

# Trabajo Fin de Máster

## Organización Industrial y Gestión de Empresas

Simulación del control del flujo de materiales en  
sistemas de producción contra stock: evaluación de  
ROP, WLC y POLCA con Python/SimPy

Autor: Carlos Domínguez Parra

Tutor: Marcos Calle Suárez

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



Sevilla 2025





Trabajo Fin de Máster  
Organización Industrial y Gestión de Empresas

# **Simulación del control del flujo de materiales en sistemas de producción contra stock: evaluación de ROP, WLC y POLCA con Python/SimPy**

Autor:

Carlos Domínguez Parra

Tutor:

Marcos Calle Suárez

Profesor titular

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Máster: Simulación del control del flujo de materiales en sistemas de producción  
contra stock: evaluación de ROP, WLC y POLCA con Python/SimPy

Autor: Carlos Domínguez Parra

Tutor: Marcos Calle Suárez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

## Resumen

---

En este documento se analiza el impacto de diferentes métodos de control de pedidos elaborados en una planta de fabricación contra stock. El objetivo principal es encontrar el mejor método de control de dicha planta que se encuentra comprendida por trece estaciones de trabajo y diez productos diferentes que elaborar tomándose como referencia a la propuesta de Matthias Thüerer et al. (2025) a través de simulaciones de eventos discretos realizados en Python con el módulo de SimPy.

Se realizarán la simulación combinando el control de los tres niveles de la planta. La generación de pedidos con el punto de reorden, la liberación de pedidos con Workload Control y la autorización de trabajos en cada estación con las tarjetas POLCA.

Se irán explicando los diferentes cambios de paramétricas en la simulación para que finalmente evaluemos cuál de ellas puede considerarse la más óptima, para que se pueda establecer dichas mejoras en una planta real ahorrándose la experimentación de prueba y error.

## Abstract

---

In this document, the impact of different order control methods applied in a make-to-stock manufacturing plant is analyzed. The main objective is to identify the most effective control method for a plant composed of thirteen workstations and ten different products, taking as reference the proposal of Matthias Thüerer et al. (2025), through discrete-event simulations carried out in Python with the SimPy module.

The simulation is conducted by combining control at the three levels of the plant: order generation using the reorder point method, order release through Workload Control, and production authorization at each workstation using POLCA cards.

The different parameter variations tested in the simulation are explained in detail so that, in the end, it is possible to evaluate which configuration can be considered the most optimal. This allows for the identification of potential improvements that could be applied in a real plant, avoiding the need for trial-and-error experimentation.



# Índice

---

|                                                               |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Resumen</b>                                                | <b>vii</b>  |
| <b>Abstract</b>                                               | <b>viii</b> |
| <b>Índice</b>                                                 | <b>ix</b>   |
| <b>Índice de Tablas</b>                                       | <b>xi</b>   |
| <b>Índice de ilustraciones</b>                                | <b>xii</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                        | <b>1</b>    |
| <b>2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS</b>                           | <b>2</b>    |
| 2.1. Objetivo General                                         | 2           |
| 2.2. Objetivos Específicos                                    | 3           |
| <b>3. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN</b>           | <b>4</b>    |
| 3.1. Generación de pedidos                                    | 5           |
| 3.2. Liberalización de pedidos                                | 7           |
| 3.3. Autorización de producción.                              | 8           |
| 3.4. Sistemas de control de flujo de materiales considerados. | 9           |
| <b>4. GENERALIDADES DE PYTHON Y EL MÓDULO DE SIMPY</b>        | <b>10</b>   |
| 4.1. Python                                                   | 10          |
| Características de Python                                     | 10          |
| Funciones y métodos de Python.                                | 11          |
| 4.2. SimPy                                                    | 11          |
| Funciones principales de SimPy                                | 12          |
| <b>5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b>                            | <b>13</b>   |
| 5.1. Escenario simulado                                       | 13          |
| 5.2. Mecanismos de control aplicados                          | 16          |
| Generación de pedidos.                                        | 16          |
| Liberación de pedidos.                                        | 17          |
| Autorización de pedidos                                       | 18          |
| 5.3. Métricas de rendimiento                                  | 20          |
| <b>6. EXPERIMENTACIÓN</b>                                     | <b>21</b>   |
| 6.1. Primer escenario                                         | 21          |
| 6.2. Segundo escenario                                        | 24          |
| Impacto del factor de seguridad.                              | 24          |
| Impacto del punto de reorden.                                 | 25          |
| Impacto de tarjetas Polca.                                    | 25          |
| Impacto en el umbral del WLC.                                 | 26          |
| Elección de configuración.                                    | 26          |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>6.3. Tercer escenario</b>     | <b>33</b> |
| Impacto del factor de seguridad. | 34        |
| Impacto del punto de reorden.    | 34        |
| Impacto de tarjetas Polca.       | 34        |
| Impacto en el umbral del WLC.    | 35        |
| Elección de configuración.       | 35        |
| <b>6.4. Cuarto escenario</b>     | <b>40</b> |
| Pico de demanda del escenario 2  | 40        |
| Pico de demanda del escenario 3  | 41        |
| <b>7. CONCLUSIÓN</b>             | <b>46</b> |
| <b>8. REFERENCIAS</b>            | <b>47</b> |

## Índice de Tablas

---

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla 1: Estructuras de datos básica de Python .....</i>                                 | <i>10</i> |
| <i>Tabla 2: Funciones básicas utilizadas de Python en la simulación.....</i>                | <i>11</i> |
| <i>Tabla 3: Módulos utilizados de Python en la simulación.....</i>                          | <i>11</i> |
| <i>Tabla 4: Funciones utilizadas de SimPy en la simulación.....</i>                         | <i>12</i> |
| <i>Tabla 5: Tiempos de demanda y rutas de elaboración de cada producto.....</i>             | <i>13</i> |
| <i>Tabla 6: Distribución de tiempo de procesamiento de cada estación.....</i>               | <i>15</i> |
| <i>Tabla 7: Punto de reorden de cada producto dependiendo del factor de seguridad .....</i> | <i>17</i> |
| <i>Tabla 8: Resultados de simulación del primer escenario. ....</i>                         | <i>23</i> |
| <i>Tabla 9: Resultados de simulación del segundo escenario con FS=1.....</i>                | <i>29</i> |
| <i>Tabla 10: Resultados de simulación del segundo escenario con FS=0 .....</i>              | <i>30</i> |
| <i>Tabla 11: Resultados de simulación del tercer escenario con FS=1.....</i>                | <i>37</i> |
| <i>Tabla 12: Resultados de simulación del tercer escenario con FS=0.....</i>                | <i>38</i> |

## Índice de ilustraciones

---

|                                                                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Ilustración 1: Mapa de rutas de los productos por cada una de las estaciones</i>                                                 | <b>14</b> |
| <i>Ilustración 2: Diagrama simplificado de estaciones, buffers y controles de generación, liberación y autorización de pedidos.</i> | <b>19</b> |
| <i>Ilustración 3: Tiempo de espera de los pedidos para liberarse a planta, escenario 1</i>                                          | <b>23</b> |
| <i>Ilustración 4: Tiempo de espera de los pedidos para liberarse a planta, escenario 2, elección 1</i>                              | <b>31</b> |
| <i>Ilustración 5: Stock de productos terminados en almacén, escenario 2, elección 1</i>                                             | <b>31</b> |
| <i>Ilustración 6: Tiempo de espera de los pedidos para liberarse a planta, escenario 2, elección 2</i>                              | <b>32</b> |
| <i>Ilustración 7: Stock de productos terminados en almacén, escenario 2, elección 2</i>                                             | <b>32</b> |
| <i>Ilustración 8: Almacén productos terminados del escenario 3 SF:0; ROQ:1; WLC:9; POLCA:2</i>                                      | <b>39</b> |
| <i>Ilustración 9: Almacén productos terminados del escenario 3 SF:0; ROQ:1; WLC:9.5; POLCA:2</i>                                    | <b>39</b> |
| <i>Ilustración 10: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 20% durante 24 Horas</i>                                            | <b>43</b> |
| <i>Ilustración 11: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 20% durante 48 Horas</i>                                            | <b>43</b> |
| <i>Ilustración 12: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 30% durante 24 Horas</i>                                            | <b>43</b> |
| <i>Ilustración 13: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 30% durante 48 Horas</i>                                            | <b>43</b> |
| <i>Ilustración 14: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 50% durante 24 Horas</i>                                            | <b>44</b> |
| <i>Ilustración 15: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 50% durante 48 Horas</i>                                            | <b>44</b> |
| <i>Ilustración 16: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 20% durante 72 Horas</i>                                            | <b>44</b> |
| <i>Ilustración 17: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 20% durante 144 Horas</i>                                           | <b>44</b> |
| <i>Ilustración 18: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 30% durante 72 Horas</i>                                            | <b>45</b> |
| <i>Ilustración 19: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 30% durante 144 Horas</i>                                           | <b>45</b> |
| <i>Ilustración 20: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 50% durante 72 Horas</i>                                            | <b>45</b> |
| <i>Ilustración 21: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 50% durante 144 Horas</i>                                           | <b>45</b> |



# 1. INTRODUCCIÓN

---

En este trabajo se ha realizado un estudio de los diferentes controles que se pueden realizar en una planta de fabricación, basándonos en la propuesta de Matthias Thüerer et al (2025).

El objetivo principal es simular a través del módulo de SimPy de Python los eventos discretos en un sistema de liberación continua para una planta de fabricación contra stock, combinando distintos controles y evaluando su comportamiento.

Utilizaremos controles tanto en la generación de pedidos mediante el método del punto de reorden, en el método de liberación de pedidos a la planta con el Workload Control y finalmente en la autorización de cada estación de trabajo mediante las tarjetas POLCA.

Comprobaremos el impacto que sufrirá los pedidos demandados con diferentes parámetros y escenarios en cada uno de estos sistemas de control.

## **2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS**

---

La creciente competitividad de los mercados, impulsada por la globalización y el desarrollo tecnológico, obliga a las empresas a optimizar sus procesos productivos para responder con mayor rapidez y flexibilidad a la demanda de los clientes. En este contexto, los sistemas de producción contra stock (make-to-stock, MTS) requieren mecanismos de control del flujo de materiales que permitan equilibrar tres aspectos fundamentales: el nivel de servicio ofrecido al cliente, la eficiencia en planta y el nivel de inventario mantenido.

La literatura clásica ha estudiado métodos de control de manera aislada, como el punto de reorden (ROP), el Workload Control (WLC) o el sistema POLCA. Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que la combinación de estos métodos puede ofrecer mejores resultados, al actuar cada uno sobre diferentes métricas de rendimiento.

Este trabajo se justifica en la necesidad de probar, mediante simulación de eventos discretos en Python/SimPy, el comportamiento de un sistema integrado de control de flujo de materiales. Al reproducir una planta con diez productos y trece estaciones de trabajo, se busca ofrecer un marco de análisis que permita identificar trade-offs entre servicio, inventario y tiempos de producción, evitando los costes y riesgos asociados a la experimentación directa en planta.

### **2.1. Objetivo General**

Desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos en Python/SimPy para analizar el impacto de la aplicación conjunta de los métodos de control de flujo de materiales —ROP, WLC y POLCA— en un sistema de producción contra stock.

## 2.2. Objetivos Específicos

Realizar una revisión bibliográfica sobre los principales métodos de control de flujo de materiales (ROP, WLC, POLCA) y su aplicación en entornos industriales.

Implementar en Python/SimPy un modelo de simulación que reproduzca una planta de producción con diez productos y trece estaciones, parametrizada con datos industriales reales.

Incorporar al modelo las decisiones de control en los tres niveles:

- **Generación de pedidos:** punto de reorden con variación del *safety factor* y la cantidad de reorden.
- **Liberación de pedidos:** Workload Control con distintas normas de carga de trabajo.
- **Autorización de producción:** POLCA con diferentes números de tarjetas por bucle.

Diseñar y ejecutar un experimento factorial completo que evalúe el impacto de los parámetros de control sobre métricas clave: nivel de servicio, inventario de productos terminados, tiempos de producción y variabilidad de los plazos.

Analizar los resultados obtenidos, identificando los principales *trade-offs* entre servicio al cliente, eficiencia y niveles de inventario.

Proponer conclusiones y recomendaciones para la aplicación práctica de sistemas de control integrados en entornos industriales.



### **3. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

---

Los sistemas de producción son el conjunto de procesos y métodos que hacen que unos recursos lleguen a ser un producto final. El diseño y el control de estos sistemas de producción contribuyen en la eficiencia operativa de la organización industrial, con el fin de dar una respuesta al cliente y lograr una gran competitividad.

A lo largo de la evolución tecnológica, se ha ido creando diferentes tipos de sistemas de producción para poder controlar la producción dependiendo de la demanda y necesidades de cada sistema de producción, empezando con la producción en masa pasando a sistemas más adaptativos como la producción bajo pedido, la fabricación celular o la manufactura ágil.

Los sistemas de producción pueden ser de dos tipos.

- Sistema de fabricación bajo pedido (MTO Make to order). En este proceso la fabricación de la mercancía solo se ejecuta en el momento en que existe ya una demanda de un cliente, y se fabrica exclusivamente esas cantidades de producto. Con este sistema se ahorra en costes de las existencias de almacén, aunque los plazos de entrega suelen ser largos.
- Sistema de fabricación contra stock (MTS Make to Stock). En este proceso la fabricación se realiza previa a la demanda, y se generan unas existencias de mercancía que se entregarán al cliente en cuanto se genera el pedido. Este método mejora los plazos de entrega, pero es necesario un método de control eficiente y específico.

En este proyecto nos centraremos en este segundo enfoque y diseñaremos el control del flujo de materiales.

El control del flujo de materiales (CFM) tiene como objetivo saber cuándo se puede avanzar en ciertas etapas del ciclo de fabricación, las cuales se pueden subdividir en

tres tareas independientes que se ejecutan dependiendo del avance de los pedidos en el sistema.

- Generación de pedidos
- Liberalización de pedidos
- Autorización de producción.

Por lo general, los métodos diseñados para el control de flujos de materiales tienen solo una de las tareas anteriores implementadas, lo que deja una gran parte del flujo sin controlar.

A continuación, explicaremos con términos generales cada uno de estas tareas independientes junto a algunos ejemplos.

### **3.1. Generación de pedidos**

La generación de pedidos es el proceso de control del orden, la cantidad y el momento de fabricación de los pedidos a partir de la demanda, planificación o pedidos de clientes de cada instante.

Existen diferentes métodos del control de la generación de pedidos que serán más adecuados dependiendo de la planta de fabricación que tengamos, de los cuales los más destacados son:

**Material Requirements Planning o MRP.** Este es el método de fabricación más destacado desarrollado originariamente para productos complejos con lista de materiales para su ensamblaje (Orlicky, 1975).

Consiste en realizar el cálculo de cuando fabricar o comprar cada componente, cuántas unidades se necesitan y el tiempo pronosticado (Silver, Pyke, & Peterson, 1998). Este método es un clásico que puede generar niveles altos de WIP (productos que a tiempo real se encuentra en elaboración en la planta de fabricación) si no se

alcanza el progreso de fabricación pronosticado o si la demanda cambia (Hopp & Spearman, 2008).

**Manufacturing Resource Planning o MRP II.** Es una extensión del método anterior incluyendo al control de procesos externos como los recursos humanos disponibles, la maquinaria o coste asociados (Sum, C. C., & Yang, K. K., 1993).

**Just-In-Time o JIT.** Es el método de control de generación de pedidos a partir de la demanda real de la fábrica, se utiliza en el sistema de fabricación anteriormente nombrado bajo pedido. En otras palabras, solo se producirá cuando el cliente lo requiere (García-Cutrín, J., & Rodríguez-García, C., 2024).

Este método reducirá al máximo la cantidad de inventario, pero exigirá una alta coordinación con flujo constante y proveedores fiables.

**Punto de reorden o ROP.** Se establecerá el control a través del nivel de inventario que existe de los productos terminados. Si se reduce esta cantidad de inventario al nivel predeterminado, se dará la orden de volver a producir (Silver et al., 1998).

El aspecto crítico de este método es preestablecer este inventario de seguridad. Tiene como ventaja la simplicidad del proceso siendo muy útil para los productos estándar, mientras que es inflexible a cambios bruscos que podamos encontrar en la demanda.

Su desarrollo más crítico es determinar el nivel de inventario de seguridad (Radăşanu, A. C., 2017).

**Kanban.** Se estableció gracias al éxito del sistema de producción de Toyota y se encuentra ligado al sistema del punto de reorden. Cada producto se asociará a una tarjeta llamada Kanban desde su entrada en el sistema de producción hasta la salida del inventario de productos terminados. Por lo tanto, en el momento de que el producto se venda, esta tarjeta quedará liberada para que se inicie otro producto a fabricarse. Este número de tarjetas será limitado dependiendo de las especificaciones

de la demanda y la planta de fabricación y genera una cantidad máxima de productos terminados en stock.

La ventaja de este método es que es visual, ágil y adaptable al consumo real (Mojarro-Magaña, M et al., 2018).

### **3.2. Liberalización de pedidos**

La liberalización de pedidos es el sistema de control de envío de un pedido a la planta de fabricación, es decir, la orden para que un pedido pasa a ejecutarse su fabricación, ya que no todos los pedidos deben de liberalizarse al instante sino se quiere una saturación de los sistemas.

Se implementarán este sistema para controlar el WIP, para mejorar el cumplimiento de plazos, para reducir los tiempos de espera y para como hemos dicho antes, evitar la saturación de las estaciones de fabricación.

Para este tipo de métodos, también existen varias maneras de implementarse dependiendo de las necesidades de la planta de fabricación. Entre los más destacados se encuentran.

**Liberación por fecha de vencimiento.** Este método se utiliza para intentar reducir al máximo la espera de los clientes al existir demanda alta, ya que se prioritariamente se liberan los pedidos con menos fecha de entrega de la mercancía. Sin embargo, este método no regulariza el WIP, ni las estaciones de trabajo (Lödding, H., 2013).

**ConWIP.** La forma de control se basa en limitar el número de órdenes que existe en el taller comparando la entrada y la salida, evitando excesos de WIP en la fábrica (Ryan, S. M., & Choobineh, F., 2003).

**DBR (Drum-Buffer-Rope).** El DBR liberaliza los pedidos teniendo en cuenta los cuellos de botella que se pueden generar en las colas de entradas de las estaciones, evitando en este caso que no haya maquinaria saturada, ni maquinaria sin uso (Bokor, B. et al., 2024).

**Load-Oriented Order Release o LOOR.** Es un método de control de carga en el que se calcula previo al lanzamiento del pedido la carga total que se encuentra proyectada en cada estación. Si esta no supera a la carga nominal de la planta se lanzará el pedido (Yan, H. et al., 2016).

**COBACABANA.** Cada producto se asocia a una tarjeta al liberarse el pedido en la planta de fabricación y esta tarjeta no quedará libre y se podrá reutilizar hasta que este producto quede completamente terminado (Thürer, M. et al., 2015).

### **3.3. Autorización de producción.**

Una vez liberalizados los pedidos en la planta de producción, los productos pueden pasar por diferentes procesos o estaciones que elaboran un trabajo de transformación en el producto. A su vez, cada una de estas estaciones, dependiendo del tiempo de ejecución del trabajo, tendrá un tiempo de espera para poder ejecutarse este proceso en cada producto. Esta entrada en la estación puede ser automática, o puede estar también controlada. A este control se le llama Autorización de producción, y podrá haber tantos controles como estaciones de trabajo existan en la planta.

Los métodos de control de autorización de producción más relevantes son los siguientes:

**Polcan (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization).** Se utilizan bucles de tarjetas para cada dos estaciones, controlar la saturación de la siguiente estación y evitar un buffer elevado. Este sistema sirve para asegurarse que los pedidos avancen a una nueva estación solo si es viable (Thürer, M. et al., 2016).

**DEWIP (Decentralized Work-In-Process).** Sistema basado en el Polca, en vez de utilizar las tarjetas para cada dos estaciones, comprueba el WIP total que tiene la siguiente estación (Lödding, H., 2003).

### **3.4. Sistemas de control de flujo de materiales considerados.**

De los métodos anteriormente nombrado, para este trabajo se van a considerar un sistema de fabricación contra stock (MTS) con los tres sistemas de control anteriormente nombrados.

Para el control de generación de pedidos, se empleará el método de punto de reorden al ser uno de los más utilizados, teniéndose en cuenta una cantidad de stock determinado para tomar la decisión de lanzar la generación de fabricación.

Para el control de liberación de pedidos, se empleará el método de control de control de trabajo que coordinará la carga de trabajo y la capacidad.

Y para el control de la autorización de producción, se utilizará el método Polca con diferentes cantidades de tarjetas en bucle para cada par de estaciones.

Los métodos elegidos son los empleados en el artículo, el cual indica que la combinación fue completamente arbitraria.

## 4. GENERALIDADES DE PYTHON Y EL MÓDULO DE SIMPY

### 4.1. Python

El lenguaje de programación Python es un código abierto dinámico y multiplataforma creado a finales de los años ochenta y que actualmente es de los más populares como herramienta para el mundo académico, científico e industrial y que ha ganado una enorme popularidad por la sintaxis clara y su amplia biblioteca.

El nombre proviene de la afición de su creador Guido van Rossum por los humoristas británicos Monty Python.

Para el modelo de simulación que se desarrollará en este trabajo, se ha elegido este lenguaje de programación por su sintaxis clara y legible, por su modularidad, por su ecosistema científico y su amplia posibilidad de experimentación.

#### Características de Python

Antes de explicar la estructura del simulador, se debe de mencionar ciertas estructuras básicas del lenguaje para representar y manejar datos simples, cadenas de texto, lista o diccionarios.

Son útiles para gestionar los eventos en las simulaciones. Cada uno de ellos puede ser mutable o inmutable, refiriéndose a la capacidad de poder cambiarse estos valores guardados después de haberse creado.

Las principales utilizadas en nuestras simulaciones son las indicadas en la siguiente tabla.

| Tipo        | Sintaxis | Ejemplo                        | ¿Mutable? |
|-------------|----------|--------------------------------|-----------|
| Lista       | []       | dias = ["lu", "ma", "mi"]      | Sí        |
| Tupla       | ()       | p = (id, ruta)                 | No        |
| Diccionario | {}       | m = {"M1": [0.72, 'Madrid']}   | Sí        |
| Cadena      | ""       | Cadenas=["cadena1", "cadena2"] | No        |

Tabla 1: Estructuras de datos básica de Python

## Funciones y métodos de Python.

Uno de los motivos de elegir programar en Python, son las funciones integradas que tiene el lenguaje, lo que logra una programación estructurada y legible. Estas funciones permiten agrupar tareas evitando repeticiones de código.

Las utilidades más importantes del código que hemos desarrollado para la simulación son las siguientes:

- Funciones built-in. Son herramientas que dan eficiencia en tareas comunes de la programación, como calcular el tamaño, sumar, u obtener valores máximos o mínimos, funciones que redondea decimales...

**Funciones Built-in**

|         |         |             |        |
|---------|---------|-------------|--------|
| len ()  | sum()   | min()       | max()  |
| round() | any()   | all()       | help() |
| id()    | bool()  | print()     | list() |
| range() | set()   | enumerate() | zip()  |
| int()   | float() | any()       | dict() |

*Tabla 2: Funciones básicas utilizadas de Python en la simulación*

- Módulos estándar utilizados. Los módulos son archivos con código ya establecido que se pueden importar para utilizar. Algunos de los utilizados en las simulaciones sirven para la obtención de valores aleatorios, realizar operaciones matemáticas, definir estructuras de datos, ...

**Módulos estándar**

|       |            |                   |             |
|-------|------------|-------------------|-------------|
| simpy | numpy (np) | Matplotlib.pyplot | pandas (pd) |
|-------|------------|-------------------|-------------|

*Tabla 3: Módulos utilizados de Python en la simulación*

## 4.2. SimPy

Para las simulaciones que vamos a realizar de eventos discretos en Python, utilizaremos una librería llamada Simpy específica para estos tipos de eventos. Esta librería se encarga de procesar simulaciones pasando de evento a evento, como “llega



material”, “la estación queda libre”, ... Se van a desarrollar acciones como la de esperar un tiempo determinado, o la de esperar a que la máquina esté disponible, y la librería SimPy, accionará el siguiente evento cuando detecte que la acción ha ocurrido. En pocas palabras, el programa pausa, reanuda y reproduce escenarios contantemente en el tiempo de simulación.

Su principal motivo de utilización del mismo porque permite representar el comportamiento temporalmente de manera sencilla y flexible utilizando el propio lenguaje de Python.

### **Funciones principales de SimPy**

Algunas de las funciones principales que hemos utilizado en las simulaciones son las siguiente:

|                     |                                                                                                                                                   |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| environment()       | Coordina los eventos y controla el tiempo de simulación. Puede controlar cuando queremos que cada evento ocurra y como relacionarlos entre ellos. |
| env.run(until=...)  | Es la función que determina el tiempo de simulación que se va a desarrollar.                                                                      |
| env.process()       | Ejecuta un proceso dentro del entorno simulado, como un pedido o una máquina                                                                      |
| yield env.timeout() | Suspende temporalmente la simulación hasta que ocurra un evento específico.                                                                       |
| resource()          | Controla el acceso a recursos limitados con unas capacidades definidas                                                                            |
| request()           | Solicita acceso a un evento, y si esté no está permitido porque sobrepasa sus capacidades, espera en la cola de acceso.                           |
| store()             | Genera una cola de espera para acceso a los eventos en orden de llegada.                                                                          |
| filterStore()       | Genera otra variante de cola que va saliendo de la misma según cierta condición.                                                                  |
| container()         | Genera un almacén numérico.                                                                                                                       |
| get() / put()       | Usadas para añadir o retirar unidades de las colas o almacenes                                                                                    |

*Tabla 4: Funciones utilizadas de SimPy en la simulación*

## 5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 5.1. Escenario simulado

El estudio se realiza en una planta de fabricación contra stock, por lo tanto, la demanda se atiende a través de los productos ya terminados y disponibles en el almacén.

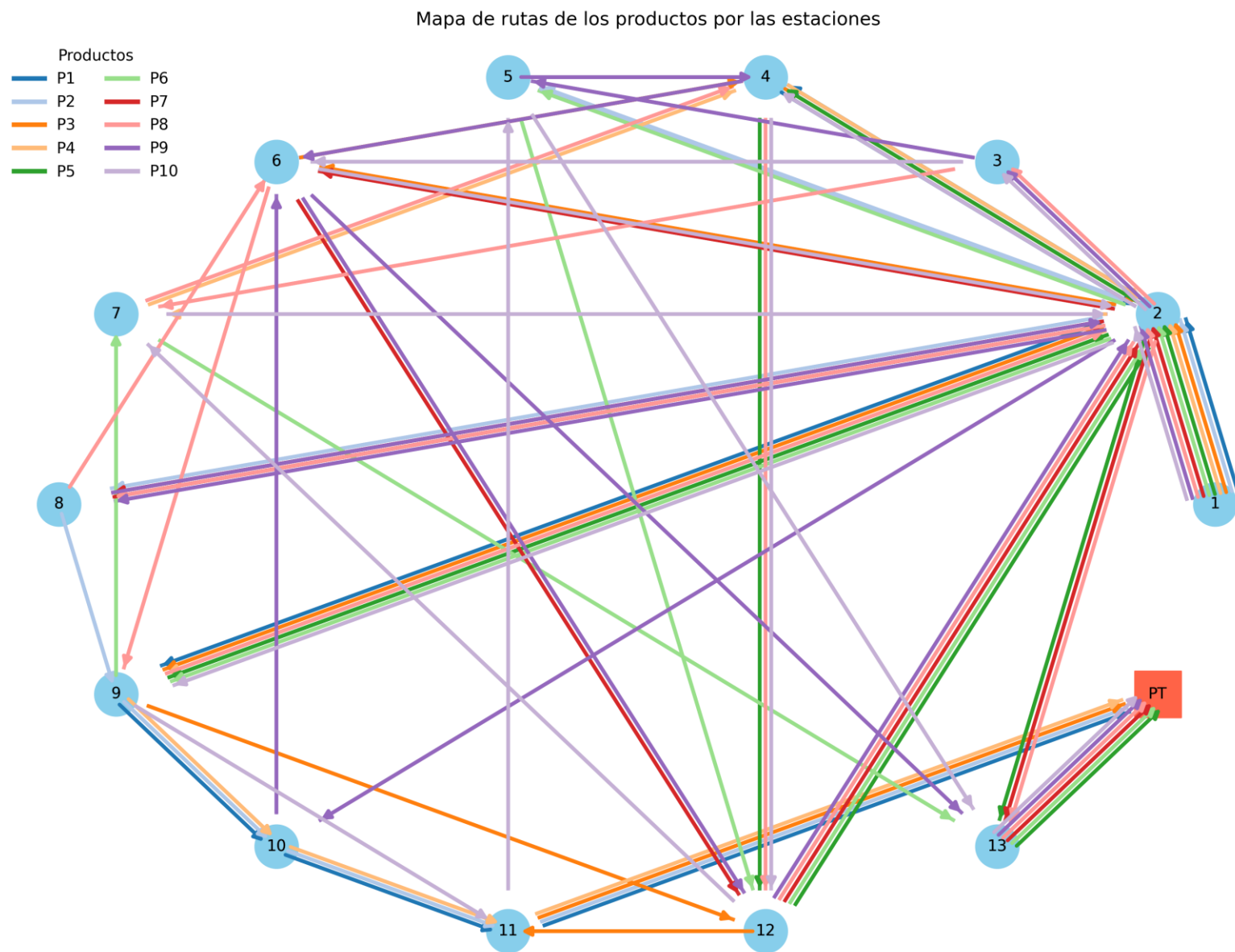
Se disponen de 10 productos diferentes que se elaboran en la misma planta de fabricación. Cada producto se ha otorgado una distribución de llegada de su demanda, siendo esta una distribución Gamma o Uniforme.

La planta de fabricación tendrá una cantidad de 13 estaciones de trabajo distintas entre ellas, las cuales van a ir pasando los productos para su elaboración. Cada una de estas estaciones tendrá una capacidad de un solo producto.

En la tabla 5 se muestra la distribución de llegada de la demanda y la ruta de estaciones de cada uno de los productos para su fabricación, la cual no es lineal, sino en red, pudiéndose repetir la estación. Representamos en la ilustración 1 un esquema visual de cómo se podría contemplar las rutas en la planta de fabricación con un color para cada producto y finalizando todas en el almacén con los productos terminados (PT)

| Productos | Tiempos de demanda                      | Ruta de elaboración                      |
|-----------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| 1         | Erlang 3 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 4, 2, 9, 10, 11                    |
| 2         | Erlang 2 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 5, 2, 8, 9, 10, 11                 |
| 3         | Uniforme [5, 15] ; Media 10 u.d. tiempo | 1, 2, 6, 4, 2, 9, 12, 11                 |
| 4         | Erlang 3 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 7, 4, 2, 9, 10, 11                 |
| 5         | Erlang 4 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 4, 12, 2, 9, 2, 13                 |
| 6         | Erlang 2 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 5, 12, 2, 9, 7, 13                 |
| 7         | Erlang 4 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 6, 12, 2, 8, 2, 13                 |
| 8         | Uniforme [5, 15] ; Media 10 u.d. tiempo | 1, 2, 3, 7, 4, 12, 2, 8, 6, 9, 2, 13     |
| 9         | Erlang 4 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 3, 5, 4, 6, 12, 2, 8, 2, 10, 6, 13 |
| 10        | Erlang 2 ; Media 10 u.d. tiempo         | 1, 2, 3, 6, 2, 4, 12, 7, 2, 9, 11, 5, 13 |

Tabla 5: Tiempos de demanda y rutas de elaboración de cada producto



*Ilustración 1: Mapa de rutas de los productos por cada una de las estaciones*

Cada una de las estaciones de la planta realizan distintos trabajos sobre el producto, por lo que cada uno de ellos van a tener una distribución Gamma con parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  distintos que determinará la variabilidad del tiempo de procesamiento de cada uno de los procesos. Estos valores se muestran en la tabla 6.

| Productos | Distribución del tiempo de procesamiento |
|-----------|------------------------------------------|
| 1         | Gamma: $\alpha=3$ , $\beta= 0,26$        |
| 2         | Gamma: $\alpha =3$ , $\beta= 0,12$       |
| 3         | Gamma: $\alpha =2$ , $\beta= 1,33$       |
| 4         | Gamma: $\alpha =1$ , $\beta= 1,06$       |
| 5         | Gamma: $\alpha =3$ , $\beta= 0,67$       |
| 6         | Gamma: $\alpha =4$ , $\beta= 0,35$       |
| 7         | Gamma: $\alpha =3$ , $\beta= 0,59$       |
| 8         | Gamma: $\alpha =3$ , $\beta= 0,63$       |
| 9         | Gamma: $\alpha =2$ , $\beta= 0,59$       |
| 10        | Gamma: $\alpha =3$ , $\beta= 0,60$       |
| 11        | Gamma: $\alpha =1$ , $\beta= 1,44$       |
| 12        | Gamma: $\alpha =4$ , $\beta= 0,29$       |
| 13        | Gamma: $\alpha =3$ , $\beta= 0,48$       |

*Tabla 6: Distribución de tiempo de procesamiento de cada estación*

Todos los valores anteriores se toman del artículo académico de Fredendall et al (2010) de un ejemplo industrial observado.

Vamos a despreciar el tiempo de transporte de los productos entre las distintas estaciones, y el transporte al almacén de productos terminados. También indicamos que se aceptan todas las ventas y que se atiende directamente del inventario de productos terminados. Las demandas que no se han podido satisfacer por escasez de existencias, quedarán a la espera en una lista de backorder y pendientes de que se reponga el inventario. A pesar de que existe un cliente en espera de mercancía terminada, no pararán de llegar otros clientes solicitando otro producto o el mismo que no existe stock, lo que provocará una cola de cliente pendientes de satisfacer.

Las simulaciones se desarrollarán con lenguaje Python con el módulo de SimPy a diferencia del artículo que se ha elaborado en el software por bloques de simulación ARENA. Cada escenario se simula como precalentamiento durante unas 500 unidades de tiempo, para que los valores puedan estabilizarse, y posteriormente se

simula durante unas 2.000 unidades de tiempo que será cuando se recojan los valores finales.

## **5.2. Mecanismos de control aplicados**

Para el control de esta simulación de planta de fabricación, hemos incorporado los 3 métodos de control del flujo de materiales que ya hemos mencionado y explicado anteriormente.

### **Generación de pedidos.**

Para la generación de los pedidos a la planta de fabricación de los productos, ejecutaremos un control de punto de reorden (ROP).

Se considerarán dos niveles de factor de seguridad (FS). Un FS igual a 0, indicando que no existirá un stock de seguridad suficiente para ir satisfaciendo la demanda hasta que se elaboren más producto terminado y que por lo tanto el punto de reorden será igual a la demanda durante el tiempo de reposición. Y un factor igual a 1 donde si tendrá una cantidad de stock de seguridad para el lanzamiento de los pedidos a fábrica.

Los niveles de stock de seguridad se calcularán con la siguiente fórmula.

$$SSL = SF * \sqrt{TRP * \sigma_D^2 + D^2 * \sigma_{TRP}^2}$$

Teniendo en cuenta los valores de la demanda media de los productos (D), los valores de la desviación estándar de la demanda por periodo ( $\sigma_D$ ), el tiempo de reposición (TRP) y la desviación estándar del tiempo de reposición ( $\sigma_{TRP}$ ) se obtuvieron según el artículo en simulaciones preliminares para cada producto en escenarios donde todos los pedidos se liberaba y se autorizaban inmediatamente sin control. Finalmente se obtiene un punto de reorden ya redondeado para cada producto que se ha usado en la generación de los pedidos. Estos valores se resumen en la siguiente tabla 7.

|                                          | Productos |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                          | FS        | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| <b>Punto de reorden (ROQ)</b>            | 0         | 2.6 | 3.2 | 2.9 | 3.0 | 2.8 | 3.3 | 2.3 | 4.6 | 4.5 | 5.2 |
|                                          | 1         | 4.1 | 5.0 | 4.2 | 4.4 | 4.3 | 5.0 | 3.4 | 6.0 | 6.1 | 7.3 |
| <b>Punto de reorden redondeado (ROQ)</b> | 0         | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 2   | 5   | 5   | 5   |
|                                          | 1         | 4   | 5   | 4   | 4   | 4   | 5   | 3   | 6   | 6   | 7   |

Tabla 7: Punto de reorden de cada producto dependiendo del factor de seguridad

Además, se probarán dos niveles de punto de reorden: 1 y 5. Siendo estos los valores de productos que se generan como pedidos para su fabricación. Lo indicado no quiere decir que se generen una orden con 5 unidades de productos que se vayan a fabricar al mismo tiempo, sino que son 5 órdenes para fabricar unidades de productos, ya que recordamos que se ha determinado que las estaciones de trabajo solo pueden procesar los productos individualmente.

#### **Liberación de pedidos.**

Una vez se genera el pedido, los productos no empezarán a fabricarse directamente en la primera estación, sino que van a pasar por un control de liberación de pedidos.

El proceso de control realizará una sumatoria de los tiempos de procesamiento esperados de cada estación de todos los productos que ya han sido liberados y que aún no hayan pasado por cada una de ellas, independientemente de que esté ya en la cola de la estación o no, más el tiempo de procesamiento del pedido que quiere ser liberado ( $W_s$ ). Si el trabajo en cada estación es igual o menor al límite que estableceremos inicialmente ( $N_s$ ), el pedido se liberará y comenzará a fabricarse la pieza. Si la suma es superior a este límite, el pedido continuará retenido.

Como los tiempos de fabricación en cada estación son aleatorios al tratarse de una simulación, procederemos a utilizar la media de la Gamma de cada una de las estaciones de la Tabla 6.

$$W_s + \frac{\hat{p}_{ij}}{i} \leq N_s$$

El artículo indica que el umbral ( $N_s$ ) más estricto que se utilizará será de 3.5 unidades de tiempo y que se irá incrementando gradualmente 1.15 unidades, realizando la experimentación con 3.5, 4, 4.6, 5.3 y 6.1

### **Autorización de pedidos**

Una vez los pedidos se hayan liberado, van a ir entrando en las estaciones vacías que correspondan a sus rutas, o se irán acumulando en los buffers de cada estación.

Lo que se pretende en este control será limitar la cantidad de productos en espera de cada estación utilizando las tarjetas POLCA. Por lo tanto, hasta que en una estación no haya una tarjeta Polca libre, el producto no va a poder entrar en el buffer de la siguiente estación.

Si un producto termina de procesarse en la estación 1 y debe pasar a la estación 2, pero en ella aún no tiene tarjetas libres, quedará en espera en la estación 1. En este caso tampoco liberará la tarjeta de la estación 1 hasta que salga de la misma, ni comenzará a procesar el siguiente producto con tarjeta.

El control limitará el WIP local de cada estación.

El número de tarjetas de cada estación según la experimentación realizada en el artículo serán de 4, 6, 8 y 10 tarjeta en las simulaciones.

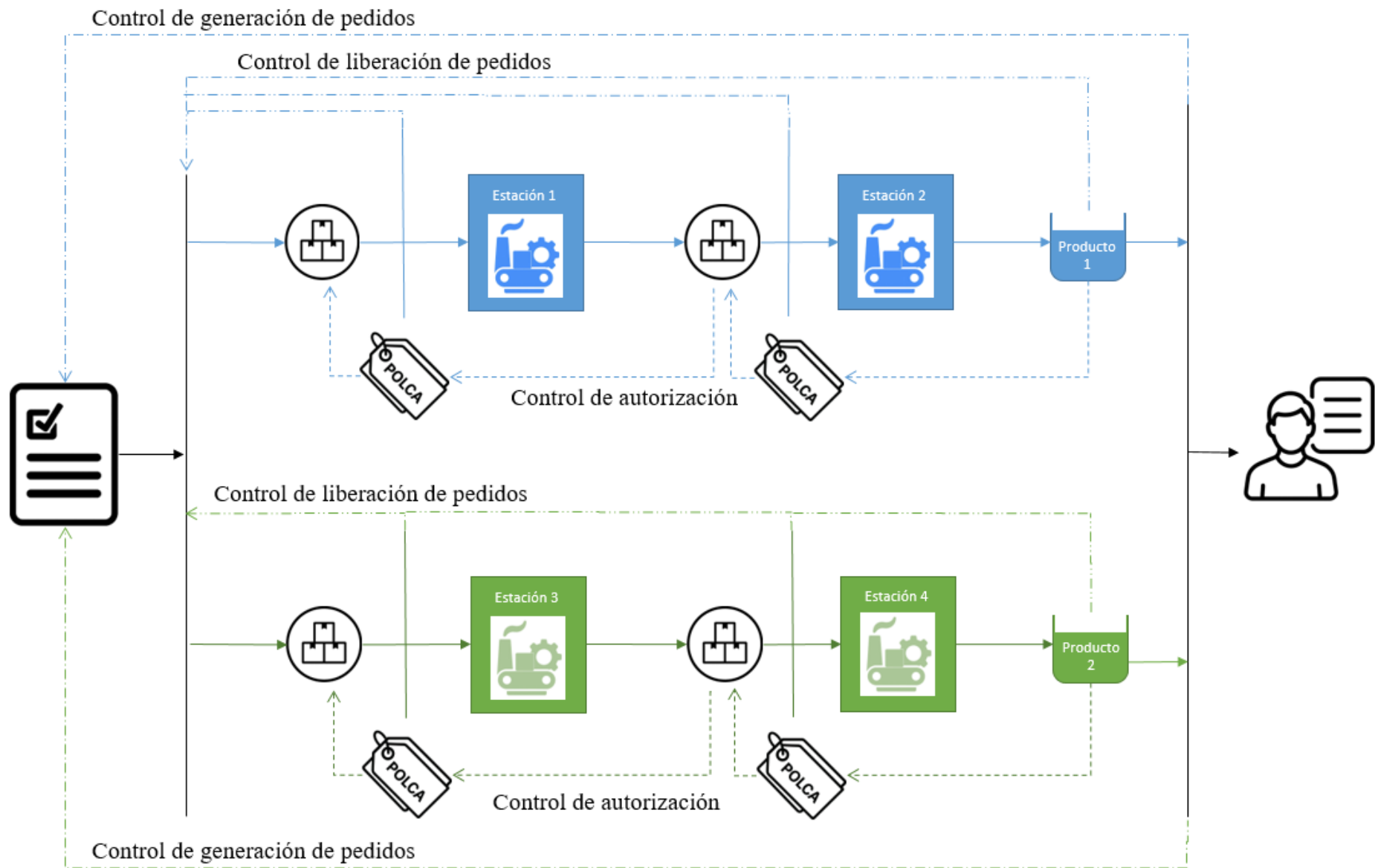


Ilustración 2: Diagrama simplificado de estaciones, buffers y controles de generación, liberación y autorización de pedidos.



### 5.3. Métricas de rendimiento

En este apartado presentamos la forma empleada para poder cuantificar el comportamiento de las diferentes simulaciones que se han realizado.

Gracias a ellas, podremos analizar datos claves como la satisfacción del servicio al cliente, eficiencias en el sistema de producción y estabilidad del tiempo de procesamiento.

- Demanda satisfecha inmediata (DS): El porcentaje de pedidos satisfechos directamente con el stock del inventario de productos terminados, sin necesidad de que el cliente tenga que esperar a la fabricación del producto.
- Tiempo de espera de cliente (TEC): Tiempo medio de espera de los clientes al entrar su pedido en el backorder.
- Inventario medio (IM): El nivel medio de stock de productos terminados durante la simulación
- Pedidos en fabricación (WIP): La media de los productos que se encuentra procesándose en la fábrica.
- Pedidos retenidos (PR): La media de pedidos haciendo cola antes de poder liberarse y fabricarse.
- Nivel medio de Buffer (NB): La media de los productos esperando en las colas de las estaciones.
- Tiempo fabricación (TF): Tiempo medio de fabricación de los productos, desde que el pedido es liberado y entra a la planta, hasta que el producto ha terminado de fabricarse
- Tiempo pedido (TP): Tiempo medio del pedido, desde que se genera el pedido, hasta que el producto queda terminado, pasando por la liberación del mismo.
- Desviación estándar pedido (DP): La desviación estándar del tiempo de pedidos, el cual mide cuanto varia los tiempos totales entre un pedido y otro.

## 6. EXPERIMENTACIÓN

---

Una vez definido el modelo y parámetros de la simulación, procedemos a la explicación de los diferentes escenarios que se han pensado para el estudio, junto a los resultados de los mismos.

### 6.1. Primer escenario

Para el primer escenario utilizaremos los mismos parámetros que aparece en la publicación.

Tras realizar diferentes simulaciones, se ha observado que los parámetros del umbral (Ns) del control de liberación de pedidos que se compara con el tiempo de procesamiento de cada estación, son valores muy pequeños. Esto está provocando que cada vez tarde más en liberarse los pedidos, además de que el WIP de la planta sea muy pequeño y por lo tanto las estaciones se encuentran siempre ociosas.

El tiempo de fabricación es el más bajo que podemos encontrarnos ya que las maquinarias casi nunca tienen cola, pero al tener un volumen de fabricación tan bajo, el stock de los productos cae a 0, y cada vez los clientes esperarán más en recibir lo que demandaron.

Tras realizar los diferentes ensayos, el resultado de la simulación se muestra en la tabla 8, y se debe de mencionar que solo se ha hecho la simulación con la cantidad de polca 10, ya que como se observa en el nivel medio de buffer (NB) no llega a tener ni una tarjeta polca de media durante la simulación, lo que significa que obtuvimos los mismos resultados para las diferentes cantidades de tarjetas.

Con los diferentes valores elegidos para experimentar con ellos, el mejor resultado obtenido son los siguientes:

$$WLC = 6.1 ; Polca = 10 ; ROQ = 1 ; SF = 1$$

Y añadiremos la ilustración 3 para que se pueda comprobar a simple vista la inestabilidad que tiene la planta con estos valores. Se observa cómo va aumentando el tiempo de espera para liberarse los pedidos a medida que va ejecutando. Por lo tanto, la simulación no es aceptable, pues crece hasta el infinito.

Habría que buscar un ritmo de llegada crítico que no haga que sature la planta. Este valor será el mismo que la máxima capacidad que tiene la planta de fabricación.

|     |       | Factor Satisfacción = 1 |       |     |     |        |     |      |       |       |        |        |    |        |        |        |        |        |        |
|-----|-------|-------------------------|-------|-----|-----|--------|-----|------|-------|-------|--------|--------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     |       | ROQ =1                  |       |     |     |        |     |      |       |       | ROQ =5 |        |    |        |        |        |        |        |        |
| WLC | POLCA | DS                      | TEC   | IM  | WIP | PR     | NB  | TF   | TP    | DP    | DS     | TEC    | IM | WIP    | PR     | NB     | TF     | TP     | DP     |
| 3,5 | 10    | 4%                      | 840,3 | 0,0 | 2,4 | 1087,8 | 0,0 | 9,8  | 407,1 | 626,3 | 4%     | 1004   | 0  | 1,7446 | 1206,2 | 0,0052 | 10,103 | 743,23 | 738,27 |
| 4   | 10    | 5%                      | 814,3 | 0,0 | 3,1 | 1022,0 | 0,0 | 10,3 | 460,1 | 639,8 | 5%     | 923,97 | 0  | 2,2942 | 1162,8 | 0,0132 | 10,766 | 698,1  | 695,09 |
| 4,6 | 10    | 5%                      | 734,5 | 0,0 | 4,2 | 919,0  | 0,0 | 11,1 | 529,0 | 598,3 | 5%     | 837,27 | 0  | 3,0232 | 1042,3 | 0,0246 | 11,368 | 701,44 | 639,85 |
| 5,3 | 10    | 5%                      | 676,3 | 0,0 | 4,5 | 846,3  | 0,0 | 11,4 | 479,5 | 589,9 | 5%     | 839,44 | 0  | 3,2802 | 1044,5 | 0,0311 | 11,319 | 663,91 | 631,49 |
| 6,1 | 10    | 7%                      | 579,5 | 0,0 | 6,2 | 718,4  | 0,1 | 12,5 | 467,8 | 517,2 | 6%     | 724,12 | 0  | 4,742  | 891,4  | 0,0727 | 12,732 | 622,44 | 553,51 |

Tabla 8: Resultados de simulación del primer escenario.

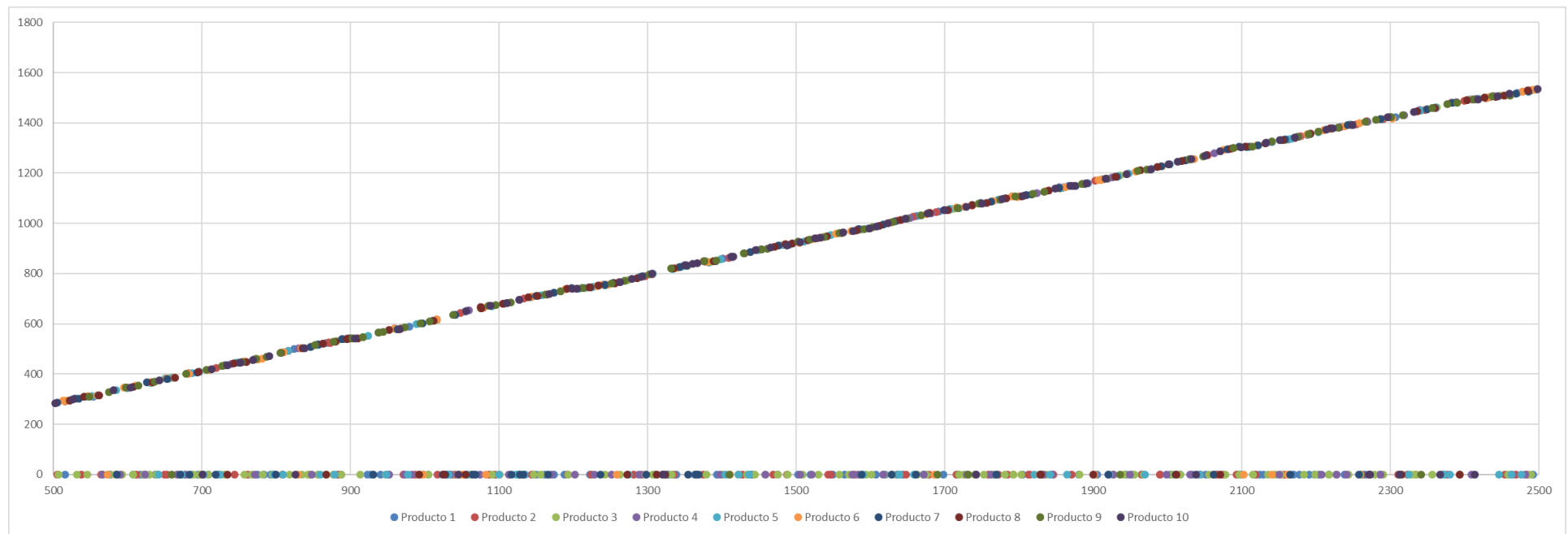


Ilustración 3: Tiempo de espera de los pedidos para liberarse a planta, escenario 1

## **6.2. Segundo escenario**

El segundo escenario de simulaciones se realiza modificando el valor del umbral para el control de la liberación de los pedidos en la planta de fabricación.

Por lo tanto, para este caso utilizaremos los valores de 25, 27, 30, 33 y 35 unidades de tiempo.

Tras realizar las primeras comprobaciones, y debido a la cantidad de estaciones que hay ocupadas en el mismo momento durante el tiempo de simulación, y al tiempo relativamente bajo que se tarda en procesar las piezas, hemos tenido que reducir también la cantidad de tarjetas polca que utilizaremos en la simulación, ya que con una cantidad de 10 y 8, la media de los resultados era idénticos y esto señalaba que no estaba generando limitaciones en el control de los buffers.

Por ese motivo, realizamos las simulaciones con la cantidad de 6, 4, 2 y 1 tarjeta Polca.

El resto de los valores de la simulación la mantendremos iguales.

Tras las simulaciones se obtienen los datos que reflejamos en la tabla 9 que son los correspondientes a aquellas con el factor de seguridad igual a 1, y la tabla 10 que son los resultados con el factor de seguridad igual a 0. Las tablas se dividen en dos bloques verticales para la experimentación con la cantidad de pedido que se ejecuta (1 y 5) y en cada una de ellas tiene la misma secuencia de las 9 métricas ya explicadas. A su vez, la tabla se divide en 4 grandes bloques horizontales dependiendo de la cantidad de tarjetas polca utilizadas, y en cada una de ellas tiene la misma secuencia de 5 valores de unidad de tiempo de liberación de pedidos.

### **Impacto del factor de seguridad.**

Recordemos que la variación del factor de seguridad hace que tengamos o no una cantidad de productos terminados suficiente para satisfacer la demanda mientras que se van fabricando los nuevos productos.

Por lo tanto y como es evidente en los resultados, cuando tenemos el FS igual a 1

al tener una mayor cantidad de inventario preventivo tiene un mejor nivel de servicio. Aunque estos valores harán que tenga la empresa un mayor costo de inventario.

Sin embargo, con el FS igual a 0 existirá una mayor cantidad de insatisfacción de los clientes al tener que esperar para que le entreguen el pedido.

### **Impacto del punto de reorden.**

Con respecto a la variación del punto de reorden, este es el valor que más ha producido variación en los resultados, siendo evidente que la producción y satisfacción de la demanda es mejor cuando se realizan los pedidos de 1 en 1, y no de 5 en 5, generando en esta opción un “efecto látigo” de problemas hasta el colapso del sistema.

Un valor de ROQ igual a 5 es inviable con el sistema FIFO que tenemos en la liberación de pedidos, ya que va a estar un tiempo liberando siempre el mismo producto y saturando la misma ruta de estaciones, haciendo que el resto de las estaciones por la que no pase la fabricación de este producto queden ociosas. Y a consecuencia de todo esto provocará que los inventarios de los otros productos lleguen a 0 y estén más tiempo esperando los clientes.

### **Impacto de tarjetas Polca.**

Como se pueden observar en los resultados, la media de tarjetas polca en las estaciones es de 1.7 a pesar de tener la posibilidad de tener hasta 6 tarjetas, y como hemos mencionado anteriormente, con más cantidad de tarjetas no existe variaciones en los resultados.

Las simulaciones con 6, 4 y 2 tarjetas Polca a utilizar en cada estación, no ha provocado impacto en la satisfacción de los pedidos, ni en el tiempo de espera del cliente, ni en el tiempo de fabricación de las piezas, aunque la reducción de las tarjetas si ha provocado una mejora en el tiempo de espera de la liberación de los pedidos por un reparto más equitativo del WIP entre las estaciones.

Las simulaciones con 1 tarjeta Polca, significa que no existe el buffer, y el único producto que está procesándose en la estación es la que tiene la tarjeta, por lo tanto, esto sí ha provocado una bajada considerable del tiempo de producción y por lo tanto en la satisfacción inmediata de la demanda.

A pesar de no observarse un gran impacto en la variación de este valor, si mejora el cuello de botella en las estaciones y produce un mejor reparto del WIP en la planta.

### **Impacto en el umbral del WLC.**

Y llegamos al valor que más ha presentado variaciones en los resultados.

Los valores inferiores de 25 unidades de tiempo de procesado en cada estación son demasiado restrictivos para poder llegar a un valor de stock suficiente para la demanda.

Como se esperaba un menor tiempo de Umbral, provocaría un mejor tiempo de fabricación (TF) al encontrarse la planta menos saturada con un WIP menor, pero provoca un tiempo de pedido (TP) mayor al estar reteniéndolos sin liberarse.

Sin embargo, por el otro extremo, con unos valores de 35 o superiores, provoca que el control no surja efecto y que libere automáticamente los pedidos al generarse. Esto se puede comprobar al empezar a casi igualarse el tiempo de fabricación (TF) con el tiempo de pedido (FP).

Por lo tanto y teniendo en cuenta también el valor de la satisfacción de la demanda inmediata (DS) y del tiempo de espera del cliente, los umbrales deberían de tratarse entre los 30 y 33 unidades de tiempo.

### **Elección de configuración.**

Para esta simulación podríamos decir que la más conveniente sería la de:

SF =1 ; ROQ =1 ; Polca=2 ; WLC =33

A pesar de que tengamos que hacer esperar de media al cliente 2 unidades de tiempo más que con el umbral a 35, pero el stock de productos terminados es mayor,

y la planta de fabricación sería más estable y menos saturada.

Como se puede ver en la ilustración 4, el tiempo de espera de los pedidos para liberarse en esta ocasión no se satura como en el escenario anterior, aunque si llega a haber momentos en la cola de espera aumenta porque coincide productos que en la planta que tengan rutas más largas o porque el tiempo de fabricación se dilate momentáneamente ya que el tiempo de procesamiento de cada estación no es contante, pero a pesar de eso se consigue recuperar. Esta forma de gráfica es una característica de este tipo de planta de fabricación en la que las rutas de los productos se entrelazan en su recorrido o incluso vuelven a estaciones que ya pasaron.

En la ilustración 5, muestra en línea azul el nivel de stock de productos terminados en el almacén listos para entregar cuando llegue una demanda, además muestra la cantidad de pedidos pendientes o backlog que se encuentra en espera de su fabricación al no haber stock suficiente. Lo que se debe de destacar es la poca cantidad de veces que no encuentran stock de algún producto cuando llega la demanda, y esto explica el valor alto de la demanda satisfecha inmediata. (DS)

Y como alternativa si la empresa necesita minimizar capital, se elegiría los valores de:

$$SF = 0 ; ROQ = 1 ; Polca = 2 ; WLC = 33$$

Esta elección es más económica hacia la empresa, aunque obtendríamos unos valores de satisfacción inmediata menores, evidentemente al tener menos cantidad de stock de productos terminados. Sin embargo, esta medida solo se debería adoptar si supiéramos que la demanda no va a aumentar momentáneamente, ya que esta opción es significativamente más frágil ante variaciones de la demanda.

Para esta opción también se han representado los mismos gráficos. En la ilustración 6 se observa la misma forma de tiempo de espera de liberación que



hemos explicado anteriormente, en este caso para esta simulación no se ha llegado a acumular tanto la cola de libración generándose un pico tan alto.

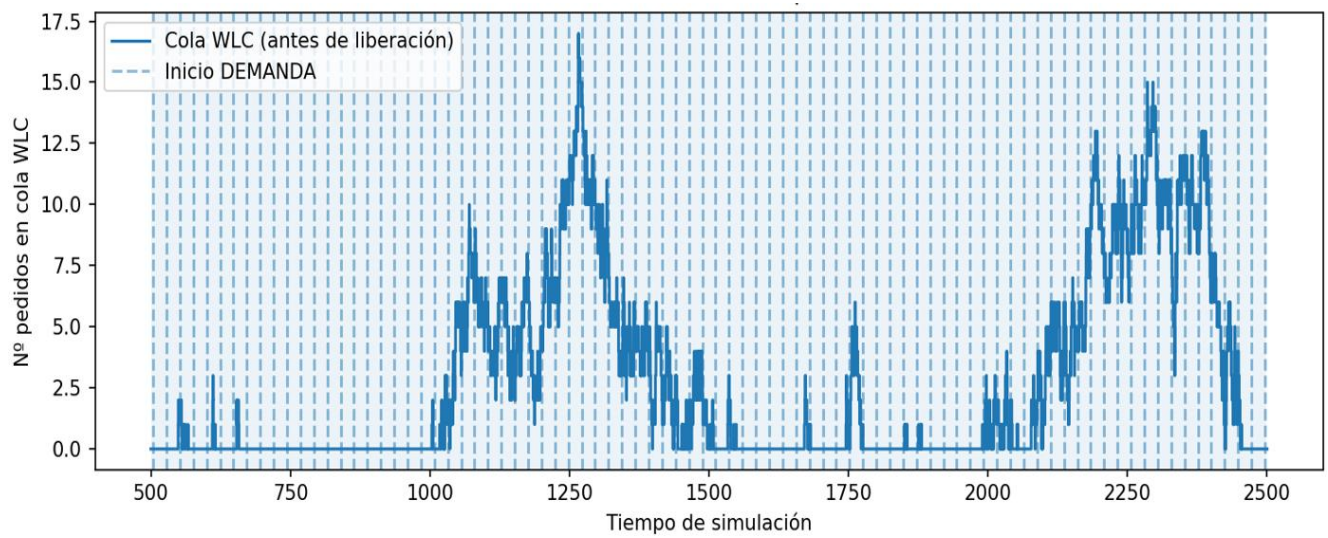
Y finalmente para la ilustración 7, se puede ver a simple vista la diferencia del factor de seguridad, ya que es muy parecida a la de la configuración anterior pero con un nivel menor de stock de almacén en todos los productos, provocando más cantidad de backlong a lo largo de la simulación y a consecuencia el empeoramiento que nombrábamos antes de la demanda inmediata.

|     |       | Factor Satisfacción = 1 |      |      |      |      |     |      |      |      |        |       |      |      |       |     |      |       |       |
|-----|-------|-------------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|--------|-------|------|------|-------|-----|------|-------|-------|
|     |       | ROQ =1                  |      |      |      |      |     |      |      |      | ROQ =5 |       |      |      |       |     |      |       |       |
| WLC | POLCA | DS                      | TEC  | IM   | WIP  | PR   | NB  | TF   | TP   | DP   | DS     | TEC   | IM   | WIP  | PR    | NB  | TF   | TP    | DP    |
| 25  | 6     | 68,1%                   | 22,9 | 14,9 | 26,0 | 23,1 | 1,1 | 26,6 | 46,0 | 25,8 | 20,9%  | 138,6 | 1,0  | 25,0 | 179,4 | 1,1 | 28,6 | 172,3 | 138,9 |
| 27  | 6     | 49,6%                   | 45,6 | 10,9 | 27,2 | 42,8 | 1,2 | 27,7 | 63,7 | 39,0 | 23,8%  | 141,7 | 2,7  | 27,1 | 176,4 | 1,2 | 30,8 | 168,3 | 137,1 |
| 30  | 6     | 87,6%                   | 10,5 | 21,8 | 28,5 | 8,5  | 1,3 | 28,4 | 36,0 | 17,2 | 31,9%  | 105,5 | 4,3  | 30,3 | 125,6 | 1,4 | 32,8 | 133,7 | 103,9 |
| 33  | 6     | 93,7%                   | 7,6  | 25,8 | 29,8 | 2,8  | 1,3 | 29,7 | 32,4 | 14,3 | 39,8%  | 64,8  | 8,3  | 33,8 | 77,3  | 1,6 | 35,5 | 100,8 | 65,0  |
| 35  | 6     | 92,9%                   | 5,7  | 23,0 | 32,0 | 3,2  | 1,4 | 31,4 | 34,2 | 14,9 | 56,1%  | 37,3  | 14,7 | 35,5 | 43,7  | 1,7 | 36,9 | 73,3  | 42,6  |
| 25  | 4     | 68,1%                   | 22,9 | 14,9 | 26,0 | 23,1 | 1,0 | 26,5 | 46,0 | 25,8 | 20,9%  | 138,6 | 1,0  | 25,0 | 179,4 | 0,9 | 28,3 | 172,3 | 138,9 |
| 27  | 4     | 49,6%                   | 45,6 | 10,9 | 27,2 | 42,8 | 1,0 | 27,7 | 63,7 | 39,0 | 23,8%  | 141,7 | 2,7  | 27,1 | 176,4 | 1,0 | 30,5 | 168,3 | 137,1 |
| 30  | 4     | 87,6%                   | 10,5 | 21,8 | 28,5 | 8,5  | 1,1 | 28,3 | 36,0 | 17,2 | 31,9%  | 105,5 | 4,3  | 30,3 | 125,6 | 1,1 | 32,3 | 133,7 | 103,9 |
| 33  | 4     | 93,7%                   | 7,6  | 25,8 | 29,8 | 2,8  | 1,1 | 29,5 | 32,4 | 14,3 | 39,8%  | 64,8  | 8,3  | 33,8 | 77,3  | 1,2 | 35,0 | 100,8 | 65,0  |
| 35  | 4     | 92,9%                   | 5,7  | 23,0 | 32,0 | 3,2  | 1,1 | 31,3 | 34,2 | 14,9 | 56,1%  | 37,3  | 14,7 | 35,5 | 43,7  | 1,3 | 36,5 | 73,3  | 42,6  |
| 25  | 2     | 68,1%                   | 22,9 | 14,9 | 26,0 | 23,1 | 0,5 | 26,2 | 46,0 | 25,8 | 20,9%  | 138,6 | 1,0  | 25,0 | 179,4 | 0,4 | 27,6 | 172,3 | 138,9 |
| 27  | 2     | 49,6%                   | 45,6 | 10,9 | 27,2 | 42,8 | 0,5 | 27,3 | 63,7 | 39,0 | 23,8%  | 141,7 | 2,7  | 27,1 | 176,4 | 0,5 | 29,8 | 168,3 | 137,1 |
| 30  | 2     | 87,6%                   | 10,5 | 21,8 | 28,5 | 8,5  | 0,5 | 28,0 | 36,0 | 17,2 | 31,9%  | 105,5 | 4,3  | 30,3 | 125,6 | 0,5 | 31,5 | 133,7 | 103,9 |
| 33  | 2     | 93,7%                   | 7,6  | 25,8 | 29,8 | 2,8  | 0,5 | 29,0 | 32,4 | 14,3 | 39,8%  | 64,8  | 8,3  | 33,8 | 77,3  | 0,5 | 34,2 | 100,8 | 65,0  |
| 35  | 2     | 92,9%                   | 5,7  | 23,0 | 32,0 | 3,2  | 0,6 | 30,8 | 34,2 | 14,9 | 56,1%  | 37,3  | 14,7 | 35,5 | 43,7  | 0,6 | 35,7 | 73,3  | 42,6  |
| 25  | 1     | 53,4%                   | 37,5 | 12,8 | 25,2 | 36,0 | 0,0 | 25,2 | 57,9 | 35,1 | 17,3%  | 140,7 | 0,6  | 25,4 | 190,7 | 0,0 | 27,9 | 176,0 | 140,4 |
| 27  | 1     | 90,7%                   | 8,1  | 24,7 | 27,1 | 6,6  | 0,0 | 26,5 | 34,1 | 15,0 | 17,9%  | 164,7 | 0,9  | 26,8 | 215,2 | 0,0 | 28,9 | 190,2 | 155,4 |
| 30  | 1     | 68,9%                   | 20,2 | 13,4 | 31,1 | 18,6 | 0,0 | 29,8 | 46,6 | 22,7 | 33,2%  | 107,2 | 5,4  | 30,4 | 125,2 | 0,0 | 31,1 | 131,3 | 101,8 |
| 33  | 1     | 77,0%                   | 11,9 | 17,0 | 32,9 | 9,9  | 0,0 | 31,2 | 41,6 | 17,5 | 36,9%  | 88,9  | 5,7  | 34,0 | 100,8 | 0,0 | 34,2 | 118,3 | 84,5  |
| 35  | 1     | 77,1%                   | 14,0 | 18,8 | 33,7 | 7,7  | 0,0 | 32,8 | 40,9 | 18,6 | 37,1%  | 81,7  | 7,2  | 36,3 | 93,1  | 0,0 | 35,5 | 111,8 | 79,2  |

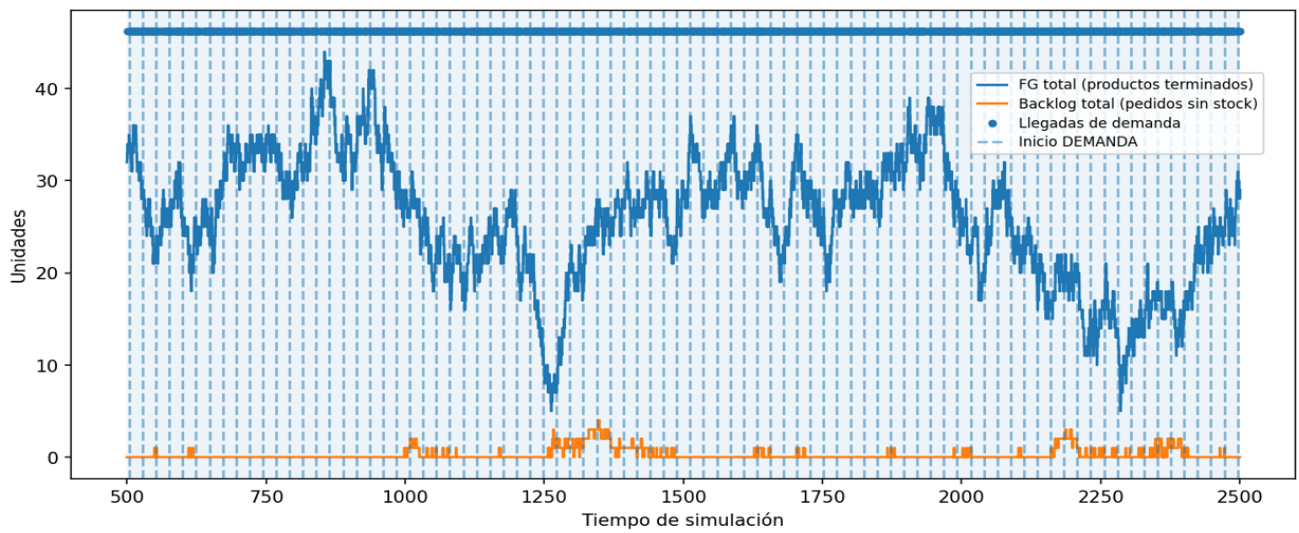
Tabla 9: Resultados de simulación del segundo escenario con FS=1

|     |       | Factor Satisfacción = 0 |      |      |      |      |     |      |      |      |        |       |     |      |       |     |      |       |       |  |
|-----|-------|-------------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|--------|-------|-----|------|-------|-----|------|-------|-------|--|
|     |       | ROQ =1                  |      |      |      |      |     |      |      |      | ROQ =5 |       |     |      |       |     |      |       |       |  |
| WLC | POLCA | DS                      | TEC  | IM   | WIP  | PR   | NB  | TF   | TP   | DP   | DS     | TEC   | IM  | WIP  | PR    | NB  | TF   | TP    | DP    |  |
| 25  | 6     | 44,7%                   | 37,4 | 5,9  | 26,4 | 32,3 | 1,2 | 26,7 | 54,1 | 32,5 | 14,5%  | 192,5 | 0,2 | 25,3 | 230,3 | 1,2 | 29,7 | 213,4 | 179,1 |  |
| 27  | 6     | 47,9%                   | 51,4 | 5,8  | 27,7 | 40,2 | 1,2 | 27,5 | 59,6 | 44,0 | 15,7%  | 118,5 | 0,5 | 26,7 | 151,2 | 1,2 | 29,7 | 154,4 | 116,5 |  |
| 30  | 6     | 86,5%                   | 7,5  | 16,2 | 27,5 | 1,8  | 1,2 | 27,3 | 28,9 | 11,8 | 34,9%  | 104,8 | 4,6 | 30,6 | 107,7 | 1,4 | 32,6 | 115,5 | 97,8  |  |
| 33  | 6     | 90,4%                   | 5,8  | 16,6 | 28,0 | 0,7  | 1,3 | 27,6 | 28,2 | 11,3 | 34,5%  | 63,9  | 6,2 | 33,2 | 68,8  | 1,5 | 34,8 | 93,5  | 60,2  |  |
| 35  | 6     | 75,4%                   | 10,4 | 11,8 | 32,6 | 2,2  | 1,4 | 31,0 | 32,8 | 13,5 | 40,6%  | 54,5  | 6,9 | 36,4 | 55,9  | 1,7 | 37,5 | 82,4  | 54,0  |  |
| 25  | 4     | 44,7%                   | 37,4 | 5,9  | 26,4 | 32,3 | 1,0 | 26,7 | 54,1 | 32,5 | 14,5%  | 192,5 | 0,2 | 25,3 | 230,3 | 0,9 | 29,4 | 213,4 | 179,1 |  |
| 27  | 4     | 47,9%                   | 51,4 | 5,8  | 27,7 | 40,2 | 1,0 | 27,4 | 59,6 | 44,0 | 15,7%  | 118,5 | 0,5 | 26,7 | 151,2 | 1,0 | 29,3 | 154,4 | 116,5 |  |
| 30  | 4     | 86,5%                   | 7,5  | 16,2 | 27,5 | 1,8  | 1,0 | 27,3 | 28,9 | 11,8 | 34,9%  | 104,8 | 4,6 | 30,6 | 107,7 | 1,1 | 32,1 | 115,5 | 97,8  |  |
| 33  | 4     | 90,4%                   | 5,8  | 16,6 | 28,0 | 0,7  | 1,1 | 27,5 | 28,2 | 11,3 | 34,5%  | 63,9  | 6,2 | 33,2 | 68,8  | 1,2 | 34,3 | 93,5  | 60,2  |  |
| 35  | 4     | 75,4%                   | 10,4 | 11,8 | 32,6 | 2,2  | 1,2 | 30,9 | 32,8 | 13,5 | 40,6%  | 54,5  | 6,9 | 36,4 | 55,9  | 1,3 | 37,0 | 82,4  | 54,0  |  |
| 25  | 2     | 44,7%                   | 37,4 | 5,9  | 26,4 | 32,3 | 0,5 | 26,3 | 54,1 | 32,5 | 14,5%  | 192,5 | 0,2 | 25,3 | 230,3 | 0,4 | 28,7 | 213,4 | 179,1 |  |
| 27  | 2     | 47,9%                   | 51,4 | 5,8  | 27,7 | 40,2 | 0,5 | 27,0 | 59,6 | 44,0 | 15,7%  | 118,5 | 0,5 | 26,7 | 151,2 | 0,5 | 28,6 | 154,4 | 116,5 |  |
| 30  | 2     | 86,5%                   | 7,5  | 16,2 | 27,5 | 1,8  | 0,5 | 26,9 | 28,9 | 11,8 | 34,9%  | 104,8 | 4,6 | 30,6 | 107,7 | 0,5 | 31,2 | 115,5 | 97,8  |  |
| 33  | 2     | 90,4%                   | 5,8  | 16,6 | 28,0 | 0,7  | 0,5 | 27,1 | 28,2 | 11,3 | 34,5%  | 63,9  | 6,2 | 33,2 | 68,8  | 0,5 | 33,5 | 93,5  | 60,2  |  |
| 35  | 2     | 75,4%                   | 10,4 | 11,8 | 32,6 | 2,2  | 0,6 | 30,5 | 32,8 | 13,5 | 40,6%  | 54,5  | 6,9 | 36,4 | 55,9  | 0,6 | 36,1 | 82,4  | 54,0  |  |
| 25  | 1     | 44,3%                   | 62,0 | 6,0  | 25,9 | 48,4 | 0,0 | 25,6 | 67,2 | 46,2 | 12,8%  | 188,1 | 0,2 | 25,4 | 236,2 | 0,0 | 27,9 | 212,6 | 179,3 |  |
| 27  | 1     | 41,6%                   | 39,0 | 4,4  | 28,2 | 34,9 | 0,0 | 27,1 | 55,9 | 35,6 | 21,5%  | 129,2 | 1,8 | 26,9 | 151,9 | 0,0 | 29,3 | 154,5 | 122,0 |  |
| 30  | 1     | 69,7%                   | 16,0 | 10,2 | 30,3 | 8,2  | 0,0 | 28,4 | 35,8 | 17,2 | 23,6%  | 141,3 | 3,2 | 29,7 | 159,8 | 0,0 | 31,0 | 157,6 | 131,7 |  |
| 33  | 1     | 85,7%                   | 8,5  | 14,8 | 29,8 | 1,3  | 0,0 | 28,0 | 30,2 | 11,9 | 25,5%  | 95,7  | 2,3 | 33,8 | 111,1 | 0,0 | 34,0 | 122,5 | 92,2  |  |
| 35  | 1     | 85,0%                   | 8,2  | 14,5 | 31,0 | 0,3  | 0,0 | 29,1 | 30,4 | 12,1 | 34,7%  | 66,7  | 6,3 | 35,9 | 69,6  | 0,0 | 35,5 | 94,6  | 62,2  |  |

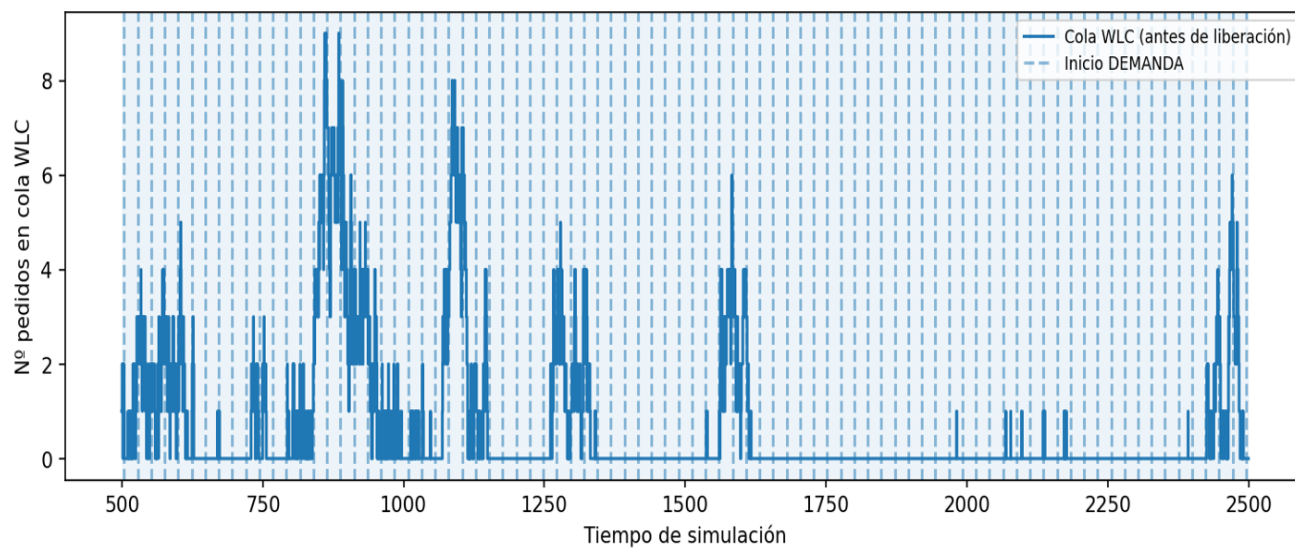
Tabla 10: Resultados de simulación del segundo escenario con FS=0



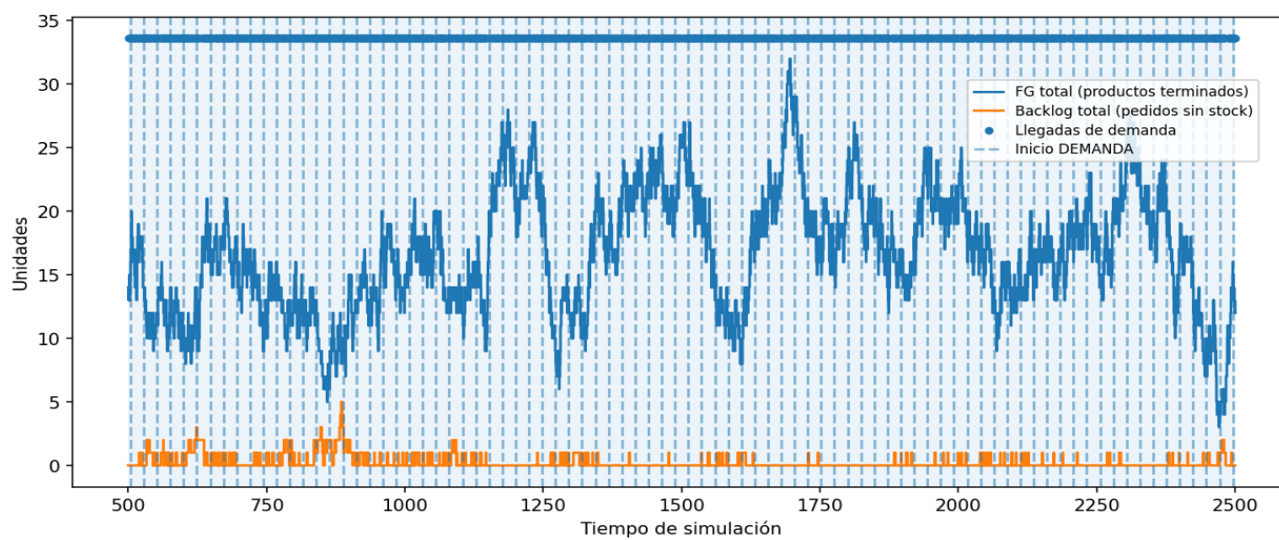
*Ilustración 4: Tiempo de espera de los pedidos para liberarse a planta, escenario 2, elección 1*



*Ilustración 5: Stock de productos terminados en almacén, escenario 2, elección 1*



*Ilustración 6: Tiempo de espera de los pedidos para liberarse a planta, escenario 2, elección 2*



*Ilustración 7: Stock de productos terminados en almacén, escenario 2, elección 2*

### **6.3. Tercer escenario**

Hasta ahora, las simulaciones realizadas se han ejecutado para un tiempo simulado constante y sin interrupciones, lo que indica que tanto “la tienda” donde se recepciona las demandas, se almacena el producto terminado, se satisfacen los pedidos y se generan los pedidos a fábrica trabaja la misma cantidad de tiempo que la planta de fabricación, con los buffers, el control de liberación de pedidos, las estaciones y las tarjetas polca.

Para este tercer escenario, vamos a recrear otras condiciones laborales. Reproduciremos unas simulaciones donde “la tienda” va a estar abierta y funcionando durante 8 horas diarias, mientras que la fábrica no parará la producción, y se mantendrá las 24 horas produciendo.

Las fábricas que trabajan 24 horas suelen utilizarse porque las maquinarias tienen un sobrecoste por arranque. Pero también hay otros motivos como que las paradas pueden generar un deterioro en la calidad final del producto, también puede aprovecharse un costo energético más barato por las horas nocturnas, e incluso para reducir la cantidad de maquinaria necesaria para la producción.

Por lo tanto, seguiremos utilizando unos valores de factor de seguridad iguales que anterioridad y la cantidad de tarjetas polca, pero si realizaremos modificaciones en el resto de los parámetros. El punto de reorden utilizaremos unos valores de 1 y 2, ya que en la anterior simulación hemos detectado que la generación de 5 pedidos iguales empeoraría la satisfacción final el cliente al acabarse el stock en el almacén con tanta facilidad. Los valores del umbral de liberación de pedidos también los modificaremos, ya que, al estar fabricando aproximadamente la misma cantidad de productos porque no ha cambiado la demanda, durante más tiempo, podemos hacer más restrictivo la espera de liberación, por lo que utilizaremos los valores de 10, 9.5, 9, 8.5, 8.

Finalmente obtendremos los resultados de la tabla 11 y 12, en los que destacaremos los siguientes datos resultantes.

### **Impacto del factor de seguridad.**

El factor de seguridad sigue afectando de la misma manera que la situación anterior, pero en esta ocasión, como durante el tiempo que la tienda se encuentra cerrada, la fábrica es capaz de producir para satisfacer los pedidos que se encontraban pendientes cuando cerró la tienda, y de volver a tener stock suficiente para empezar de nuevo.

Tras esta observación, con este escenario entendemos que los valores resultantes son parecidos entre el FS 1 y 2. Por lo tanto en este caso elegiremos no tener el factor de seguridad para evitar tener un sobre coste de inventario terminado, y tener la fábrica menos saturada, obteniendo los resultados de satisfacción del cliente son muy parecidos.

### **Impacto del punto de reorden.**

A pesar de haber descartado completamente el punto de reorden de 5 de las simulaciones anteriores, con el punto de reorden igual a 2 tampoco mejora, consiguiendo la mitad de la satisfacción del cliente, más tiempo de espera, tanto del cliente como de liberación del pedido, originando así más cantidad de pedidos esperando a entrar en fábrica. Esto es por lo ya nombrado anteriormente, al no tener aleatoriedad del tipo de producto a fabricar, siempre habrá momentos en los que se usarán más unas estaciones que otras.

### **Impacto de tarjetas Polca.**

La cantidad de tarjetas polca en la experimentación continua sin ser relevante ya que en todos los modelos tiene una media de polca utilizada de 0,2 a pesar de tener más tarjetas. Por lo tanto, vuelve ser conveniente tener 2 tarjetas para siempre tener como máximo el producto que está fabricándose y otro en espera. Si le quitamos este producto en cola, si se nota un empeoramiento de los tiempos, aunque no con tanta claridad que con el escenario anterior.

### **Impacto en el umbral del WLC.**

En esta ocasión el valor del umbral lo hemos tenido que reducir por la cantidad de horas de producción con respecto a la de la demanda. Si hubiéramos realizado la experimentación con este horario, el control de liberación sería inexistente, no retendría pedidos algunos.

Se ha bajado estos valores, pero además se ha reducido la viabilidad del valor, con un incremento en cada prueba de 0.5 puntos en vez de 2 o 3 puntos que se ha realizado en el escenario anterior por lo sensible que va a ser la simulación con este valor, pasando de tener un DS de un 99.2% a un 60,6% variando de 10 a 9 el WLC. La sensibilidad es debido a que estamos experimentando justo en la zona crítica del sistema, por lo tanto, el valor del umbral está actuando más como un interruptor que como un controlador.

Las siguientes ilustraciones se pueden observar a simple vista esta sensibilidad, pasando de un valor de umbral de 9 en la ilustración 8 a un umbral de 9,5 en la ilustración 9. Se comprueba que con el  $WLC = 9$  cada vez hay menos producto terminado en el almacén hasta llegar a acabarse, y a consecuencia de esto va acumularse el backlog o pedidos pendientes con tendencia al infinito, mientras que con el  $WLC = 9,5$  si se mantiene constante o se recupera de los picos de demanda.

### **Elección de configuración.**

Para esta simulación por lo tanto podríamos decir que la más conveniente sería la de:

$$SF = 0 ; ROQ = 1 ; Polca = 2 ; WLC = 10$$

Este formato es casi perfecto, ya que tendremos una cantidad de pedidos satisfechos inmediatamente de un 99.2%, aunque el 0.8% restante van a esperar una media de 12.6 unidades de tiempo de media por la espera de la apertura de la tienda al día siguiente.

Estos valores producirán un almacén elevado ya que en la mayoría del tiempo



(que es en el horario nocturno con la tienda cerrada) irán fabricándose los productos para la nueva apertura del día siguiente, pero este valor no será tan alto que, con el factor de seguridad, que encarecerá el almacén sin observarse apenas mejoras en el resultado.

|       |     | Factor Satisfacción = 1 |       |      |     |       |     |      |       |       |        |       |      |     |       |     |      |       |       |
|-------|-----|-------------------------|-------|------|-----|-------|-----|------|-------|-------|--------|-------|------|-----|-------|-----|------|-------|-------|
|       |     | ROQ =1                  |       |      |     |       |     |      |       |       | ROQ =2 |       |      |     |       |     |      |       |       |
| POLCA | WLC | DS                      | TEC   | IM   | WIP | PR    | NB  | TF   | TP    | DP    | DS     | TEC   | IM   | WIP | PR    | NB  | TF   | TP    | DP    |
| 6     | 8   | 36,6%                   | 133,1 | 6,5  | 7,1 | 99,4  | 0,1 | 14,1 | 152,0 | 124,9 | 23,8%  | 174,9 | 2,6  | 6,7 | 143,3 | 0,1 | 14,1 | 213,3 | 159,3 |
|       | 8,5 | 39,9%                   | 119,1 | 5,7  | 7,4 | 92,4  | 0,2 | 14,4 | 141,8 | 114,6 | 23,6%  | 197,7 | 2,8  | 7,0 | 157,6 | 0,1 | 14,5 | 227,8 | 178,3 |
|       | 9   | 88,4%                   | 28,7  | 23,7 | 8,7 | 27,3  | 0,2 | 15,2 | 54,7  | 37,6  | 53,1%  | 69,0  | 13,3 | 8,2 | 61,0  | 0,2 | 15,3 | 101,0 | 79,3  |
|       | 9,5 | 99,9%                   | 24,0  | 42,6 | 8,8 | 6,6   | 0,2 | 15,2 | 24,9  | 13,6  | 69,5%  | 48,1  | 16,2 | 8,5 | 46,3  | 0,2 | 15,4 | 83,8  | 57,2  |
|       | 10  | 97,7%                   | 21,3  | 38,4 | 8,9 | 11,0  | 0,2 | 15,2 | 31,0  | 21,8  | 49,3%  | 84,0  | 9,0  | 8,6 | 71,9  | 0,2 | 15,6 | 117,3 | 87,9  |
| 4     | 8   | 36,6%                   | 133,1 | 6,5  | 7,1 | 99,4  | 0,1 | 14,1 | 152,0 | 124,9 | 23,8%  | 174,9 | 2,6  | 6,7 | 143,3 | 0,1 | 14,1 | 213,3 | 159,3 |
|       | 8,5 | 39,9%                   | 119,1 | 5,7  | 7,4 | 92,4  | 0,2 | 14,4 | 141,8 | 114,6 | 23,6%  | 197,7 | 2,8  | 7,0 | 157,6 | 0,1 | 14,5 | 227,8 | 178,3 |
|       | 9   | 88,4%                   | 28,7  | 23,7 | 8,7 | 27,3  | 0,2 | 15,1 | 54,7  | 37,6  | 53,1%  | 69,0  | 13,3 | 8,2 | 61,0  | 0,2 | 15,3 | 101,0 | 79,3  |
|       | 9,5 | 99,9%                   | 24,0  | 42,6 | 8,8 | 6,6   | 0,2 | 15,1 | 24,9  | 13,6  | 69,5%  | 48,1  | 16,2 | 8,5 | 46,3  | 0,2 | 15,4 | 83,8  | 57,2  |
|       | 10  | 97,7%                   | 21,3  | 38,4 | 8,9 | 11,0  | 0,2 | 15,2 | 31,0  | 21,8  | 49,3%  | 84,0  | 9,0  | 8,6 | 71,9  | 0,2 | 15,5 | 117,3 | 87,9  |
| 2     | 8   | 36,6%                   | 133,1 | 6,5  | 7,1 | 99,4  | 0,1 | 13,9 | 152,0 | 124,9 | 23,8%  | 174,9 | 2,6  | 6,7 | 143,3 | 0,1 | 14,0 | 213,3 | 159,3 |
|       | 8,5 | 39,9%                   | 119,1 | 5,7  | 7,4 | 92,4  | 0,1 | 14,2 | 141,8 | 114,6 | 23,6%  | 197,7 | 2,8  | 7,0 | 157,6 | 0,1 | 14,3 | 227,8 | 178,3 |
|       | 9   | 88,4%                   | 28,7  | 23,7 | 8,7 | 27,3  | 0,2 | 14,9 | 54,7  | 37,6  | 53,1%  | 69,0  | 13,3 | 8,2 | 61,0  | 0,1 | 15,1 | 101,0 | 79,3  |
|       | 9,5 | 99,9%                   | 24,0  | 42,6 | 8,8 | 6,6   | 0,2 | 14,7 | 24,9  | 13,6  | 69,5%  | 48,1  | 16,2 | 8,5 | 46,3  | 0,2 | 15,2 | 83,8  | 57,2  |
|       | 10  | 97,7%                   | 21,3  | 38,4 | 8,9 | 11,0  | 0,2 | 14,8 | 31,0  | 21,8  | 49,3%  | 84,0  | 9,0  | 8,6 | 71,9  | 0,2 | 15,3 | 117,3 | 87,9  |
| 1     | 8   | 33,6%                   | 142,8 | 4,3  | 7,1 | 110,9 | 0,0 | 13,4 | 166,2 | 139,2 | 33,2%  | 150,8 | 4,9  | 6,8 | 120,3 | 0,0 | 13,6 | 176,4 | 146,7 |
|       | 8,5 | 38,9%                   | 67,1  | 6,2  | 7,6 | 68,7  | 0,0 | 13,9 | 118,0 | 75,6  | 29,6%  | 166,7 | 4,1  | 7,0 | 133,6 | 0,0 | 13,9 | 194,0 | 161,5 |
|       | 9   | 96,0%                   | 12,7  | 27,1 | 8,7 | 22,4  | 0,0 | 14,5 | 47,7  | 26,9  | 38,5%  | 88,7  | 5,8  | 8,3 | 84,2  | 0,0 | 14,9 | 133,0 | 91,9  |
|       | 9,5 | 89,9%                   | 26,5  | 29,3 | 8,8 | 21,2  | 0,0 | 14,5 | 46,5  | 35,7  | 79,9%  | 33,8  | 21,0 | 8,5 | 36,6  | 0,0 | 14,9 | 68,6  | 48,3  |
|       | 10  | 100,0%                  | 0,0   | 43,7 | 8,8 | 5,5   | 0,0 | 14,2 | 24,0  | 11,4  | 96,4%  | 16,7  | 34,8 | 8,6 | 19,7  | 0,0 | 14,8 | 44,0  | 29,1  |

Tabla 11: Resultados de simulación del tercer escenario con FS=1

|       |     | Factor Satisfacción = 0 |       |      |     |       |     |      |       |       |        |       |      |     |       |     |      |       |       |
|-------|-----|-------------------------|-------|------|-----|-------|-----|------|-------|-------|--------|-------|------|-----|-------|-----|------|-------|-------|
|       |     | ROQ =1                  |       |      |     |       |     |      |       |       | ROQ =2 |       |      |     |       |     |      |       |       |
| POLCA | WLC | DS                      | TEC   | IM   | WIP | PR    | NB  | TF   | TP    | DP    | DS     | TEC   | IM   | WIP | PR    | NB  | TF   | TP    | DP    |
| 6     | 8   | 28,5%                   | 134,5 | 4,0  | 7,2 | 99,2  | 0,1 | 14,0 | 150,3 | 120,6 | 15,7%  | 213,4 | 2,1  | 6,7 | 166,3 | 0,1 | 14,0 | 240,9 | 184,5 |
|       | 8,5 | 41,0%                   | 84,6  | 5,6  | 7,3 | 63,8  | 0,2 | 14,2 | 103,4 | 84,3  | 22,4%  | 168,9 | 2,6  | 7,1 | 130,6 | 0,2 | 14,4 | 191,4 | 151,5 |
|       | 9   | 60,6%                   | 38,2  | 12,0 | 8,6 | 32,6  | 0,2 | 15,1 | 61,0  | 43,4  | 58,6%  | 50,8  | 11,5 | 8,2 | 41,9  | 0,2 | 15,1 | 74,6  | 53,8  |
|       | 9,5 | 82,7%                   | 31,4  | 19,0 | 8,7 | 20,1  | 0,2 | 15,4 | 43,8  | 31,1  | 41,4%  | 69,1  | 6,7  | 8,4 | 59,3  | 0,2 | 15,4 | 100,7 | 67,4  |
|       | 10  | 99,2%                   | 12,6  | 31,5 | 8,7 | 4,9   | 0,2 | 15,2 | 23,2  | 11,0  | 50,8%  | 53,9  | 7,4  | 8,6 | 49,1  | 0,2 | 15,5 | 88,5  | 57,0  |
| 4     | 8   | 28,5%                   | 134,5 | 4,0  | 7,2 | 99,2  | 0,1 | 14,0 | 150,3 | 120,6 | 15,7%  | 213,4 | 2,1  | 6,7 | 166,3 | 0,1 | 14,0 | 240,9 | 184,5 |
|       | 8,5 | 41,0%                   | 84,6  | 5,6  | 7,3 | 63,8  | 0,2 | 14,2 | 103,4 | 84,3  | 22,4%  | 168,9 | 2,6  | 7,1 | 130,6 | 0,2 | 14,4 | 191,4 | 151,5 |
|       | 9   | 60,6%                   | 38,2  | 12,0 | 8,6 | 32,6  | 0,2 | 15,1 | 61,0  | 43,4  | 58,6%  | 50,8  | 11,5 | 8,2 | 41,9  | 0,2 | 15,0 | 74,6  | 53,8  |
|       | 9,5 | 82,7%                   | 31,4  | 19,0 | 8,7 | 20,1  | 0,2 | 15,3 | 43,8  | 31,1  | 41,4%  | 69,1  | 6,7  | 8,4 | 59,3  | 0,2 | 15,3 | 100,7 | 67,4  |
|       | 10  | 99,2%                   | 12,6  | 31,5 | 8,7 | 4,9   | 0,2 | 15,0 | 23,2  | 11,0  | 50,8%  | 53,9  | 7,4  | 8,6 | 49,1  | 0,2 | 15,4 | 88,5  | 57,0  |
| 2     | 8   | 28,5%                   | 134,5 | 4,0  | 7,2 | 99,2  | 0,1 | 13,8 | 150,3 | 120,6 | 15,7%  | 213,4 | 2,1  | 6,7 | 166,3 | 0,1 | 13,8 | 240,9 | 184,5 |
|       | 8,5 | 41,0%                   | 84,6  | 5,6  | 7,3 | 63,8  | 0,1 | 14,0 | 103,4 | 84,3  | 22,4%  | 168,9 | 2,6  | 7,1 | 130,6 | 0,1 | 14,2 | 191,4 | 151,5 |
|       | 9   | 60,6%                   | 38,2  | 12,0 | 8,6 | 32,6  | 0,1 | 14,9 | 61,0  | 43,4  | 58,6%  | 50,8  | 11,5 | 8,2 | 41,9  | 0,1 | 14,8 | 74,6  | 53,8  |
|       | 9,5 | 82,7%                   | 31,4  | 19,0 | 8,7 | 20,1  | 0,2 | 15,1 | 43,8  | 31,1  | 41,4%  | 69,1  | 6,7  | 8,4 | 59,3  | 0,2 | 15,1 | 100,7 | 67,4  |
|       | 10  | 99,2%                   | 12,6  | 31,5 | 8,7 | 4,9   | 0,2 | 14,6 | 23,2  | 11,0  | 50,8%  | 53,9  | 7,4  | 8,6 | 49,1  | 0,2 | 15,2 | 88,5  | 57,0  |
| 1     | 8   | 23,4%                   | 149,2 | 3,0  | 7,1 | 109,7 | 0,0 | 13,6 | 171,6 | 130,5 | 16,6%  | 207,0 | 2,2  | 6,8 | 162,5 | 0,0 | 13,8 | 232,7 | 179,5 |
|       | 8,5 | 27,9%                   | 128,9 | 3,4  | 7,4 | 95,6  | 0,0 | 13,9 | 146,8 | 122,0 | 24,5%  | 166,2 | 2,8  | 7,1 | 126,1 | 0,0 | 14,0 | 184,4 | 150,3 |
|       | 9   | 99,0%                   | 15,0  | 27,7 | 8,7 | 8,6   | 0,0 | 14,1 | 28,1  | 14,8  | 35,4%  | 76,7  | 4,9  | 8,2 | 66,9  | 0,0 | 14,6 | 110,9 | 74,7  |
|       | 9,5 | 98,2%                   | 16,3  | 27,5 | 8,8 | 8,8   | 0,0 | 14,3 | 30,0  | 16,3  | 38,9%  | 75,6  | 5,3  | 8,5 | 65,1  | 0,0 | 15,0 | 108,3 | 77,5  |
|       | 10  | 73,5%                   | 31,0  | 13,1 | 8,8 | 27,5  | 0,0 | 14,5 | 55,6  | 33,8  | 34,9%  | 87,0  | 4,3  | 8,5 | 73,1  | 0,0 | 15,0 | 119,3 | 82,6  |

Tabla 12: Resultados de simulación del tercer escenario con FS=0

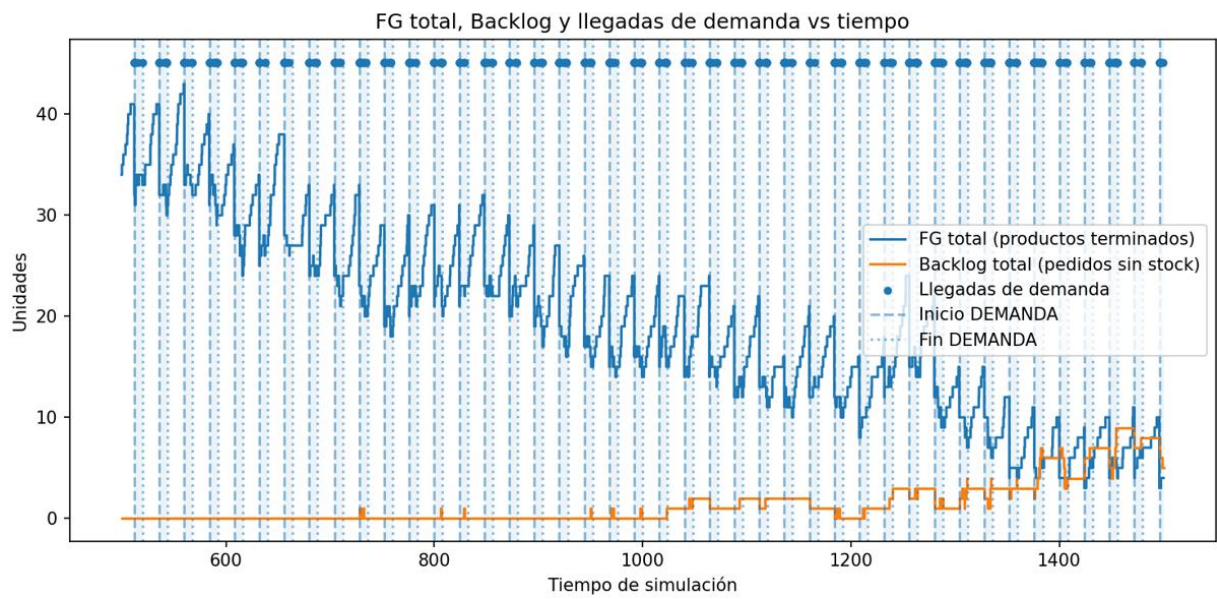


Ilustración 8: Almacén productos terminados del escenario 3 SF:0; ROQ:1; WLC:9; POLCA:2

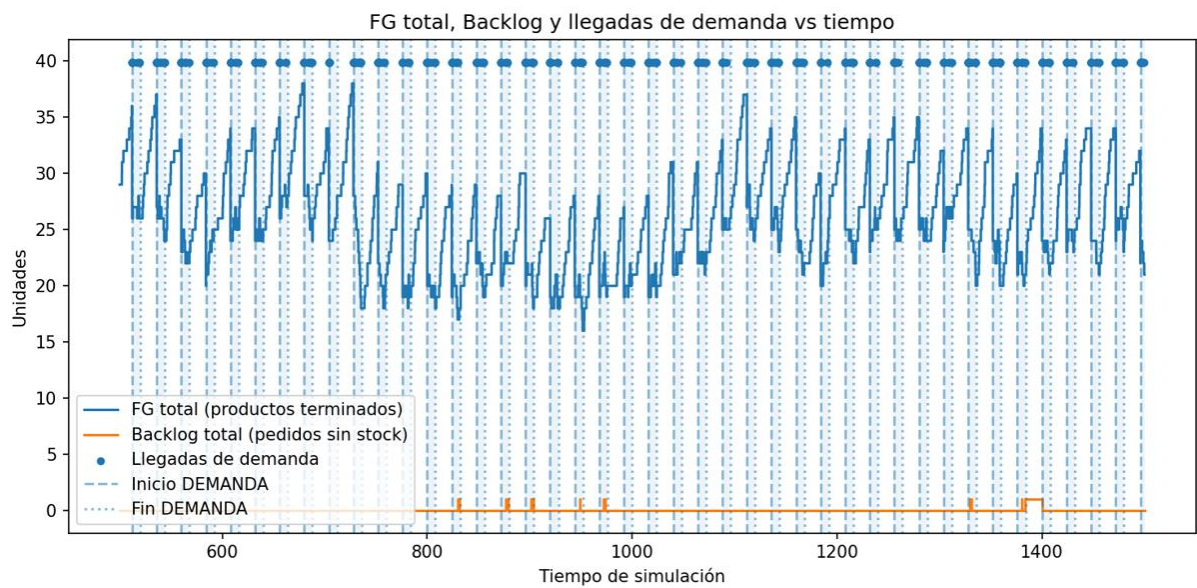


Ilustración 9: Almacén productos terminados del escenario 3 SF:0; ROQ:1; WLC:9.5; POLCA:2

#### **6.4. Cuarto escenario**

Finalmente, para este último escenario, con los modelos elegidos a partir de los escenarios 2 y 3, vamos a representar que pasaría con ellos si le introducimos un pico de demanda durante un tiempo determinado. La intención es comprobar cuál de ellos sería capaz de reaccionar mejor, y recuperarse lo más rápido posible.

Para ello, introduciremos el pico de demanda siempre en la unidad de tiempo 800, para que el sistema se encuentre más estable en el momento de generar el pico de demanda y de esta manera será más realista.

Introduciremos un 20%, un 30% y un 50% más de demanda durante 24 y 48 horas, siendo este pico de modo escalonado.

Para dichos experimentos hemos extraído la cantidad de stock de productos terminados que va a tener la tienda y la suma del backlog total en cada momento de la simulación para poder representarlos gráficamente y así comprobar como actúa la planta y poder realizar comparativas.

##### **Pico de demanda del escenario 2**

Recordamos que en el escenario 2 se simulaba 24 horas de trabajo seguidos sin realizar descansos ni en fábrica ni en tienda. En su conclusión final se eligió los siguientes parámetros que son los que utilizaremos en esta simulación:

SF =1 ; ROQ =1 ; Polca=2 ; WLC =33

Debemos advertir que cada simulación tiene valores de tiempo completamente aleatorias (como el tiempo de funcionamiento de las estaciones con el producto, o el tiempo de generación de demanda) por lo que ha provocado resultados muy diferentes unos de otros, ese será el motivo por lo que nos centramos en valorar gráficamente el comportamiento de la planta y sus posibles tendencias.

Los resultados se mostrarán en las ilustraciones de la 10 a la 15. A primera vista podemos comprobar que la cantidad de stock de los productos terminados caen visualmente a la velocidad esperada según el aumento de la demanda, dejando el

inventario a 0 en algunos productos y provocando por tanto el aumento de backlog. Cuanto más tiempo de pico de demanda lógicamente más caerá el almacén y por consiguiente, más pedidos se mandan a fabricar. Se observa que no solo los valores de la cantidad de pico de demanda, y la duración es lo que afectará, también afecta el estado del stock en el momento del inicio del pico. Ya que como se puede apreciar en la ilustración 10, en el instante anterior del aumento de demanda, el stock de productos terminados era aproximadamente de 15 y ya existía por tanto una cantidad de pedidos generados. Mientras que en la ilustración 12, tendríamos aproximadamente 30 productos terminados por lo tanto una cantidad de WIP inferior. Esto presupondrá que sea mejor la recuperación cuanto más libre se encuentre la fábrica.

Indicamos que las ilustraciones 11, 12, 13 y 15 han generado una tendencia descendente, lo que quiere indicar que pierde la estabilidad de la venta-fabricación, provocando cada vez más tiempo de espera al cliente. Especialmente la ilustración 15, la cual casi pierde el control teniendo cada vez más backlog. En este caso habría que simularlo durante más tiempo para saber si finalmente volviese a la normalidad, pero el tiempo utilizado es suficiente para determinar que el modelo no es viable para la satisfacción del cliente a corto plazo con un pico de demanda alto (+50%) durante 48 horas.

Comprobamos que ha afectado más negativamente el aumento del tiempo de pico de demanda que la propia cantidad aumentada, ya que para las 24 horas 2 de 3 simulaciones si han sido capaces de normalizarse frente a las de 48 horas que ninguna se ha normalizado a tiempo.

### **Pico de demanda del escenario 3**

Por último, recordamos que en el escenario 3 se simulaba 24 horas de funcionamiento seguidos sin realizar descansos en fábrica, pero solo 8 horas de trabajo seguidas en tienda. En su conclusión final se eligió los siguientes parámetros que son los que utilizaremos en esta simulación:

SF =0 ; ROQ =1 ; Polca=2 ; WLC =10

Se ejecutará aumentos de demanda durante 72 y 144 horas en la simulación, que equivaldría a las 24 y 48 horas de demanda aumentada de las simulaciones anteriores, ya que en este escenario solo existen demanda en 8 de cada 24 horas.

Los resultados se mostrarán en las ilustraciones de la 16 a la 21. Debemos indicar que los datos del tiempo de caída son más elevados con respecto a la experimentación anterior, porque a pesar de que se ha realizado el mismo tiempo de aumento de demanda, se ha estado ejecutando durante más tiempo de simulación.

En este escenario, al tener valores tan críticos como hemos indicado anteriormente, si ha sido más sensible a este aumento. Solo las ilustraciones 16 y 17 se contempla que apenas ha afectado el aumento del 20% de la demanda. Sin embargo, el resto del 30 y 50% de aumento, no han sido capaces de volver a la normalidad haciendo estos valores de control inviables si la fábrica espera grandes aumentos de demanda.

Destacamos la ilustración 18, con un aumento del 30% durante 72 horas que muestra una tendencia estable, pero con unos valores de stock por debajo de lo habitual. Nos hace intuir que los valores representados en esta ilustración son los críticos, ya que con un poco más de demanda o de más tiempo, haría que perdiera el control.



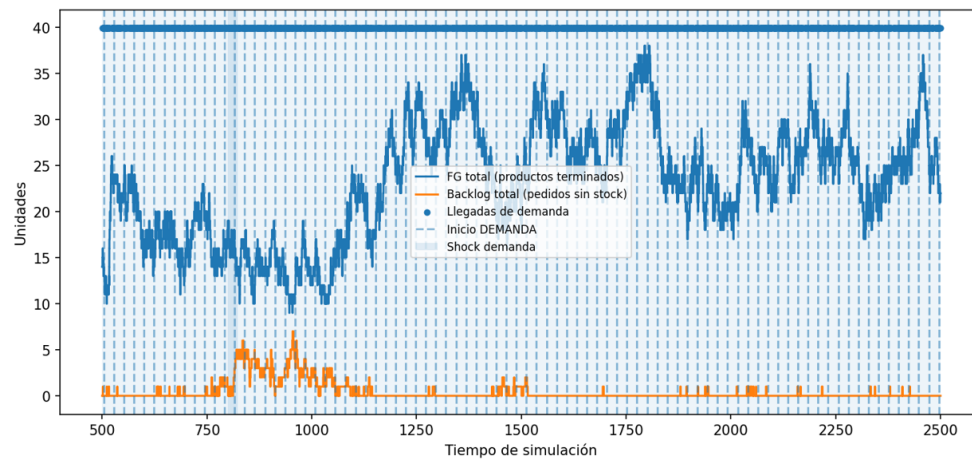


Ilustración 10: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 20% durante 24 Horas

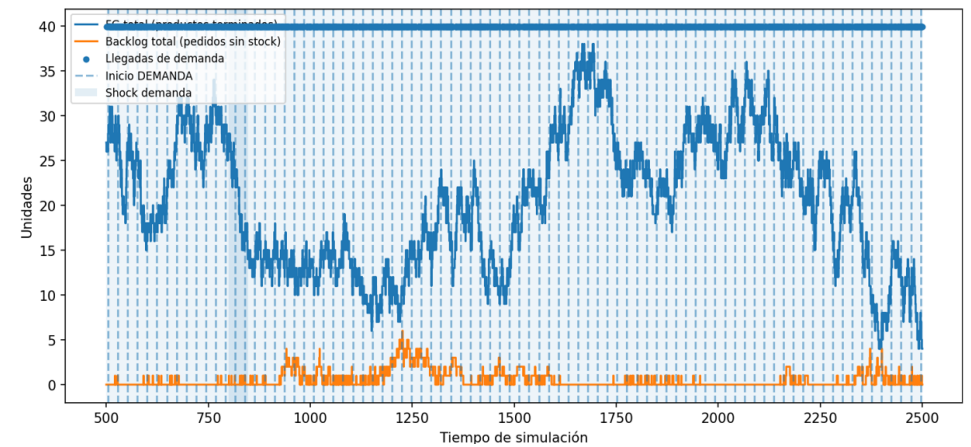


Ilustración 11: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 20% durante 48 Horas

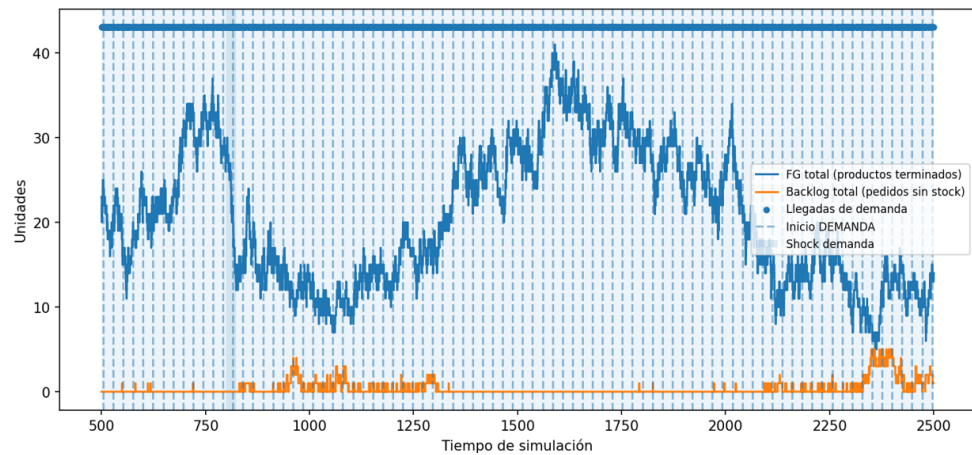


Ilustración 12: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 30% durante 24 Horas

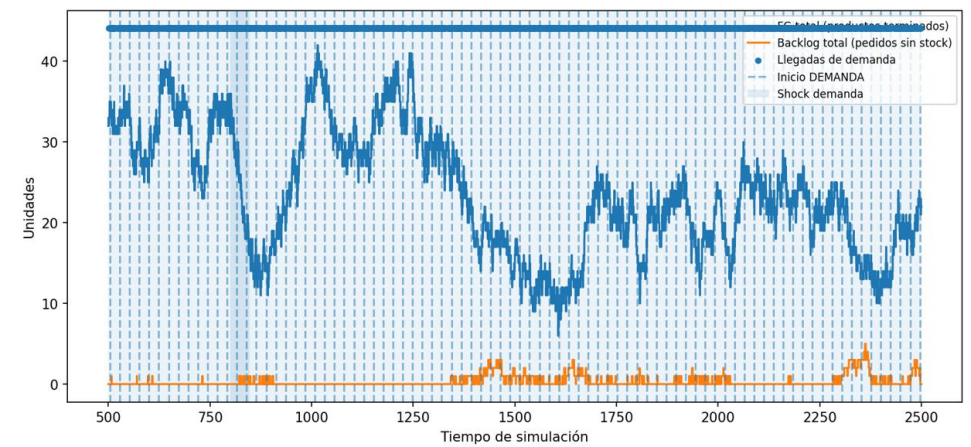


Ilustración 13: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 30% durante 48 Horas



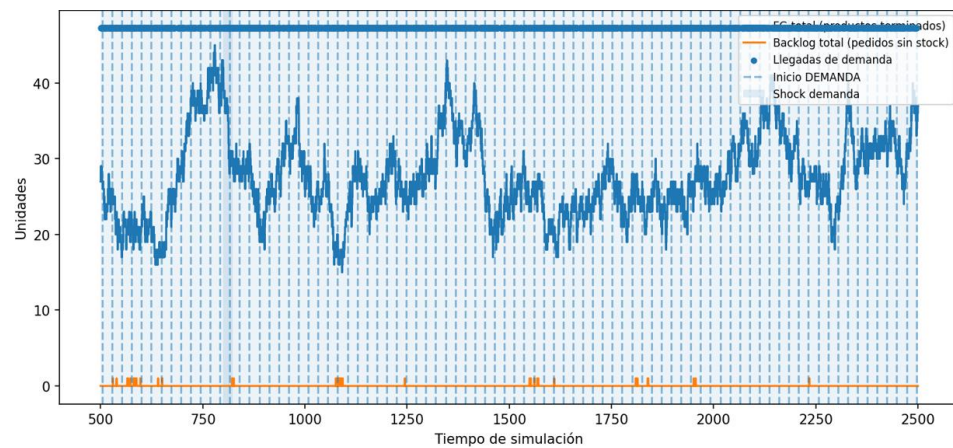


Ilustración 14: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 50% durante 24 Horas

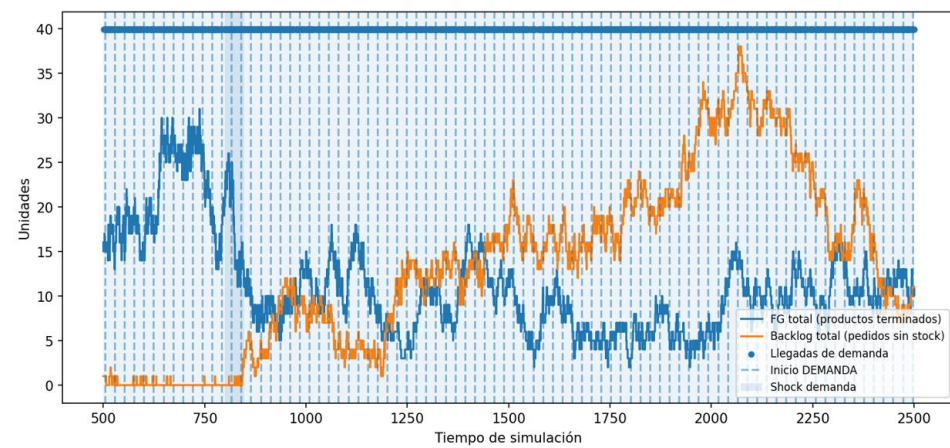


Ilustración 15: Escenario 4, Opción 1 con aumento de demanda 50% durante 48 Horas

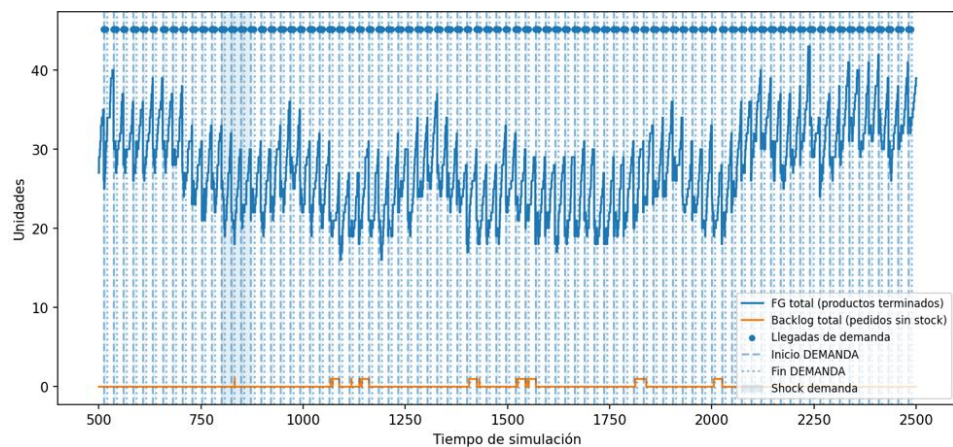


Ilustración 16: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 20% durante 72 Horas

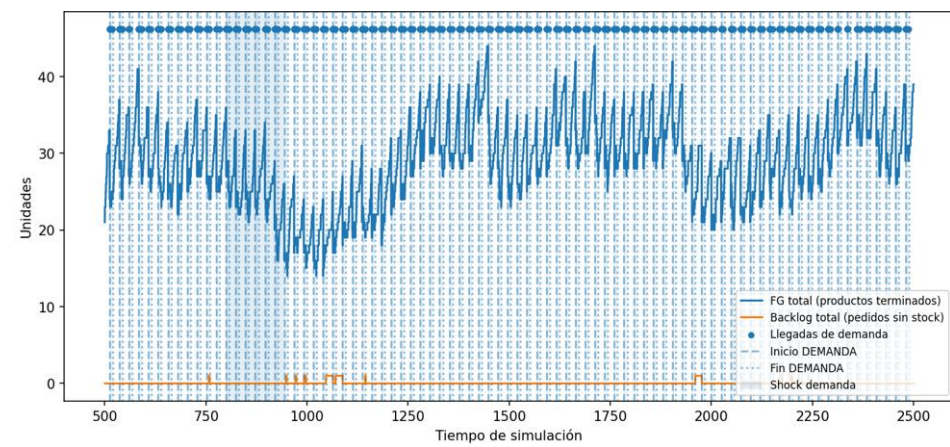


Ilustración 17: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 20% durante 144 Horas



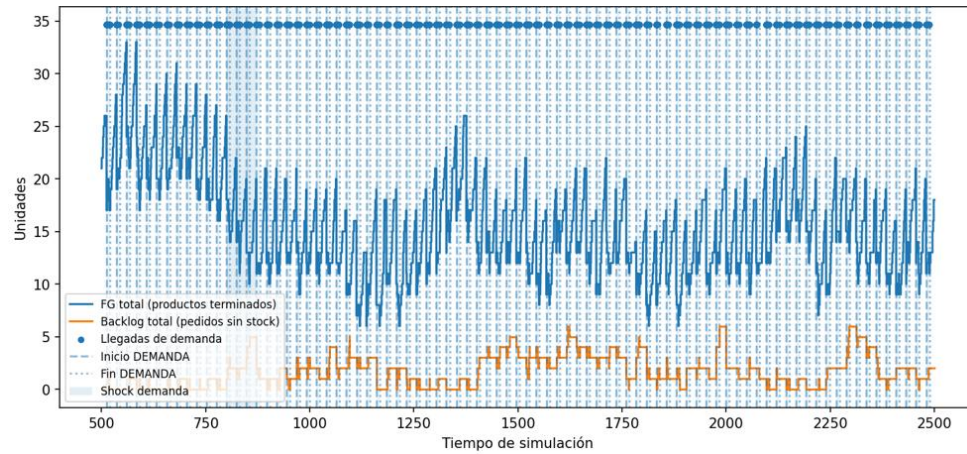


Ilustración 18: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 30% durante 72 Horas

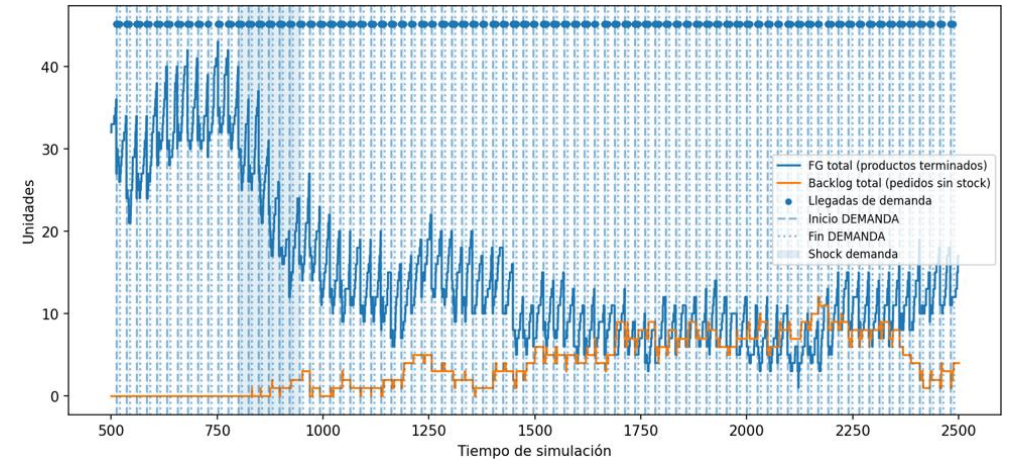


Ilustración 19: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 30% durante 144 Horas

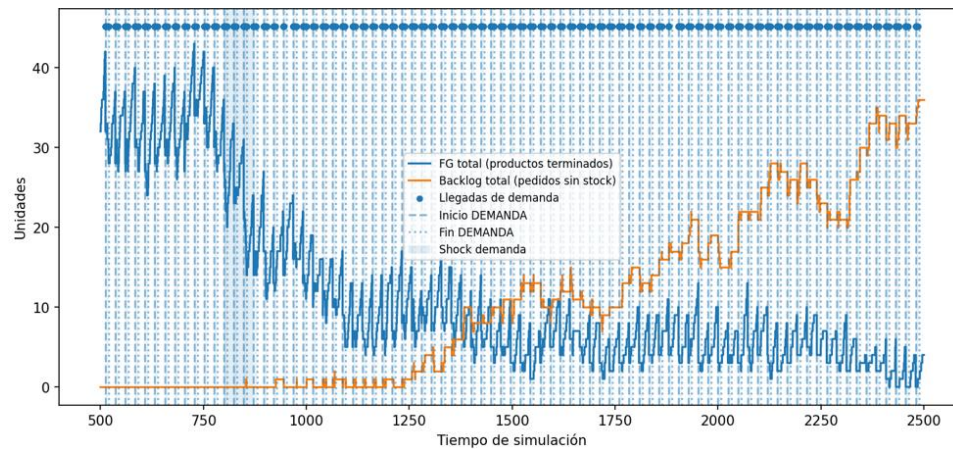


Ilustración 20: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 50% durante 72 Horas

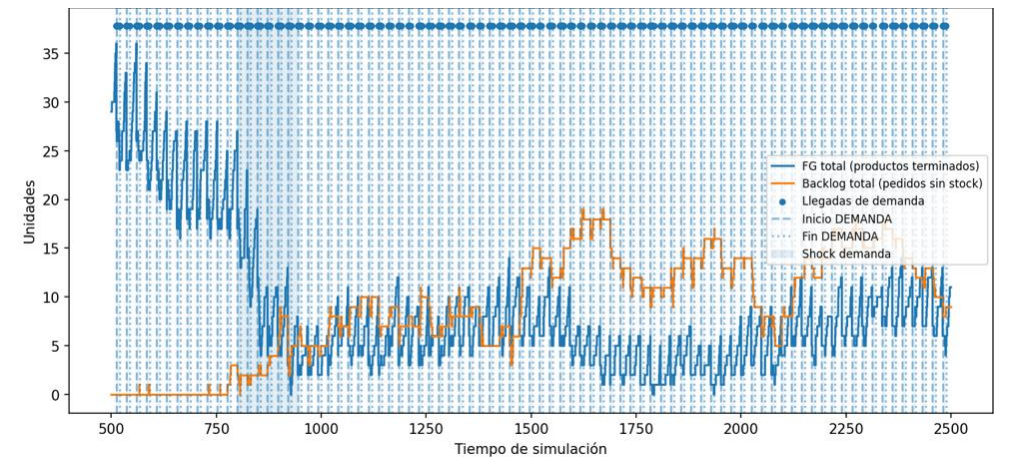


Ilustración 21: Escenario 4, Opción 2 con aumento de demanda 50% durante 144 Horas

## 7. CONCLUSIÓN

---

Después de haber realizado todas las simulaciones con diferentes escenarios y haber evaluado el comportamiento con los diferentes parámetros y características establecidas, podemos concluir que hemos encontrado varias formas de que la fábrica trabaje sin llegar a saturar y con un mínimo de satisfacción hacia el cliente.

Se ha administrado unos valores de control para que funcione correctamente tanto para cuando la fábrica esté trabajando el mismo tiempo que la tienda donde se recepciona y se entregan los pedidos, como para un tipo de fábrica que no se puede detener la maquinaria y trabaje 24 horas sin descanso con respecto a la tienda.

Hemos comprobado que ambos modelos serían capaces de soportar un pico de demanda momentáneo, aunque es recomendable ampliar el umbral de liberación de pedidos cuando se de estas circunstancias para lograr llegar a la estabilidad y trabajo normal en un tiempo más reducido y así evitar la insatisfacción de los clientes que esperan sus pedidos. Si no se realiza este cambio de umbral, los modelos no son capaces de soportar picos altos de demanda.

Comprobamos que ha sido todo un éxito la combinación de los tres modelos de control para un sistema de producción contra stock obteniendo evidencias de que su combinación genera una mejor estabilidad. A pesar de ello, se observa que el control WLC ha desempeñado un papel más significativo que el de las tarjetas POLCA. Aunque no debemos descartar la utilización de las tarjetas ya que si han generado un control de la variabilidad y congestión de las estaciones sobre todo cuando llegan varios pedidos del mismo producto.

La elección de realizar el trabajo con el sistema SimPy del lenguaje de Python ha sido un acierto, ya que nos ha dado una facilidad, una vez creado el modelo, de reproducir con precisión y rapidez varias simulaciones a la vez, consiguiendo una gran cantidad de valores, tablas y gráficos de resultados.

## 8. REFERENCIAS

---

- Bokor, B., Seiringer, W., & Altendorfer, K. (2024). Integrating simulation budget management into Drum-Buffer-Rope: A study on parametrization and reducing computational effort. ARXIV.
- De Treville, S., & Antonakis, J. (2006). Could lean production job design be intrinsically motivating? Contextual, configurational, and levels-of-analysis issues. *Journal of Operations Management*, 24(2), 99–123.
- Disney, S. M., & Towill, D. R. (2003). The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 85(2), 199–215.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.
- Fredendall, L. D., Ojha, D., & Waller, W. (2010). Basic principles and simulation of a semiconductor manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 48(5), 1389–1408.
- García-Cutrín, J., & Rodríguez-García, C. (2024). Enhancing corporate sustainability through Just-In-Time (JIT) practices: A meta-analytic examination of financial performance outcomes. *Sustainability*, 16(10), 4025.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2008). *Factory Physics* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Land, M. J., & Gaalman, G. J. C. (1998). The performance of workload control concepts in job shops: Improving the release method. *International Journal of Production Economics*, 56–57, 347–364.
- Lödding, H. (2003). Decentralized WIP-oriented manufacturing control (DEWIP). *Production Planning & Control*, 14(1), 43–52.
- Lödding, H. (2013). *Handbook of Manufacturing Control: Fundamentals, Description,*

Configuration. Springer-Verlag.

Lödding, H. (2013). Due Date Based Order Release. En H. Lödding (Ed.), *Handbook of Manufacturing Control* (pp. 321-333). Springer.

Mojarro-Magaña, M., Olguín-Tiznado, J. E., García-Alcaraz, J. L., Camargo-Wilson, C., López-Barreras, J. A., & Pérez-López, R. J. (2018). Impact of the planning from the Kanban system on the company's operating benefits. *Sustainability*, 10(7), 2506.

NumPy Developers. (2024). *NumPy Reference Manual* (v1.26).

Orlicky, J. (1975). *Material Requirements Planning: The New Way of Life in Production and Inventory Management*. McGraw-Hill.

Pandas Development Team. (2024). *pandas: Powerful Python data analysis toolkit*.

Python Software Foundation. (2024). *SimPy: Discrete-Event Simulation for Python* (v4.1).

Radăşanu, A. C. (2017). Inventory management, service level and safety stock. *Journal of Public Administration, Finance and Law*, 9, XX-XX.

Ryan, S. M., & Choobineh, F. (2003). Total WIP and WIP mix for a CONWIP controlled job shop. *IIE Transactions*, 35(5), 449-462.

Schmidt, C. G., Lödding, H., & Wiendahl, H.-P. (2012). Rapid modelling of manufacturing systems using performance figures. *CIRP Annals*, 61(1), 431–434.

Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Stevenson, M., & Thürer, M. (2018). Workload Control (WLC) in job shops: A review and classification of approaches. *Production Planning & Control*, 29(7), 551–567.

Stevenson, M., Thürer, M., & Protzman, C. (2019). *POLCA and Workload Control*:

- Coordination mechanisms for high-mix, low-volume production. *Production Planning & Control*, 30(9), 713–728.
- Sum, C. C., & Yang, K. K. (1993). A study on Manufacturing Resource Planning (MRP II) practices in Singapore. *Omega*, 21(2), 187-197.
- Suri, R. (1998). *Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times*. Productivity Press.
- Suri, R., & Krishnamurthy, A. (2003). How to plan and control POLCA: A card-based system for high-variety, low-volume environments. *Proceedings of the 16th International Conference on Production Research*.
- Thürer, M., Land, M. J., Stevenson, M., & Fredendall, L. D. (2015). COBACABANA (Control of Balance by Card Based Navigation): An alternative to Kanban in the pure flow shop? *International Journal of Production Economics*, 166, 143-151.
- Thürer, M., Land, M. J., & Stevenson, M. (2016). On the integration of Workload Control and POLCA. *International Journal of Production Research*, 54(4), 1081-1099.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Protzman, C. W. (2016). Card-based production control: A review of the control mechanisms underpinning Kanban, ConWIP, POLCA and COBACABANA systems. *Production Planning & Control*, 27(15), 1219-1238.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Protzman, C. W. (2025). Control del flujo de materiales en sistemas de producción contra stock: Evaluación de la generación, liberación y autorización de producción mediante simulación. *Universidad de Aveiro*.
- Thürer, M., & Stevenson, M. (2015). Workload Control in job shops: Literature review, trends, and future research directions. *International Journal of Production Research*, 53(23), 6926-6956.

- Towill, D. R. (1997). The influence of system dynamics on manufacturing management systems design. *International Journal of Production Research*, 35(6), 1577-1599.
- Yan, H., Stevenson, M., Hendry, L. C., & Land, M. J. (2016). Load-Oriented Order Release (LOOR) revisited: Bringing it back to the state of the art. *Production Planning & Control*, 27(13), 1078-1091.