
[Fuente: Elaboración propia]

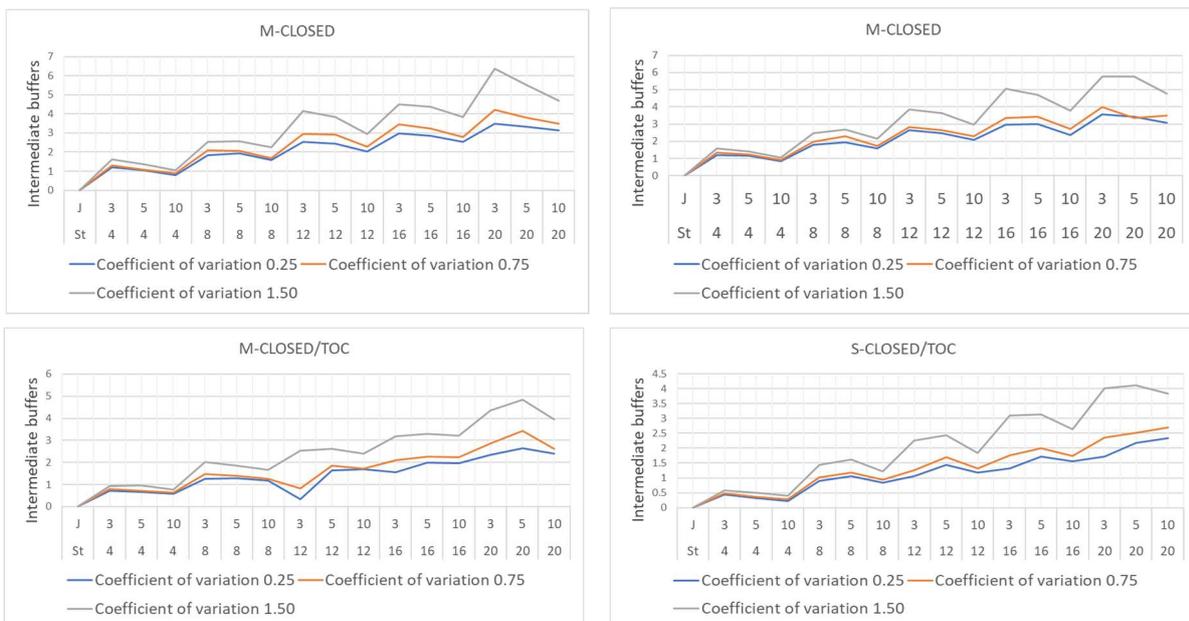
### 6.1.3 Intermediate buffers

Los niveles de los buffers dentro del proceso de producción presentan la misma tendencia expuesta para las otras medidas, aumentar con el número de trabajos. Por otro lado, un aumento del número de estaciones tiene un impacto menor para esta medida cuando estamos en entornos con tiempos de proceso corto (Figura 32).



**Figura 32.** Niveles de los buffers frente al número de trabajos y estaciones para el entorno UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Se observa también que la alta variabilidad altera considerablemente el nivel de los buffers para tiempos de procesos cortos, cosa que no ocurre en el entorno UNIF [1,6], donde los buffers si pueden absorber la variabilidad evitando generar inestabilidad dentro del sistema, una conducta que es común a todas las políticas.



**Figura 33.** Niveles de los buffers frente al número de trabajos y estaciones para el entorno UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

### 6.1.4 Finished good inventory

Por último, el punto de stock final, donde se almacenan los productos terminados a la espera de ser entregados a los clientes, presenta la tendencia natural de aumentar conforme aumenta el WIP, es decir, aumentar conforme aumenta el número de trabajos y estaciones.

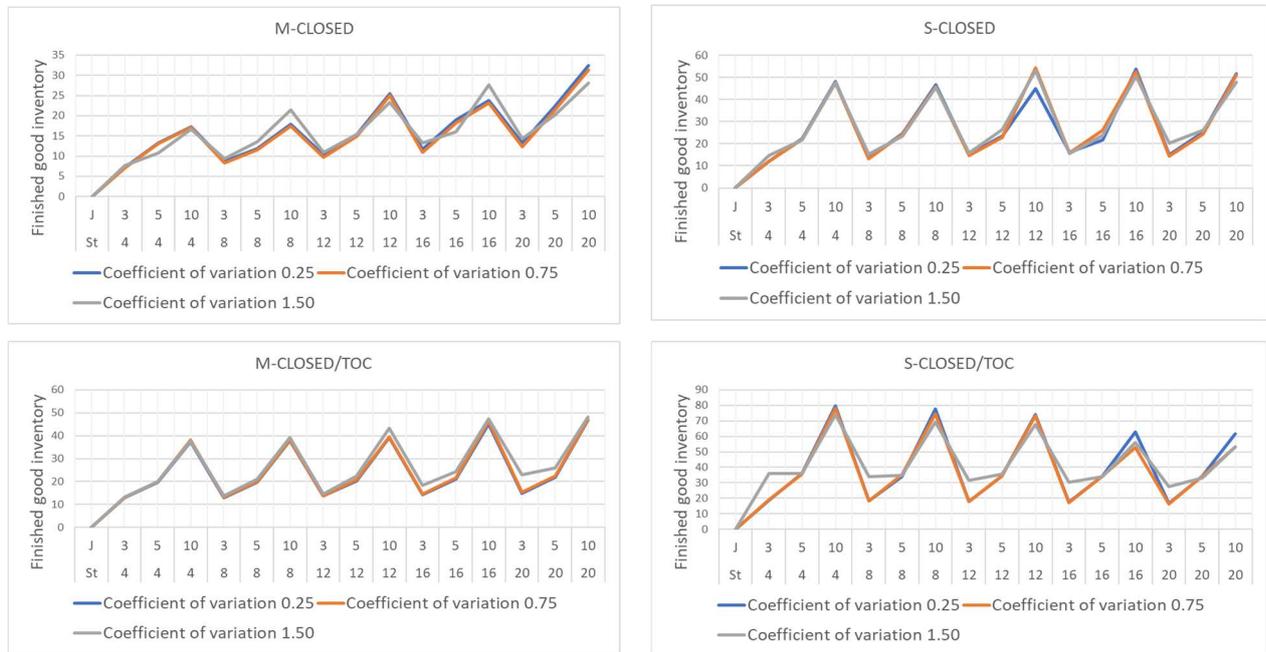


Figura 34. Inventario de productos terminados para entorno UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

Como se puede observar, la variabilidad en los tiempos de proceso afecta poco al inventario de productos terminados, ya sea bien en la distribución UNIF [1,2] (Figura 34), donde se deja ver que dicho inventario se desvía con la alta variabilidad, o en la distribución UNIF [1,6] (Figura 35), donde este desviamiento es mínimo.

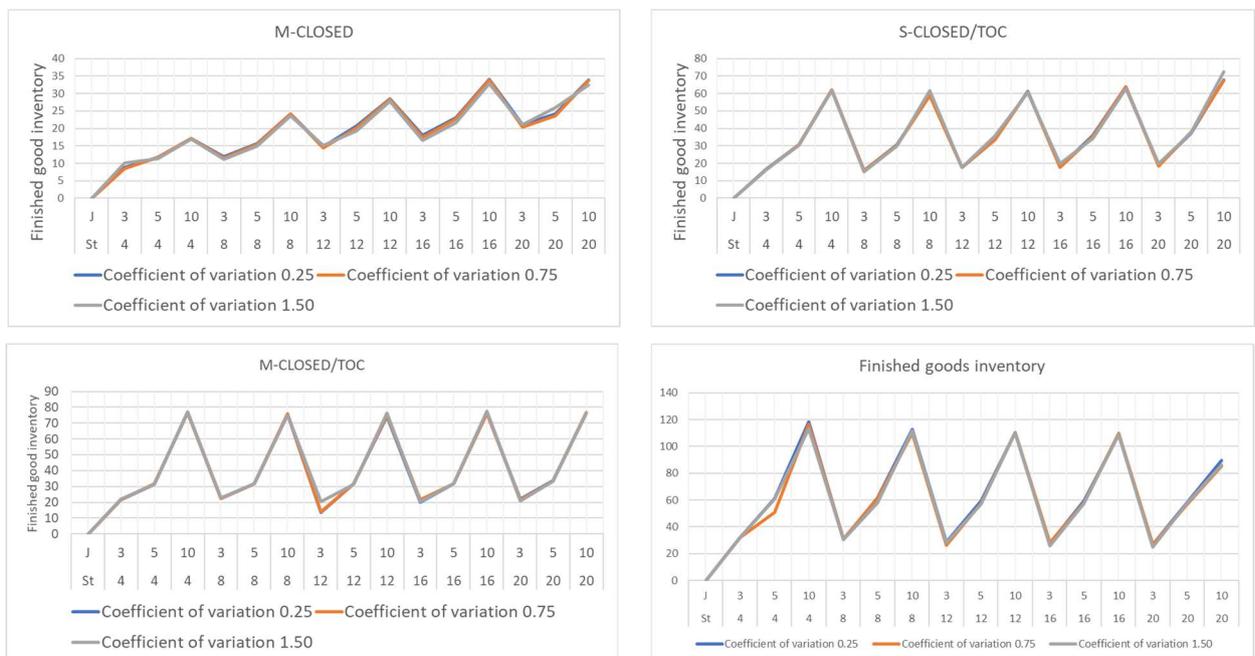


Figura 35. Inventario de productos terminados para entorno UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

## 6.2 Comparación de políticas de control

En este apartado se retoma la representación de las medidas de rendimiento, pero esta vez enfrentando las políticas entre sí. Para realizar la comparación se fijarán una serie de supuestos con el fin de realizar un escenario comparativo lógico. En primer lugar, no se tendrán en cuenta el número total de unidades procesadas, pues se ha buscado a la hora de extraer los datos la configuración óptima de tarjetas que mantuvieran el equilibrio entre maximización de *fill rate* y minimización del nivel de WIP. También se ha tenido en cuenta a la hora de obtener los resultados la minimización del tiempo de espera, tal es así, que en la política se busca dar respuesta a una de las cuestiones que nos marcábamos al principio del proyecto, encontrar la configuración adecuada a la hora de asignar las tarjetas a cada tipo de trabajo.

Algunos ejemplos de este proceso de optimización quedan reflejados en las tablas de resultados, marcándose la fila con los espacios en blanco para NSt, NJ y NC, indicando que los valores empleados son los mismos. Estos ejemplos son:

- **Tabla 14.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2].

Donde se muestra que al aumentar el número de tarjetas no se disminuye el tiempo de espera ni se logra obtener un mejor nivel de WIP en comparación con el mismo.

- **Tabla 15.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2] y **Tabla 16.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,2].

Se fija el número mínimo de tarjetas a emplear en 2. Esto es debido a que al estar en cuello de botella en la estación número 2, fijar el número en 1 daría un tiempo de espera ridículamente elevado para este escenario, pudiendo reflejar resultados erróneos.

- **Tabla 25.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6] y **Tabla 26.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para M-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6].

Aquí aparece reflejado el criterio de elección del número de tarjetas para cada tipo de trabajo. Se establece que para la política M-CLOSED/TOC no habrá mayoría de tipos de trabajos con un mayor número de tarjetas frente al resto. Este criterio se realiza debido a que para el entorno UNIF [1,6], dejar a un trabajo o al mínimo de trabajos con el mínimo número de tarjetas, implicaría la obtención de un elevado tiempo de espera, reflejando un resultado no óptimo.

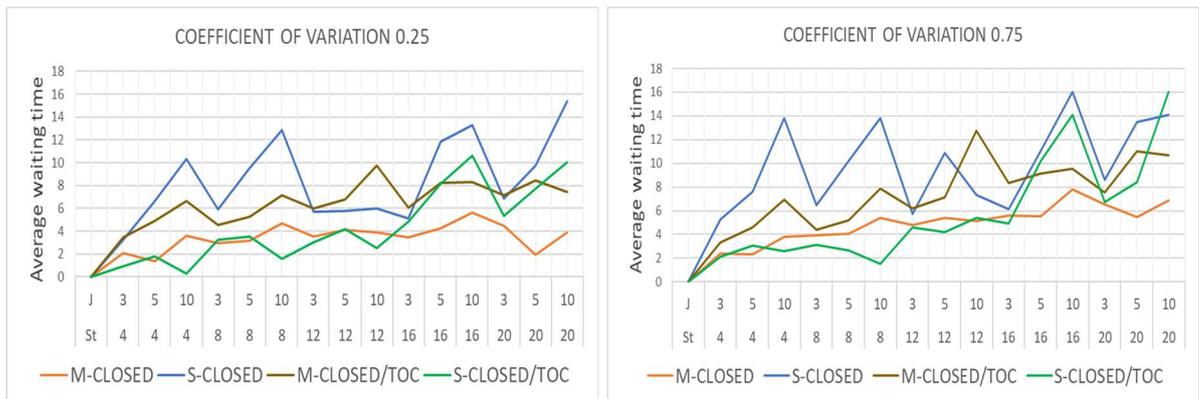
- **Tabla 29.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación para S-CLOSED/TOC, escenario UNIF [1,6].

En este ejemplo se pretende mostrar que al aumentar considerablemente el número de tarjetas provoca una disminución de los tiempos de espera, pero esta solución no es óptima debido a que tendríamos un aumento del WIP y aumentaríamos el *fill rate* en desproporción a los demás. También se muestra que, llegados a un cierto valor, por más que se aumente el número de tarjetas no se aumenta el *fill rate*, solo se disminuyen los tiempos de espera, siendo esto un resultado fuera del objeto del proyecto.

Ahora se procederá a la comparación de resultados, dividiéndolos según los tiempos de proceso empleados y las medidas a comparar.

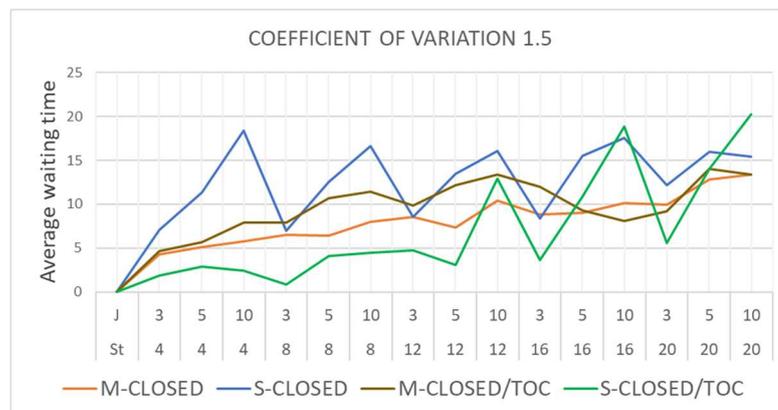
### 6.2.1 Entorno UNIF [1,2]

- Average waiting time



**Figura 36.** Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,2] y variabilidad media-baja  
[Fuente: Elaboración propia]

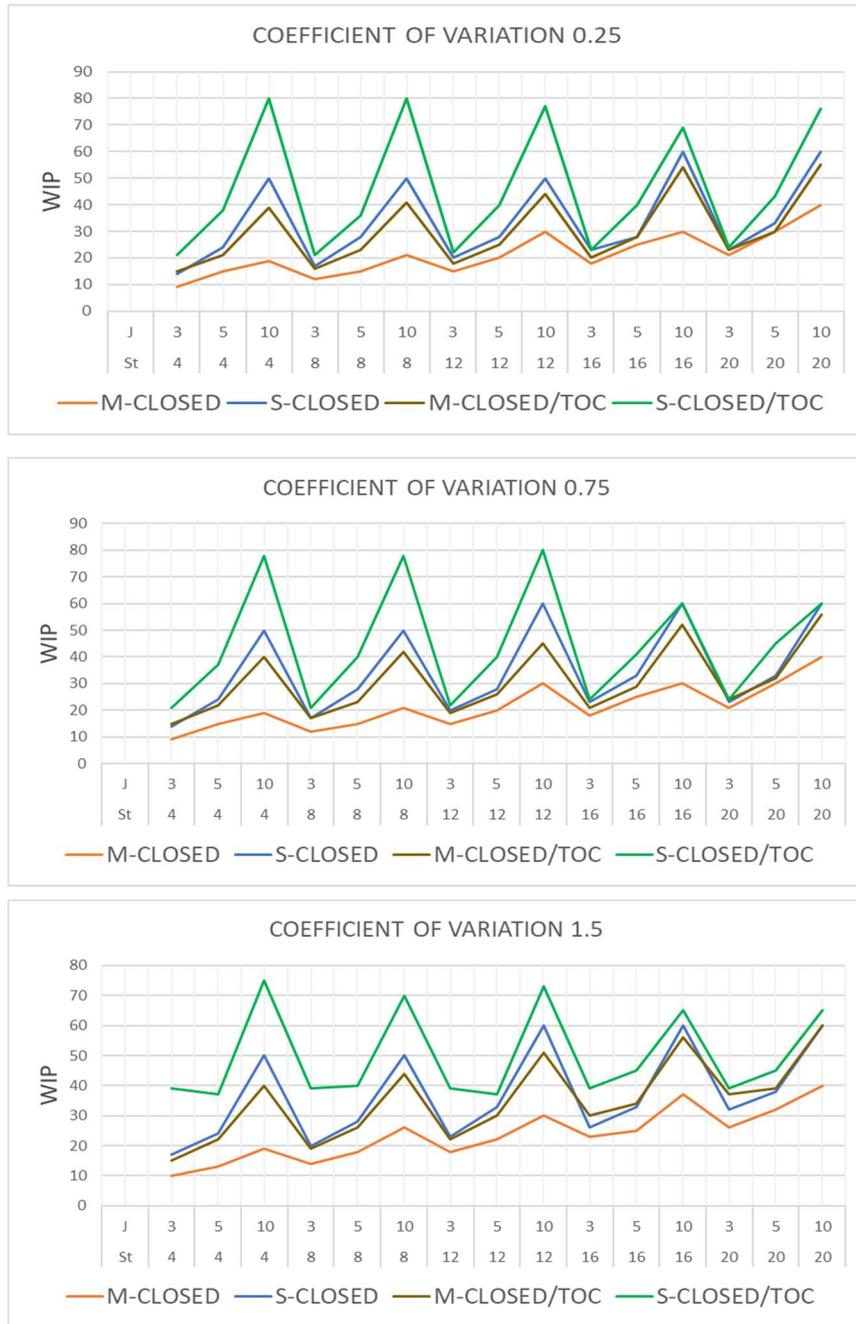
Como se puede observar, la respuesta media más rápida en los entornos de media y baja variabilidad, la da la política S-CLOSED/TOC. Esto es gracias a que ofrece una buena respuesta cuando presenta el cuello de botella cercano al comienzo de la línea de producción. Para el caso en el que la política S-CLOSED/TOC presenta el cuello de botella cercano al final de la línea de producción, la que mejores resultados ofrece es la M-CLOSED, destacándose de forma notable del resto. Esta política además es la que presenta una mayor estabilidad en la respuesta, sin presentar picos en los tiempos de espera como el resto. Lejos de alcanzar el objetivo se encuentra la política S-CLOSED, con picos elevados en los tiempos de respuesta conforme aumenta la variedad de trabajos.



**Figura 37.** Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,2] y variabilidad alta  
[Fuente: Elaboración propia]

Cuando aumenta la variabilidad del sistema, se acentúa que la que peor la absorbe es la S-CLOSED/TOC cuando presenta el cuello de botella cercano al final línea. En contraste, la política M-CLOSED/TOC ofrece resultados más estables, situándose como la mejor cuando el número de estaciones y la variedad de trabajos alcanza valores altos. En comparación a los tres niveles de variabilidad es la M-CLOSED quien presenta resultados más homogéneos, aunque no se sitúe como la mejor política en ninguno de los escenarios. En el punto contrario se encuentra la S-CLOSED, quien ofrece los tiempos de espera más elevados.

• **Work In Process**



**Figura 38.** Niveles de WIP en escenarios UNIF [1,2] [Fuente: Elaboración propia]

En esta medida se observa que la variabilidad afecta prácticamente por igual a todas las políticas, obteniéndose los mismos resultados en los tres entornos mostrados.

Para mantener niveles bajos de inventarios en proceso, la política que se destaca es la M-CLOSED, seguida por la M-CLOSED/TOC. Ambas responden bien cuando el nivel de variaciones es medio (prácticamente dan la misma respuesta). Se acercan al objetivo de niveles bajos de inventario las políticas S-CLOSED y S-CLOSED/TOC cuando los niveles de variación son bajos y la variación de trabajos es reducida, distanciándose esta última del resto conforme más afecte la variabilidad a los procesos y mayor variedad de trabajos exista. Los resultados ofrecidos por la política S-CLOSED/TOC, presentando las acumulaciones de inventario más grandes, conduce a la conclusión de que los buenos resultados ofrecidos en referencia al tiempo de espera, es a costa de aumentar los niveles de inventario, reflejando así una respuesta poco eficiente.

• Intermediate buffers

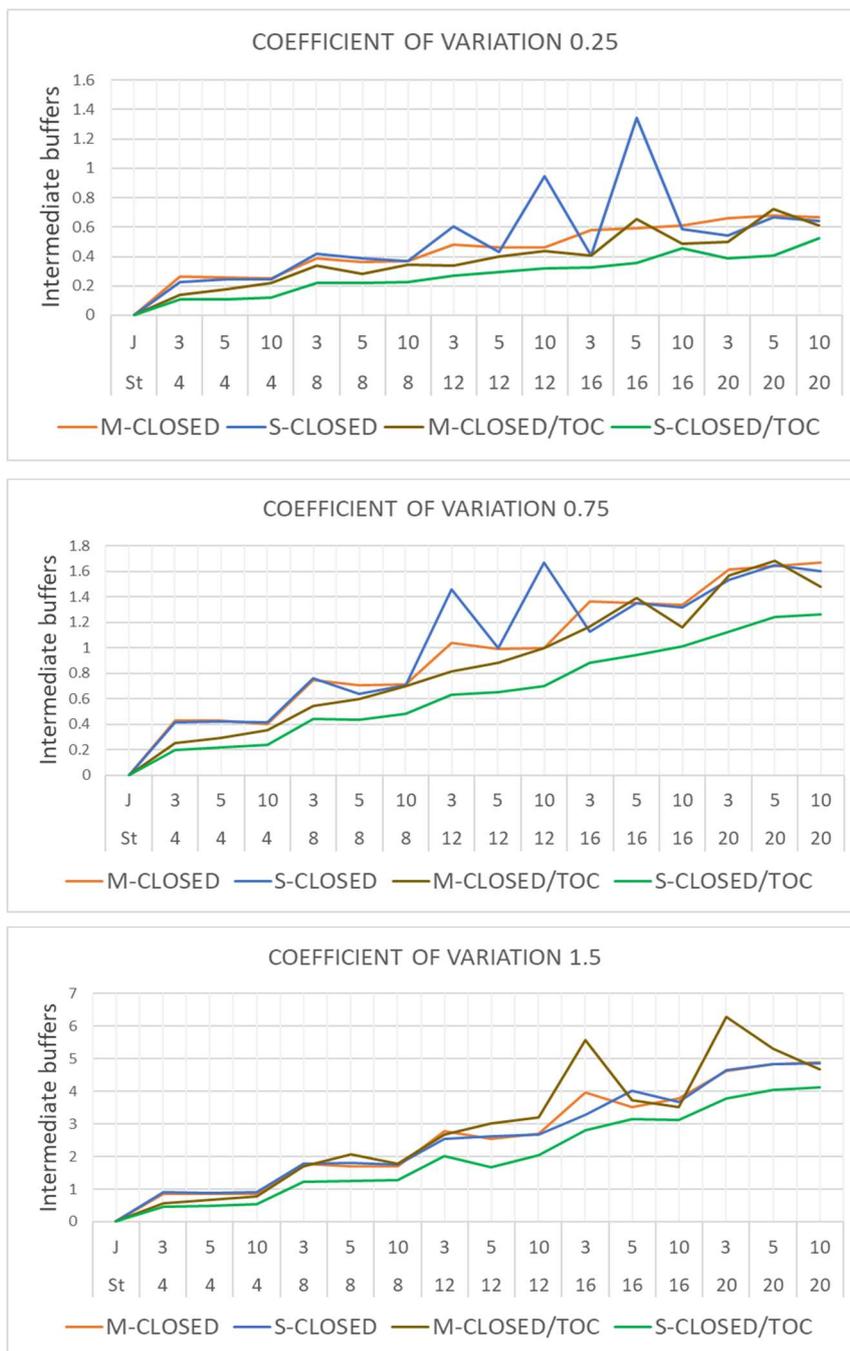
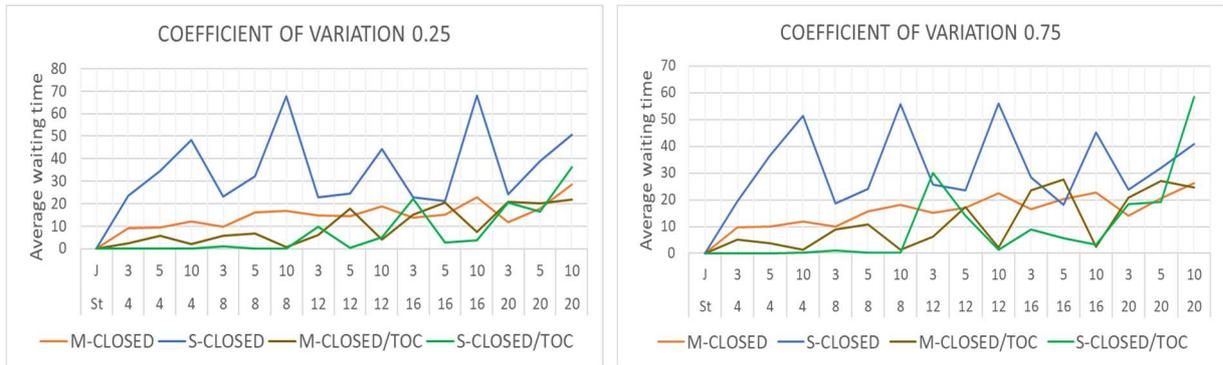


Figura 39. Niveles de los buffers del proceso productivo en escenarios UNIF [1,2]  
[Fuente: Elaboración propia]

En este caso es la política S-CLOSED/TOC la que mantiene los buffers más bajos. Esta medida no tendría que ser en todos los casos una buena señal, debido a que una ocupación baja de los buffers puede indicar un porcentaje de utilización de las estaciones bajo, con lo que se estarían desaprovechando los recursos. El resto de políticas dan respuestas parecidas salvo pequeños picos elevados. Dichos picos para el caso de M-CLOSED/TOC aparecen cuando el cuello de botella está más cercano al final de la línea de producción que de la entrada y cuando aumenta la variabilidad. Para el caso de la política S-CLOSED un aumento de la variabilidad permite mantener unos niveles más estables, sin presentar los picos que aparecen con la media-baja variabilidad.

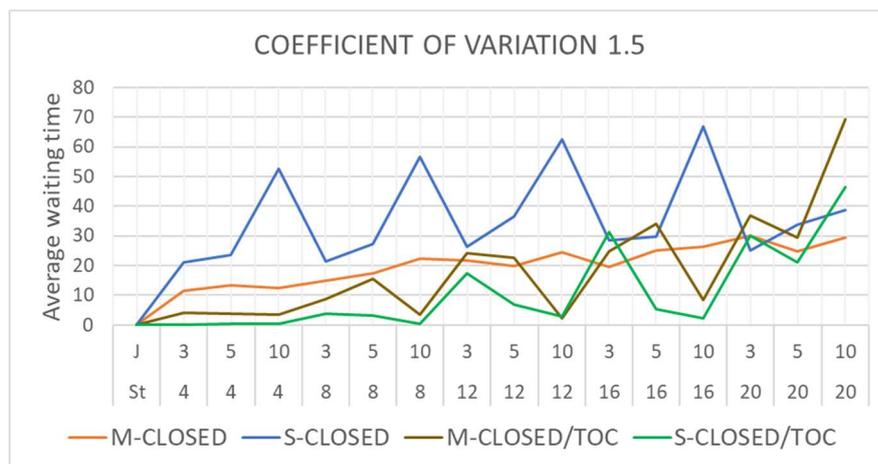
### 6.2.2 Entorno UNIF [1,6]

- Average waiting time



**Figura 40.** Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,6] y variabilidad media-baja [Fuente: Elaboración propia]

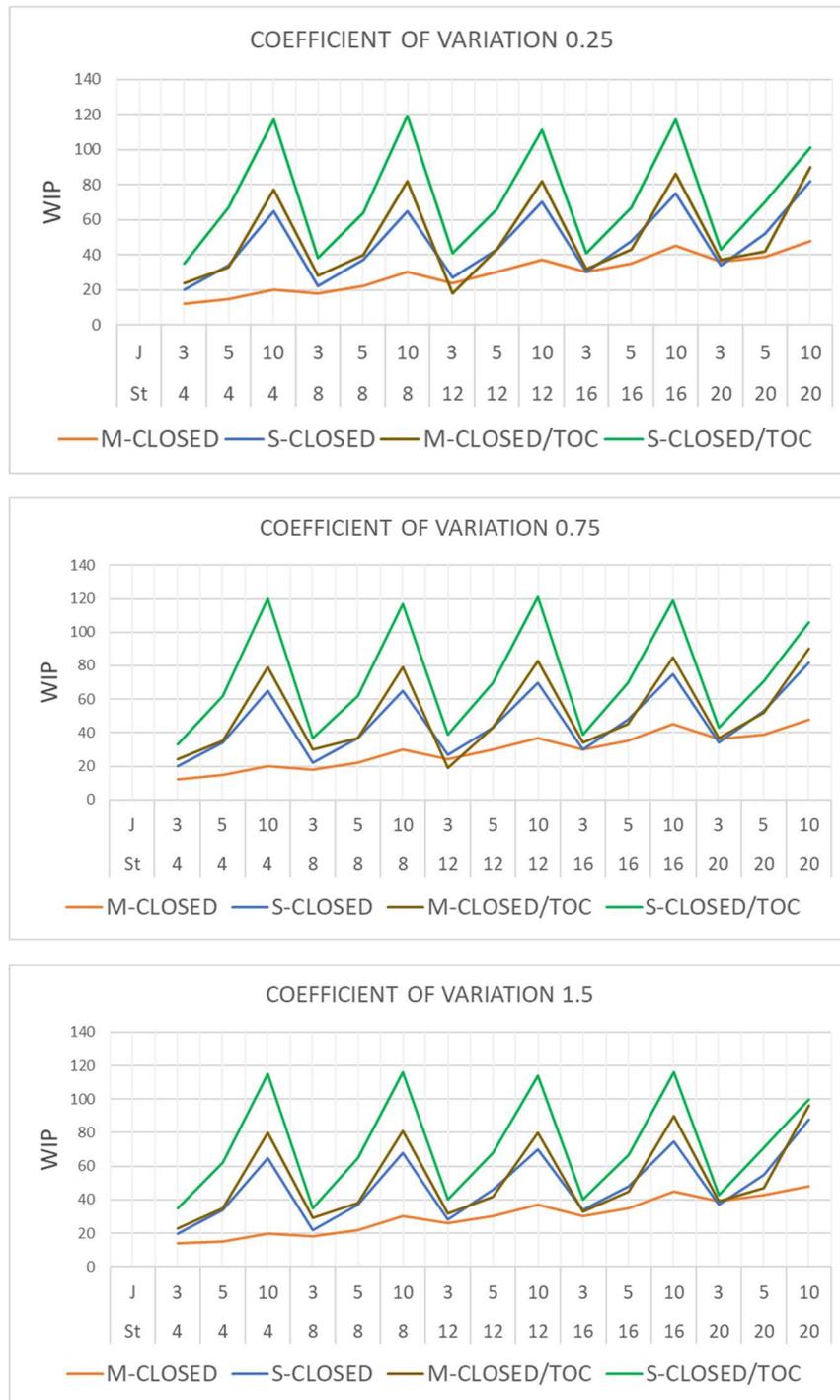
En estos escenarios donde el tiempo de proceso es mayor se observa que las políticas M-CLOSED/TOC y S-CLOSED/TOC obtienen mejores resultados que las respectivas M-CLOSED y S-CLOSED, caso que no se daba para tiempos de procesos menores, donde M-CLOSED ofrecía mejores resultados que M-CLOSED/TOC (salvo en algunos escenarios de variabilidad alta). También se puede ratificar lo observado en otros escenarios, esto es, que cuando el cuello de botella está próximo a la entrada de la línea de producción los resultados de los tiempos de espera son aún más favorables para los sistemas TOC. Cuando se tiene el caso contrario (el cuello de botella alejado de la entrada), es la M-CLOSED la que obtiene resultados más favorables en detrimento de las demás. De nuevo, la que obtiene peores resultados, alcanzando picos muy elevados en escenarios con gran variedad de trabajos, es la S-CLOSED.



**Figura 41.** Tiempo de espera medio en escenarios UNIF [1,6] y variabilidad alta [Fuente: Elaboración propia]

En escenarios de alta variabilidad, encontramos algunas respuestas alternativas en contraste con lo expuesto. Para un escenario concreto, con 20 estaciones y 3 tipos de trabajos, es la política S-CLOSED quien ofrece un tiempo de respuesta menor. Por otro lado, para el escenario de 20 estaciones y 10 tipos de trabajo, la que mejor resultados ofrece es la M-CLOSED, y de forma muy marcada. Además, de nuevo es la que presenta un comportamiento más estable conforme aumentamos la variabilidad, cosa que no ocurre con su variante directa, la M-CLOSED/TOC, que se ve más alterada con la alta variabilidad.

• **Work In Process**



**Figura 42.** Niveles de WIP en escenarios UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

Se observa ahora, que las políticas que mantienen los niveles más bajos de WIP es la M-CLOSED, seguida por bastante diferencia por la S-CLOSED. Esto nos indica que, en entornos con tiempos de proceso mayor, los sistemas TOC buscan el equilibrio entre el *fill rate* y el tiempo de espera a costa de aumentar el inventario en proceso. Además, la política S-CLOSED/TOC es la que mayores niveles acumula siendo la que en el apartado anterior había obtenido la mejor respuesta a los tiempos de espera. Adicionalmente, M-CLOSED/TOC vuelve a posicionarse como una política de peso, puesto que mantiene niveles de inventario parejos a S-CLOSED, pero con un tiempo de espera mucho menor, llegando incluso a ser la política óptima en cuanto a minimizar el WIP en escenarios de poca variabilidad y con un pequeño número de trabajos diferentes (Figura 44).

• Intermediate buffers

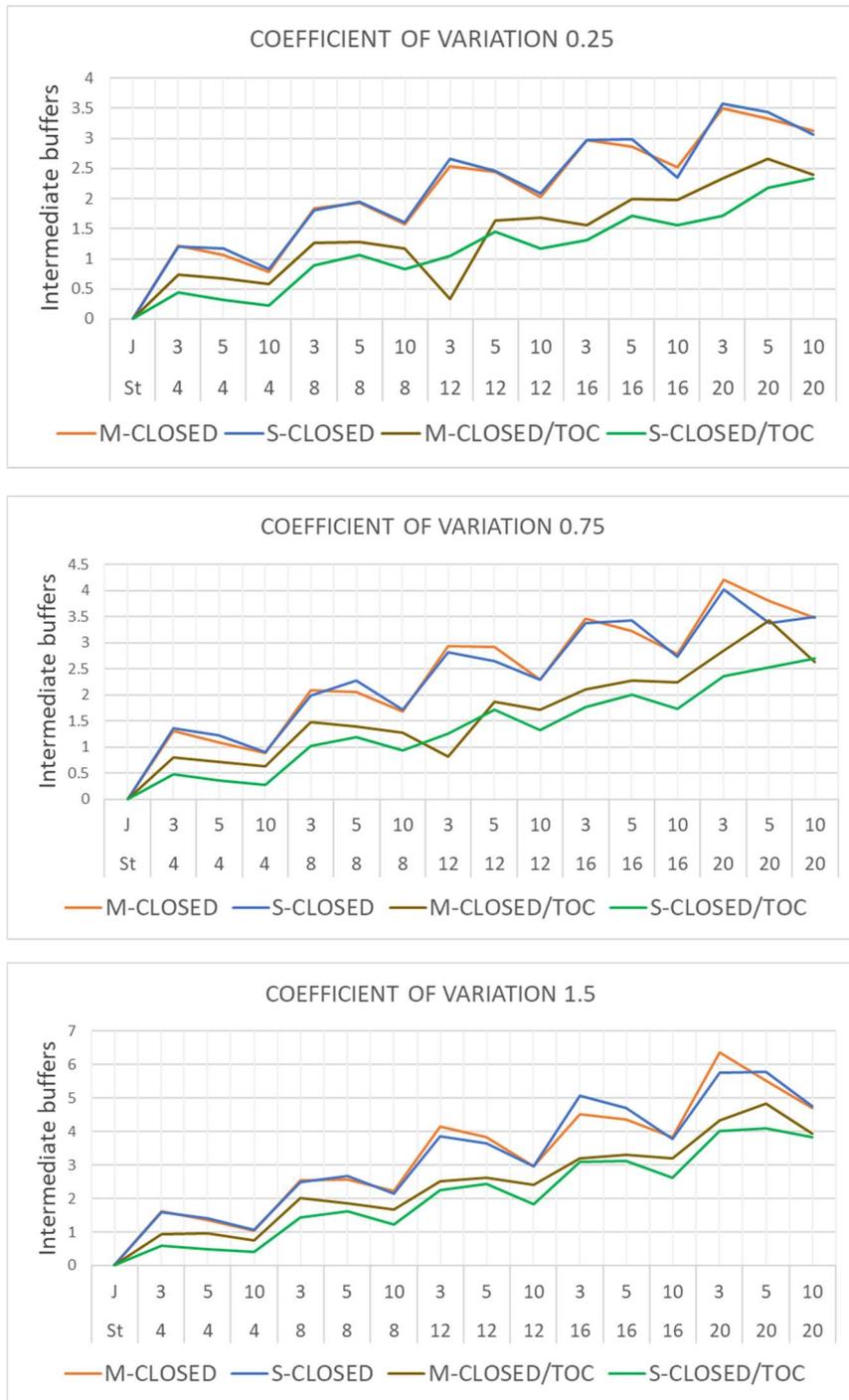


Figura 43. Niveles de los buffers del proceso productivo en escenarios UNIF [1,6] [Fuente: Elaboración propia]

El nivel de los buffers intermedios indica, junto con lo mostrado anteriormente, que los sistemas TOC basan su política de acción en intentar mantener un número elevado de inventario final. Esto se ve reflejado en que, a pesar de mostrar los niveles más elevados de inventario en proceso (figura 45), no presentan un elevado número de unidades en los buffers intermedios. Por el contrario, las políticas S-CLOSED y M-CLOSED mantienen un nivel más bajo del inventario final, acumulando más inventario durante el proceso de producción.

A modo de resumen, se procederá a comentar de forma individual cada una de las políticas empleadas, con el fin de encontrar las ventajas que cada una presenta según el entorno en el que nos encontremos.

- **Política M-CLOSED**

La política M-CLOSED es la que presenta resultados más estables independientemente de los tiempos de proceso usados. De esta forma, es la política que menor WIP acumula en ambos escenarios (el UNIF [1,2] y UNIF [1,6]). También ofrece tiempos de espera cortos, siendo la segunda mejor situada e incluso la mejor cuando la variabilidad es alta y tenemos un elevado número de estaciones y tipos de trabajos. En cuanto a los buffers intermedios ofrece peores resultados en comparación con las demás, medida que indica que no se trata de una política que acumule inventario de producto terminado, sino que lo distribuye por todo el sistema. Con todo ello, para escenarios con tiempos de proceso cortos sería la mejor opción. Para escenarios que presenten tiempos de proceso mayor, en donde la empresa no marcara los tiempos de espera como medida principal, sería de nuevo la mejor opción.

- **Política S-CLOSED**

Lejos de los objetivos marcados nos encontramos con la política S-CLOSED, siendo esta la que peores resultados obtiene de forma general, tendiendo a acumular grandes cantidades de inventario en comparación con las M-CLOSED y ofreciendo elevados tiempos de espera. Esto es debido a que le afecta en mayor medida la variedad de los trabajos, ofreciendo no tan malos resultados cuando esta variedad está en torno a 3 tipos de trabajo. A su favor, presenta menores acumulaciones de WIP que la política S-CLOSED/TOC en ambos escenarios y que la M-CLOSED/TOC cuando se trata de tiempos de proceso menores.

- **Política M-CLOSED/TOC**

La política M-CLOSED/TOC sería la política óptima dentro de las que se corresponden con los sistemas TOC, ofreciendo una menor acumulación de inventario que la S-CLOSED, pero lejos de alcanzar los resultados de la M-CLOSED. Se destaca que, cuando presentamos gran variabilidad del número de trabajos y el cuello de botella está próximo a la entrada es la que menor WIP acumula para cualquier escenario, presentando también mejores resultados que la M-CLOSED en este caso. Además, cuando el cuello de botella está próximo a la salida, es la que mejor resultado ofrece en cuanto a tiempos de espera se refiere. En contra, tiende a acumular WIP conforme aumenta la variedad de los trabajos, acumulando grandes cantidades de inventario de producto final, manteniendo unos buffers intermedios bajos (esto indica un bajo porcentaje de utilización de las máquinas).

- **Política S-CLOSED/TOC**

La política S-CLOSED/TOC es la que presenta menores tiempos de espera de todas cuando los tiempos de proceso son mayores (UNIF [1,6]), y también para tiempos de proceso rápido (UNIF [1,2]) cuando el cuello de botella está próximo a la entrada. En contraposición, presenta grandes acumulaciones de WIP conforme aumenta la variedad de trabajos que, comparándolo con los niveles bajos de los buffers intermedios, nos viene a decir que su forma de actuar es similar a la de M-CLOSED/TOC, acumular un gran inventario de producto terminado.

En referencia a la variabilidad, que presentaba tres niveles que afectaban a los tiempos de proceso<sup>7</sup>, prácticamente no habría que tenerla en cuenta para los entornos con tiempos de proceso dentro de UNIF [1,6], puesto que afecta a todas las políticas prácticamente en la misma medida, siendo las M-CLOSED y S-CLOSED las que mejor la absorben por poca diferencia. Respecto a los escenarios con tiempos de proceso más rápido, dentro del entorno UNIF [1,2], vemos que M-CLOSED/TOC le gana terreno a M-CLOSED cuando la variabilidad y el número de estaciones es superior a 12, dando unos tiempos de espera menores. Para este entorno, la política M-CLOSED/TOC es quien mejor absorbe la media y baja variabilidad en comparación a las demás, y la S-CLOSED es quien más se ve afectada por la alta variabilidad.

---

<sup>7</sup> En función del coeficiente usado: baja (0.25), media (0.75) y alta (1.50).

### 6.3 Escenario de simulación alternativo

Para realizar un análisis más exhaustivo, tomando de ejemplo el estudio realizado por Framiñán *et al.* (2000), se procedió a realizar un primer tanteo en un segundo experimento. Dicho experimento consistió en un escenario que presentaba variaciones en la demanda entre los tipos de trabajo, con un tiempo de simulación menor para hacerlo más ágil (de 18 000 unidades de tiempo). Así pues, se marcó un trabajo con la doble probabilidad de ser demandado por los clientes con respecto al resto de tipos de trabajo.

Dentro de las implementaciones, se tuvo en cuenta un único caso en función de la demanda. Este caso, el caso “desfavorable”, implicaba que el tipo de trabajo con doble probabilidad de ser elegido por el cliente era aquel que presentara unos tiempos de proceso mayor. Con esto se pretendió analizar el sistema cuando se llevara a la saturación. Para localizar el escenario desfavorable, en la siguiente tabla se muestran los distintos tipos de trabajo junto con el sumatorio de los tiempos de proceso, cada uno correspondiente con los distintos escenarios a implementar en función del número de estaciones.

Job type	Average summation of process time				
	4M	8M	12M	16M	20M
A	7	14	18	24	31
B	5	10	17	23	27
C	6	11	16	21	27
D	6	10	14	21	27
E	5	11	16	21	27
F	6	12	18	24	31
G	7	13	18	24	31
H	5	10	15	22	29
I	4	10	17	22	29
J	7	13	19	26	30

**Tabla 30.** Sumatorio de los tiempos de proceso para cada tipo de trabajo [Fuente: Elaboración propia]

A modo de ejemplo, en el caso de 12 estaciones y 5 tipos de trabajos, el escenario desfavorable sería aquel en el que el producto con doble probabilidad de ser demandado fuera el tipo A, pero en el caso de 12 estaciones y 10 tipos de trabajos sería el de tipo J.

Con el escenario definido y durante la realización de las simulaciones, se decidió descartar el experimento. El descarte fue debido a que, al comenzar con el escenario UNIF [1,2] y la política M-CLOSED, la única diferencia con el estudio principal (todos los trabajos con la misma probabilidad), es que para obtener los valores deseados de *Fill rate* hay que aumentar el número de tarjetas del trabajo con doble probabilidad en detrimento de disminuir el resto de las tarjetas, produciéndose una simple compensación y un leve aumento del WIP total. Con los escenarios S-CLOSED esta compensación estaba reflejada en el que un elevado número del total de tarjetas era utilizado por el tipo de trabajo con mayor probabilidad de ser demandado, produciéndose también un leve aumento del número total de tarjetas.

Esto refleja que con este escenario alternativo se llegan a unos resultados parejos al estudio principal, pero con un mayor WIP total. Además, existía el defecto de que este escenario alternativo elimina parte de la incertidumbre, pues de antemano se tiene una estimación de la demanda a corto plazo al conocer que un trabajo tendrá mayor peso. Por ello, se descartó, dándole mayor peso al escenario principal, donde si se conoce la mezcla de productos a largo plazo, pero se tiene incertidumbre en la demanda a corto plazo.

A continuación, se mostrarán a modo de justificación, las tablas que recogen los resultados obtenidos en el escenario alternativo para el entorno UNIF [1,2] de la política M-CLOSED, reflejando que el escenario del estudio principal, donde todos los trabajos tenían la misma probabilidad de ser demandados, es el más adecuado para un análisis y estudio comparativo.

## 6.3.1 Política M-CLOSED escenario alternativo UNIF [1,2]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	4	3	(3, 3, 3)	0.955±0.013	2.988	0.266	7.163	9	4518
	0.75	4	3	(3, 3, 3)	0.946±0.011	3.214	0.433	6.996	9	4529
	1.50	4	3	(4, 4, 3)	0.956±0.012	5.495	0.929	8.512	11	4479
	0.25	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.987±0.006	2.476	0.271	13.232	15	4494
	0.75	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.984±0.004	2.741	0.426	13.091	15	4463
	1.50	4	5	(3, 3, 3, 3, 3)	0.965±0.011	5.438	0.871	12.626	15	4509
	0.25	4	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.996±0.021	2.182	0.271	28.246	30	4525
	0.75	4	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.996±0.034	2.695	0.449	28.065	30	4540
	1.50	4	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.992±0.034	5.283	0.925	27.598	30	4508
	0.25	8	3	(5, 4, 4)	0.972±0.009	3.819	0.399	9.564	13	4464
	0.75	8	3	(5, 4, 4)	0.957±0.042	4.831	0.785	9.163	13	4485
	1.50	8	3	(6, 5, 5)	0.942±0.217	8.357	1.945	10.957	16	4535
	0.25	8	5	(4, 3, 3, 3, 3)	0.974±0.006	3.560	0.384	12.732	16	4451
	0.75	8	5	(4, 3, 3, 3, 3)	0.962±0.017	4.605	0.739	12.368	16	4480
	1.50	8	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.952±0.016	9.339	1.756	15.364	20	4446
	0.25	8	10	(3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.966±0.004	6.222	0.375	17.778	21	4470
	0.75	8	10	(3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)	0.953±0.013	6.359	0.738	17.387	21	4514
	1.50	8	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)	0.971±0.011	13.226	1.775	25.402	30	4446

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 31.** Hoja 1/3 de resultados de la simulación en el escenario alternativo [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	12	3	(6, 5, 5)	0.975±0.008	4.197	0.476	11.223	16	4480
	0.75	12	3	(6, 5, 5)	0.954±0.017	5.394	1.019	10.685	16	4479
	1.50	12	3	(8, 6, 6)	0.951±0.015	11.818	2.723	12.964	20	4478
	0.25	12	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.960±0.008	5.226	0.475	15.378	20	4523
	0.75	12	5	(4, 4, 4, 4, 4)	0.953±0.013	6.779	0.9755	14.904	20	4490
	1.50	12	5	(6, 4, 4, 4, 4)	0.947±0.017	11.180	2.646	17.207	24	4524
	0.25	12	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4)	0.987±0.001	6.143	0.456	26.502	31	4493
	0.75	12	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4)	0.974±0.004	8.915	0.978	25.953	31	4478
	1.50	12	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4)	0.958±0.014	13.750	2.655	24.271	31	4518
	0.25	16	3	(7, 6, 6)	0.971±0.019	5.029	0.772	12.673	19	4506
	0.75	16	3	(7, 6, 6)	0.943±0.016	9.181	1.343	11.880	19	4511
	1.50	16	3	(10, 7, 7)	0.953±0.025	14.524	3.767	14.515	24	4466
	0.25	16	5	(6, 4, 4, 4, 4)	0.976±0.010	6.874	0.584	15.833	22	4501
	0.75	16	5	(6, 4, 4, 4, 4)	0.960±0.014	7.999	1.406	14.966	22	4540
	1.50	16	3	(7, 5, 5, 5, 5)	0.947±0.023	13.358	3.783	17.659	27	4475
	0.25	16	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4)	0.974±0.006	8.126	0.578	24.814	31	4524
	0.75	16	10	(3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4)	0.966±0.008	9.623	1.297	24.259	31	4471
	1.50	16	10	(4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.958±0.007	15.614	3.714	30.829	40	4482

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 32.** Hoja 2/3 de resultados de la simulación en el escenario alternativo [Fuente: Elaboración propia]

Input control	Coefficient of variation	NSt*	NJ*	NC*	Fill rate (95% confidence interval)	Average waiting time	Intermediate buffers	Finished goods inventory	WIP	Processed units
M-CLOSED	0.25	20	3	(9, 6, 6)	0.973±0.014	5.244	0.657	13.047	21	4518
	0.75	20	3	(9, 6, 6)	0.953±0.025	8.598	1.659	12.076	21	4499
	1.50	20	3	(13, 7, 7)	0.945±0.020	18.791	4.805	14.969	29	4478
	0.25	20	5	(8, 5, 5, 5, 5)	0.987±0.004	6.680	0.676	20.322	28	4449
	0.75	20	5	(8, 5, 5, 5, 5)	0.974±0.015	8.114	1.707	19.191	28	4510
	1.50	20	5	(9, 6, 6, 6, 6)	0.963±0.011	16.070	4.930	20.895	33	4552
	0.25	20	10	(5, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.988±0.003	7.319	0.648	33.446	41	4427
	0.75	20	10	(5, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.979±0.012	14.538	1.682	32.296	41	4498
	1.50	20	10	(5, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4)	0.950±0.011	18.491	4.766	29.230	41	4482

NSt\*, NJ\*, NC\*: En orden, número de estaciones, número de trabajos y número de tarjetas.

**Tabla 33.** Hoja 3/3 de resultados de la simulación en el escenario alternativo [Fuente: Elaboración propia]



# CONCLUSIONES

---

A partir del trabajo desarrollado en el análisis presentado, se han podido extraer una serie de conclusiones. Éstas, no solo se basan en los resultados obtenidos a partir de los objetivos marcados, sino que también en otros ámbitos significativos debido a su relevancia dentro del desarrollo de los sistemas de producción.

Así, la principal ventaja de implementar un sistema CONWIP se basa en presentar un tiempo de ciclo reducido, capaz de responder a la variabilidad amoldándose en función del objetivo a lograr. Esto es posible gracias a que permite una mayor flexibilidad económica en pos de hacer cambios en la ingeniería y el adecuado diseño del sistema. Por otro lado, los sistemas Kanban mantienen un control más ajustado del sistema y del WIP a través de las tarjetas de forma individual en cada estación de trabajo, mientras que los sistemas CONWIP son más fáciles de implementar y ajustar, ya que es un único conjunto de tarjetas el que permite controlar todo el sistema.

También, la estrategia de control y manejo de las tarjetas discutido muestra cómo la simulación se puede utilizar como una herramienta de apoyo a la decisión efectiva para las operaciones de producción. Además, modelando los sistemas con conocimiento permite efectuar un modelo válido aplicable a cualquier escenario dentro de la industria, desde un almacén de una gran empresa hasta una panadería.

Por otra parte, el análisis de las políticas de control mencionadas nos ha podido mostrar cuales son las que se desmarcan del resto y cuáles son las menos eficientes cuando se busca obtener un alto nivel de servicio. Más concretamente nos marca la política M-CLOSED como la más cercana a los objetivos definidos con carácter general. Sin embargo, no debemos olvidar el inconveniente que tiene establecer correctamente el número de tarjetas para cada tipo de trabajo, en contraste con el uso de una única tarjeta dentro del sistema.

Este análisis también refleja la evolución que se está llevando a cabo dentro del control de sistemas productivos, donde originalmente el sistema Kanban tenía un mayor peso. Posteriormente apareció el sistema CONWIP, el cual empleaba un único conteo de cartas para todos los trabajos. Y ahora se está buscando la forma de obtener mayor flexibilidad dentro de los sistemas CONWIP, apareciendo el conteo de tarjetas individualizado para cada tipo de trabajo y su extracción en función del cuello de botella para los sistemas TOC.

En referencia a dichos sistemas TOC, representados por las políticas S-CLOSED/TOC y M-CLOSED/TOC, sería interesante tener en cuenta en un futuro adaptar el diseño de la línea de producción para poder localizar el cuello de botella en función de lo que más nos interese para la recirculación de tarjetas. Dicho argumento estaría basado en los escenarios que, de forma puntual, son las políticas que mejores resultados ofrecen, pudiendo ser esta cuestión objeto de estudios posteriores.

Por último, este trabajo busca abrir los ojos hacia la variedad de situaciones que se generan dentro de una industria o un sistema, sin pretender mostrar una política como óptima para todos los sistemas, sino mostrar que es importante tener en cuenta aquella política que mejor se adapte a cada tipo de escenario o situación. Así, mediante este análisis se ha querido mostrar las debilidades y fortalezas de cada una de ellas, puesto que, al no existir un marco de directrices unificado para modelar los sistemas de control de la producción, se ha buscado profundizar en su comportamiento. Todo ello cuidando la robustez de los resultados empleando un gran número de réplicas, permitiendo intervalos de confianza válidos e hipótesis que aseguren la significancia de las diferencias entre las distintas políticas de control presentadas.



# REFERENCIAS

- Adam, E. E., Jr and Ebert, R. J., 1986, «Production and Operations Management», *Concepts, Models, and Behaviour*, 3ª ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Allende, O., H., 2000, «Introducción al Software de Simulación Arena», Dept. de Informática, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Bonvik, A. M., Couch C. E., Gershwin S.B., 1998, «A comparison of production-line control mechanisms», *International Journal of Production Research*, N°25, 789-804.
- Crespo Franco, T., Velando Rodríguez, M. E., García Vázquez, J.M., 1998, «Alternativas para utilizar un sistema de control de la producción de tipo kanban», *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, Vol. 4, N° 1,1998, pp. 101-122.
- Cruz Lezama, Osáin. *Planificación y Control de Operaciones*. <<https://www.monografias.com/>>.
- Duenyas, I., 1994, «A simple release policy for networks of queues with controllable input» *Operations Research*, Vol. 42, N°6, 1162-1171.
- Espinosa, Fernando. *Identificación de sistemas de gestión para mantenimiento industrial*. <<https://www.researchgate.net/>>.
- Fishman, G., 1997, «Conceptos y Métodos de la Simulación Digital de Eventos Discretos», LIMUSA, México.
- Framiñán, J. M., Ruiz-Usano, R. y Leisten, R., 1998, «Sequencing CONWIP flow-shops: analysis and heuristics» *Discussion paper*, 15/98, Dept. of Business and Economics, University of Greifswald, Germany.
- Framiñán, J. M., Ruiz-Usano, R. y Leisten, R., 2000, «Input control and dispatching rules in a dynamic CONWIP flow-shop» *Discussion paper*, Int. J. Prod. Res., 2000, Vol.38, N°18, 4589-4598.
- Framiñán, J. M., González, P. L. y Ruiz-Usano, R., 2003, «The CONWIP production control system: Review and research issues», *Production Planning and Control*, N° 14, pp. 255-265.
- Gómez Rojo, B., 2006, «Logística de Retorno: Aplicación al caso de contenedores retornables», Universidad de Sevilla. PFC.
- Gstettner, S., y Khun, H., 1996, «Analysis of production control systems Kanban and CONWIP», *International Journal of Production Research*, N°34, pp. 3253-3274.
- Herer, Y. T., Masin M., 1997, «Mathematical programming formulation of CONWIP based production lines and relationships to MRP», *Internationa Journal of Production Reserch*, N°35, 1067-1076.
- Hopp Wallace, Spearman Mark, 1996, «Factory Physics Foundations of Manufacturing Management», Irwin Mc Graw Hill, Boston USA.
- Hopp, W. J. and Spearman, M. L., 1995, *Factory Physics*, Chicago, IL: Irwin.
- Kelton, W., D., Sadowski, R., P., Sturrock, D. T., 2008, «Simulación con Software Arena», 4ª Edición, Ed. McGraw-Hill, España.
- Matsuura, H., Kurosu, S., Lehtimaki, A., 1995, «Concepts, Practices and Expectations of MRP, JIT and OPT in Finland and Japan», *International Journal of Production Economics*, vol. 41, N° 1-3, pp. 267-272.
- Marek, Richard P., 2000, «Understanding Pull Systems», *unpublished Master's Thesis*, Dept. of Ind. Eng., Texas A&M Univ., College Station, TX, Dec., 2000.
- Marek, R. P., Elkins, D. A., Smith, D. R., 2001, «Understanding the fundamentals of Kanban and CONWIP pull systems using simulation, in: Winter Simulation Conference 2001», *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2001*, Vol.2, 921-929.
- Martins, P. G., F. P. Laugeni, 2005, «Administração da Produção» 2ª Edição, São Paulo: Saraiva.

- Monden, Yasuhiro, "What Makes the Toyota Production System Really Tick?" *Industrial Eng.*, Vol. 13(1), pp.36-46, Jan. 1981<sup>a</sup>
- Mora Barón, A., Tobar López, J., Soto Mejía, J. A., 2012, «Comparación y análisis de algunos sistemas de control de la producción tipo 'pull', mediante simulación», *Scientia et Technica*, N°51
- Pegden, C. Dennis, Robert E. Shannon, y Randall P. Sadowski, 1995, «Introduction to Simulation using SIMAN», 2<sup>a</sup> Ed., McGraw-Hill, Inc. Ohio.
- Plenert, G., Best, T. D., 1986, «MRP, JIT, and OPT: What's "Best"? », *Production and Inventory Management*, vol. 27, N° 2, pp. 22-29.
- Ptak, C. A., 1991, MRP, MRP II, OPT, JIT, and CIM. Sucesion, Evolution, or Necessary Combination, *Production and Inventory Management*, vol. 32, N° 2, pp. 7-11.
- Roderick, L. M., Philips, D. T. y Hogg, G. L., 1992, «A comparison of order release strategies in production control systems», *International Journal of Production Research*, 30, pp. 683-694.
- Schmidt, J. W., 1995, «Análisis y Simulación de Sistemas Industriales», TRILLAS, México.
- Spearman, M., Woodruff, D. and Hopp, W., 1990, «CONWIP: a pull alternative to kanban», *International Journal of Production Research*, N°28, 879-894.

