



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**Trabajo Fin de Grado**

**CURSO 2019/20**

---

*SIMULACIÓN DE TALLERES HÍBRIDOS CON  
LIMITACIÓN DE RECURSOS PARA OBTENCIÓN DE  
PLANIFICACIONES OPTIMIZADAS UTILIZANDO  
REGLAS DE DESPACHO*

---

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**ALUMNO**

Óscar Manuel Castro Martínez

**TUTOR**

Alejandro García del Valle

**FECHA**

JULIO 2020

# 1 TÍTULO Y RESUMEN

## 1.1 Simulación de talleres híbridos con limitación de recursos para obtención de planificaciones optimizadas utilizando reglas de despacho

En el presente Trabajo Fin de Grado se lleva a cabo un estudio de la planificación de diferentes configuraciones en planta de procesos industriales utilizando reglas de despacho. Asimismo, se resalta la importancia de una buena planificación de la producción a la hora de conseguir ventajas comerciales en un mercado tan competitivo. Además, se realiza una introducción al mundo de la organización de la producción haciendo hincapié en la importancia de la simulación a la hora de realizar análisis como el que se lleva a cabo en este trabajo. Para realizar este estudio, se recurrirá a la experimentación de cuatro casos de posibles talleres de producción mediante simulación de eventos discretos con el *software FlexSim*.

## 1.2 Simulación de talleres híbridos con limitación de recursos para obtención de planificaciones optimizadas utilizando reglas de despacho

No presente Traballo Fin de Grao lévase a cabo un estudo da planificación de diferentes configuracións en planta de procesos industriais empregando regras de despacho. Así mesmo, resáltase a importancia dunha boa planificación da produción á hora de conseguir ventaxas comerciais nun mercado tan competitivo. Ademáis, realízase una introdución ao mundo da organización da produción facendo fincapé na importancia da simulación á hora de realizar análises como o que se leva a cabo neste traballo. Para realizar este estudo, recurrirase á experimentación de catro casos de posibles talleres de produción mediante simulación de eventos discretos co *software FlexSim*.

## 1.3 Simulation of hybrid workshops with limited resources to obtain optimized planning using dispatch rules

In the present Final Degree Project, a study of the planning of different configurations in an industrial process plant is carried out using dispatch rules. Likewise, the importance of good production planning in achieving commercial advantages in such a competitive market is highlighted. In addition, an introduction to the world of production organization is made, emphasizing the importance of simulation when carrying out analyzes such as the one carried out in this work. To carry out this study, four cases of possible production workshops will be experimented with by simulating discrete events with the FlexSim software.

## ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO: MEMORIA

ANEJO I: TABLAS DE RESULTADOS



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO  
CURSO 2019/20**

---

*SIMULACIÓN DE TALLERES HÍBRIDOS CON  
LIMITACIÓN DE RECURSOS PARA OBTENCIÓN DE  
PLANIFICACIONES OPTIMIZADAS UTILIZANDO  
REGLAS DE DESPACHO*

---

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**Documento**

**MEMORIA**

## ÍNDICE

1 Título y Resumen .....	2
1.1 Simulación de talleres híbridos con limitación de recursos para obtención de planificaciones optimizadas utilizando reglas de despacho .....	2
1.2 Simulación de talleres híbridos con limitación de recursos para obtención de planificaciones optimizadas utilizando reglas de despacho .....	2
1.3 Simulation of hybrid workshops with limited resources to obtain optimized planning using dispatch rules.....	2
2 Descripción y objetivos del proyecto.....	15
2.1 Definiciones y conceptos básicos.....	15
2.2 Importancia de la organización de la producción.....	18
2.3 Evolución de los sistemas de organización de la producción.....	18
2.4 Industria 4.0 .....	20
3 Estado del arte .....	22
3.1 Reglas de despacho.....	22
3.2 Reglas de asignación laboral .....	43
3.3 Conclusiones.....	48
4 Metodología.....	50
4.1 Diseño del proceso productivo .....	50
4.1.1 Estudio del trabajo .....	50
4.1.2 Simulación de procesos industriales .....	51
4.1.2.1 Sistemas y modelos de simulación .....	52
4.1.2.2 Etapas de un proyecto de simulación.....	54
4.1.2.3 <i>FlexSim</i> como herramienta de simulación.....	55
4.1.3 Distribución en planta.....	57
4.1.4 Tipos de producción de acuerdo con el producto y proceso.....	59
4.2 Clasificación del sistema productivo .....	60
4.3 Restricciones de procesamiento.....	62
4.4 Características del proceso básico del taller.....	63
4.5 Objetivos a optimizar .....	63
4.6 Problemas causados por los tiempos de cambio.....	64
4.6.1 Capacidad real de la máquina menor que la capacidad teórica.....	65
4.6.2 Superposición de cambios de máquinas .....	65
4.6.3 Dependencia de los tiempos de cambio con la secuencia.....	66
4.6.4 Sincronización entre máquinas .....	67
4.7 Reducción de los tiempos de cambio .....	68
5 Resultados y discusión.....	69

5.1 Parte I: Independencia de los tiempos de cambio .....	69
5.1.1 Caso 1 .....	69
5.1.1.1 Cálculo de la constante $K$ .....	71
5.1.1.2 Simulación del modelo .....	72
5.1.2 Caso 2 .....	76
5.1.2.1 Cálculo de la constante $K$ .....	81
5.1.2.2 Simulación del modelo .....	88
5.2 Parte II: Dependencia de los tiempos de cambio .....	102
5.2.1 Caso 3 .....	102
5.2.1.1 Cálculo de la constante $K$ .....	106
5.2.1.2 Simulación del modelo .....	112
5.2.2 Caso 4 .....	123
5.2.2.1 Cálculo de la constante $K$ .....	127
5.2.2.2 Simulación del modelo .....	132
6 Conclusiones.....	143
7 Referencias bibliográficas.....	147

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tiempo de cambio entre tareas.....	16
Figura 2: 9 pilares Industria 4.0. (Fuente: industria-4.blogspot.com).....	21
Figura 3: Intree and Outtree. (Fuente: Pinedo,2016).....	23
Figura 4: Tiempo de flujo y tardanza media con factor de utilización del 95%. (Fuente: Jayamohan & Rajendran, 2000) .....	32
Figura 5: Makespan. (Fuente: Sharma & Jain, 2014).....	42
Figura 6: Tiempos de flujo y tardanzas medias y máximas. (Fuente: Sharma & Jain, 2014) .....	42
Figura 7: Número de trabajos tardíos. (Fuente: Sharma & Jain, 2014) .....	43
Figura 8: Distribución Taller. (Fuente: Treleven & Elvers, 1985) .....	44
Figura 9: Interfaz usuario <i>FlexSim</i> . (Fuente: www.flexsim.com/es/) .....	56
Figura 10: Distribución en cadena simple. (Fuente: Suñé, Gil y Arcusa, 2004) .....	58
Figura 11: Disposición en forma de U.....	59
Figura 12: Ejemplo superposición de cambio de máquinas.....	66
Figura 13: <i>Flow shop</i> de dos etapas .....	67
Figura 14: Planificación de los trabajos <i>J1</i> y <i>J2</i> representados en un diagrama de Gantt .....	67
Figura 15: Esquema del Caso 1.....	69
Figura 16: Esquema del Caso 1 en <i>FlexSim</i> .....	70
Figura 17: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho y del factor de rigidez <i>k</i> .....	72
Figura 18: Tardanza media en función de la regla de despacho y del factor de rigidez <i>k</i> .....	73
Figura 19: Tardanza máxima en función de la regla de despacho escogida y del factor de rigidez <i>k</i> .....	74
Figura 20: Tiempo de flujo medio en función de la regla de despacho escogida y del factor de rigidez <i>k</i> .....	74
Figura 21: Tiempo de flujo máximo en función de la regla de despacho escogida y del factor de rigidez <i>k</i> .....	75
Figura 22: <i>Layout</i> del proceso del Caso 2.....	76
Figura 23: <i>Layout</i> del proceso del Caso 2 en <i>FlexSim</i> sin conexiones.....	76
Figura 24: Valores de <i>K</i> que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN2-SQ-k2 .....	83
Figura 25: Valores de <i>K</i> que minimizan la tardanza media en la regla ATC-WHN2-SQ-k2.....	84
Figura 26: Valor de <i>K</i> que minimiza el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN2-SQ-k3.....	85

Figura 27: Valor de $K$ que minimiza la tardanza media en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k3 .....	85
Figura 28: Valor de $K$ que minimiza el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN4-SQ-k2.....	86
Figura 29: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3.....	87
Figura 30: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-SQ .....	88
Figura 31: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-LNGQ.....	88
Figura 32: Número de trabajos retrasados para diferentes reglas de despacho en función de las lógicas "WHR" en la variante "WHN1-k2" .....	89
Figura 33: Número de trabajos retrasados para diferentes reglas de despacho en función de las lógicas "WHR" en la variante "WHN2-k2" .....	89
Figura 34: Distancia recorrida por operario en función de la zona de trabajo y la regla "WHR" .....	90
Figura 35: Tardanza media en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes reglas "WHR" en la variante "WHN4-k2" .....	90
Figura 36: Tardanza máxima en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes reglas "WHR" en la variante "WHN4-k2" .....	91
Figura 37: Tiempo de flujo medio en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes reglas "WHR" en la variante "WHN1-k2" .....	91
Figura 38: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes variantes "WHN" .....	92
Figura 39: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en las diferentes variantes de las reglas "WHN" .....	92
Figura 40: Tiempo de flujo medio para las diferentes reglas de despacho en función de las variantes "WHN" .....	93
Figura 41: Tiempo de flujo máximo para las diferentes reglas de despacho en función de las variantes "WHN" .....	93
Figura 42: Distancia recorrida por operario en las diferentes zonas de trabajo en función de las variantes "WHN" .....	94
Figura 43: Número de trabajos retrasados en función de las reglas aplicadas y el factor de rigidez en la variante WHN1-SQ .....	95
Figura 44: Distancia recorrida por operario según la zona de trabajo para las diferentes reglas de despacho en la variante WHN1-LNGQ-k2.....	96
Figura 45: Número de trabajos retrasados en función de la desviación típica en la regla FIFO-WHN1-SQ-k2 .....	98
Figura 46: Distancias recorridas por los operarios en función de las zonas de trabajo y de la desviación típica en la regla FIFO-WHN1-SQ-k2 .....	98
Figura 47: <i>Layout</i> del proceso del Caso 3.....	102
Figura 48: <i>Layout</i> del proceso del Caso 3 en <i>FlexSim</i> sin conexiones.....	102
Figura 49: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajo retrasados en la regla ATC-WHN1-SQ-k2.....	107



Figura 50: Valor de $K$ que minimiza la tardanza media en la regla ATC-WHN2-SQ-k3 .....	109
Figura 51: Valor de $K$ que minimiza el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k3.....	110
Figura 52: Valor de $K$ que minimiza la tardanza media en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k3 .....	110
Figura 53: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-SQ .....	113
Figura 54: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-LNGQ.....	113
Figura 55: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	114
Figura 56: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	114
Figura 57: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN2-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	115
Figura 58: Tiempo de flujo medio en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes reglas "WHR" .....	115
Figura 59: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes lógicas "WHN" .....	116
Figura 60: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante SQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	117
Figura 61: Tiempo de flujo medio en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	117
Figura 62: Tiempo de flujo máximo en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	118
Figura 63: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	119
Figura 64: Tardanza máxima en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	119
Figura 65: Distancia recorrida por operario en metros en las diferentes zonas de trabajo en función de las diferentes variantes "WHN" .....	120
Figura 66: <i>Layout</i> del proceso del Caso 4.....	123
Figura 67: <i>Layout</i> del Caso 4 en <i>FlexSim</i> sin conexiones .....	123
Figura 68: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN1-SQ-k3 .....	128
Figura 69: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-SQ modificando los valores del factor de rigidez $k$ .....	133
Figura 70: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-LNGQ modificando los valores del factor de rigidez $k$ .....	133
Figura 71: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	134
Figura 72: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	134

Figura 73: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN2-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	135
Figura 74: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	135
Figura 75: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN2-k2 para las diferentes variantes "WHR" .....	136
Figura 76: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada con la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	136
Figura 77: Tiempo de flujo medio en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	137
Figura 78: Tiempo de flujo máximo en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	137
Figura 79: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	138
Figura 80: Tardanza máxima en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	139
Figura 81: Distancia recorrida en metros por operario en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN" .....	139

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Evolución del mercado. Fuente: (Cuatrecasas,2009) .....	19
Tabla 2: Reglas de despacho con mejores resultados. (Fuente: Vinod &Sridharan, 2008) .....	28
Tabla 3: Comparación de escenarios de colaboración. (Fuente: Vargas & Montoya, 2012) .....	39
Tabla 4: Aspectos que se pueden conseguir conociendo los tiempos del proceso. (Fuente: Suñé, Gil y Arcusa, 2004).....	51
Tabla 5: Tabla resumen de las etapas de un proyecto de simulación. (Fuente: Guasch, Piera, Casanovas & Figueras, 2002) .....	55
Tabla 6: Ejemplo de los tiempos de cambio dependientes de la secuencia de pintura escogida .....	66
Tabla 7: Tiempos de procesamiento y tiempo máximo de finalización por trabajos y máquina.....	71
Tabla 8: Número de trabajos retrasados y tardanza media en función del valor de la constante $k$ en la regla ATC- $k_2$ .....	71
Tabla 9: Número de trabajos retrasados y tardanza media en función del valor de la constante $k$ en la regla ATC- $k_3$ .....	72
Tabla 10: Tabla resumen con los factores de utilización de las 5 máquinas .....	75
Tabla 11: Medias y desviaciones dependientes de la máquina y del tipo de trabajo ...	78
Tabla 12: Tiempos de procesamiento totales dependiendo del tipo de trabajo .....	78
Tabla 13: Tiempos máximos de finalización en función del tipo de trabajo en segundos .....	79
Tabla 14: Tiempos de procesamiento totales modificados .....	79
Tabla 15: Tiempos máximos de finalización modificados .....	79
Tabla 16: Resultados de los escenarios para determinar el número de trabajadores por zona.....	80
Tabla 17: Número de trabajos retrasados y tardanza media para diferentes valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-SQ- $k_2$ .....	82
Tabla 18: Número de trabajos retrasados y tardanza media para diferentes valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-LNGQ- $k_2$ .....	82
Tabla 19: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-SQ- $k_3$ .....	82
Tabla 20: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-LNGQ- $k_3$ .....	83
Tabla 21: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN2-SQ- $k_2$ .....	84
Tabla 22: Número de trabajos retrasados y tardanza media para diferentes valores de $K$ en la regla ATC-WHN2-LNGQ- $k_2$ .....	84
Tabla 23: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHNN4-LNGQ- $k_2$ .....	86

Tabla 24: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN4-SQ-k3 .....	86
Tabla 25: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de $K$ en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3 .....	87
Tabla 26: Tabla resumen con los valores de la constante $K$ para las diferentes variantes de la regla ATC.....	87
Tabla 27: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 2$ .....	94
Tabla 28: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 3$ .....	95
Tabla 29: Tabla resumen con los factores de utilización de las diferentes máquinas ..	97
Tabla 30: Tabla resumen con la ocupación de los operadores según su zona de trabajo .....	97
Tabla 31: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 2$ y $\sigma = 1$ .....	99
Tabla 32: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 3$ y $\sigma = 1$ .....	99
Tabla 33: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 2$ y $\sigma = 2$ .....	99
Tabla 34: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 3$ y $\sigma = 2$ .....	100
Tabla 35: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 2$ y $\sigma = 3$ .....	100
Tabla 36: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez $k = 3$ y $\sigma = 3$ .....	100
Tabla 37: Regla que consigue minimizar el número de trabajos retrasados en función del factor de rigidez $k$ y la desviación típica $\sigma$ .....	101
Tabla 38: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de cambio en el caso 3.....	103
Tabla 39: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de procesamiento dependientes de la máquina y del tipo de trabajo .....	104
Tabla 40: Tiempos de procesamiento totales caso 3 .....	104
Tabla 41: Tiempos máximos de finalización en el caso 3.....	105
Tabla 42: Número de trabajos retrasados en función del número de operarios por zona .....	105
Tabla 43: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN1-SQ-k2 .....	107
Tabla 44: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k2.....	107
Tabla 45: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN1-SQ-k3 .....	108
Tabla 46: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k3.....	108
Tabla 47: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN2-SQ-k2 .....	109

Tabla 48: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k2.....	109
Tabla 49: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN4-SQ-k2 .....	110
Tabla 50: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla AT-WHN4-LNGQ-k2 .....	111
Tabla 51: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN4-SQ-k3 .....	111
Tabla 52: Valores de $K$ que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3.....	112
Tabla 53: Tabla resumen con los valores de la constante $K$ en función de la variante de la regla ATC aplicada.....	112
Tabla 54: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 3 con un factor de rigidez $k=2$ .....	121
Tabla 55: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 3 con un factor de rigidez $k=3$ .....	121
Tabla 56: Factores de utilización de las diferentes máquinas empleadas en el Caso 3 .....	122
Tabla 57: Factores de utilización de las zonas de trabajo en el caso 3 .....	123
Tabla 58: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de cambio en el caso 3.....	124
Tabla 59: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de procesamiento dependientes de la máquina y del tipo de trabajo en el Caso 4.....	125
Tabla 60: Tiempos de procesamiento total modificados en el Caso 4.....	125
Tabla 61: Tiempos máximos de finalización en el Caso 4 .....	126
Tabla 62: Número de trabajos retrasados en función del número de operarios por zona de trabajo.....	126
Tabla 63: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-SQ-k2 .....	127
Tabla 64: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k2.....	127
Tabla 65: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-SQ-k3 .....	128
Tabla 66: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k3.....	128
Tabla 67: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN2-SQ-k2 .....	129
Tabla 68: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k2.....	129
Tabla 69: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN2-SQ-k3 .....	129
Tabla 70: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k3.....	130
Tabla 71: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante $K$ en la regla ATC-WHN4-SQ-k2 .....	130

Tabla 72: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k2.....	130
Tabla 73: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN4-SQ-k3 .....	131
Tabla 74: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3.....	131
Tabla 75: Tabla resumen con todos los posibles valores de la constante K en función de la variante ATC escogida en el caso 4.....	132
Tabla 76: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 4 con un factor de rigidez $k = 2$ .....	140
Tabla 77: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 4 con un factor de rigidez $k = 3$ .....	141
Tabla 78: Factores de utilización de las diferentes máquinas del Caso 4.....	142
Tabla 79: Porcentaje de ocupación de los operarios en el Caso 4.....	142
Tabla 80: Tabla resumen con la regla que debe aplicarse en cada tipo de distribución en función del parámetro deseado con un factor de rigidez $k = 2$ .....	146
Tabla 81: Tabla resumen con la regla que debe aplicarse en cada tipo de distribución en función del parámetro deseado con un factor de rigidez $k = 3$ .....	146

## 2 DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

La planificación detallada de la producción en talleres híbridos como pueden ser los Astilleros y empresas de mecanizado es un problema de gran complejidad y su solución tiene un gran impacto en la eficiencia productiva. En el entorno de la Industria 4.0 la Simulación de Eventos Discretos permite junto con los motores de optimización obtener planificaciones “cuasióptimas” para las distintas configuraciones en planta de las instalaciones de estos talleres.

El objetivo de este proyecto consiste en simular diferentes distribuciones en planta de instalaciones de talleres y analizar las planificaciones obtenidas empleando diferentes reglas de despacho para un conjunto de trabajos procesados en ellas: se evaluará cuál es la mejor regla de despacho en función de la distribución en planta, los márgenes con respecto a los plazos de entrega y otros indicadores clave del sistema.

A lo largo de este primer capítulo, se hará una introducción al mundo de la organización industrial, la importancia de éste y, como se ha llegado a los sistemas de gestión y organización actuales.

### 2.1 Definiciones y conceptos básicos

A continuación, se explicarán una serie de conceptos importantes que nos ayudarán a comprender mejor la lectura posterior. Estas explicaciones podemos encontrarlas en libros y textos como (Cuatrecasas, 2009), (García, 1984) y (Suñé, Gil & Arcusa, 2004).

**Producción:** actividad económica cuyo objetivo es la obtención de uno o más productos o servicios para satisfacer las necesidades de los consumidores. Se lleva a cabo en un sistema productivo.

**Sistema productivo:** Los elementos que lo componen son el con el conjunto de medios humanos y materiales, el proceso de producción en sí mismo, entendido como elemento central del sistema y el producto o servicio que se quiere conseguir.

**Valor añadido:** diferencia entre el valor del producto obtenido y el valor de los materiales y productos para fabricar dicho producto.

**Valor del producto final:** lo determina el cliente con el precio que está dispuesto a pagar por ello.

**Cadena de valor:** cada producto es el resultado de un proceso, pero dicho producto final, es un factor del proceso de consecución de otro producto.

**Programación:** Asignación del comienzo y tiempo de finalización de los trabajos, operarios y equipos.

**Secuenciación:** Determinar el orden en el que se hacen los trabajos.

**Operación:** tarea elemental que realiza una máquina

**Trabajo:** conjunto de operaciones relacionadas entre sí.

**Ruta:** orden de las operaciones para ejecutar un trabajo.

**Fecha de llegada ( $r_j$ ):** instante en el que un trabajo llega al taller.

**Fecha de entrega ( $d_j$ ):** instante de tiempo en el que hay que entregar el trabajo al cliente.

La diferencia entre la fecha de entrega y la fecha de llegada es el tiempo máximo que tenemos para procesar el trabajo.

**Fecha de finalización:** instante en el que se acaba la última operación de la que consta el trabajo.

**Tiempo de flujo:** tiempo que un determinado producto está en el taller.

$$\text{Tiempo de flujo} = \text{Fecha de finalización} - \text{Fecha de llegada}$$

**Takt time ( $TT$ ):** cadencia a la cual deberíamos producir para satisfacer la demanda del cliente. Se mide en unidades de tiempo.

**Tiempo de ciclo ( $T_c$ ):** tiempo que transcurre entre la producción de dos unidades consecutivos del proceso productivo.

- $T_c < TT$  capacidad superior a la demandada.
- $T_c > TT$  no se alcanza la cantidad demandada.
- $T_c = TT$  se produce exactamente al ritmo de mercado.

Lo que se busca siempre es  $T_c \leq TT$ .

**Cambio de máquina o preparación de la máquina:** conjunto de tareas y operaciones que se realizan en la máquina desde que se termina de procesar un tipo de trabajo y se comienza a procesar un tipo de trabajo diferente. El tiempo total de cambio o de configuración es la suma del tiempo de preparación del cambio y el tiempo de cambio.

- Tiempo de preparación del cambio: tiempo destinado al conjunto de tareas que un operario debe realizar para obtener los elementos necesarios para procesar el siguiente trabajo programado (herramientas, materias primas...). La preparación del cambio solo requiere un recurso (el operario), pues puede llevarse a cabo mientras la máquina está procesando el trabajo anterior.
- Tiempo de cambio: tiempo en llevar a cabo las operaciones necesarias para comenzar a procesar un trabajo diferente.

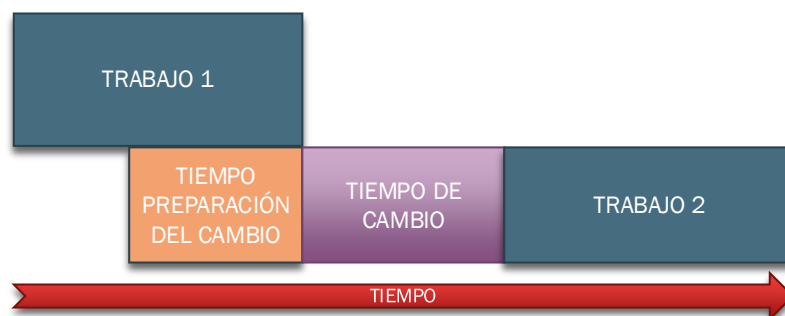


Figura 1: Tiempo de cambio entre tareas

**Tiempo de procesamiento ( $p_{ij}$ ):** intervalo de tiempo que se tarda en realizar un determinado trabajo. En este caso  $p_{ij}$  hace referencia al tiempo de procesamiento del trabajo  $j$  en la máquina  $i$ .

Si el trabajo consiste en un lote de piezas, el tiempo de procesamiento consistirá en el tiempo total que tarda la máquina en realizar las tareas de todas las piezas que conforman el lote. En estos casos:



$$p = \frac{q}{v}$$

Donde:

- $p$  tiempo de procesamiento (UD de tiempo)
- $q$  tamaño del lote (UD de artículo)
- $v$  velocidad de procesamiento de la máquina (UD artículo/UD de tiempo)

Durante este intervalo de tiempo podemos emplear un recurso (máquina) o dos (máquina y operario) dependiendo de si el proceso está automatizado.

**Tiempo de ejecución:** suma de los tiempos de cambio y procesamiento.

**Tiempo muerto:** intervalo de tiempo que un recurso no está siendo utilizado.

- Tiempo muerto de una máquina ( $\theta$ ): suma de los tiempos de cambio y espera. En este trabajo se supondrá que una máquina solo puede estar en uno de estos tres estados al mismo tiempo:
  - Funcionamiento: llevando a cabo una operación.
  - Espera: la máquina se encuentra en espera de realizar un trabajo o de un operario para realizar un cambio de máquina.
  - Cambio: se está llevando a cabo un cambio de máquina.
- Tiempo muerto de un operario ( $\varphi$ ): suma de intervalos de tiempo en los cuales el operario se encuentra en espera. En este trabajo se supondrá que un operario solo podrá estar en cuatro estados:
  - Preparando un cambio de máquina.
  - Realizando un cambio de máquina.
  - Llevando a cabo una operación conjuntamente con la máquina.
  - Espera: no tiene ninguna tarea asignada.

**Horizonte de planificación ( $H$ ):** tiempo que abarca una planificación.

$$H = \sum_{i=1}^n (s_i + p_i) + \theta$$

Siendo:

- $s_i$  tiempo de cambio de la  $i$ -ésima operación.
- $p_i$  tiempo de procesamiento de la  $i$ -ésima operación.
- $n$  número de operaciones.

Cuando existe un operario dedicado exclusivamente a la máquina, el horizonte de planificación también puede expresarse como:

$$H = \sum_{i=1}^n (s_i + \tau_i) + \varphi$$

Siendo:

- $\tau_i$  tiempo de preparación del cambio para la  $i$ -ésima operación.

**Factor de utilización:** porcentaje del tiempo que un recurso ha sido utilizado.

- Factor de utilización de una máquina (UM):

$$UM = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{H}$$

- Factor de utilización de un operario (UO):

$$UO = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i + \tau_i)}{H}$$

## 2.2 Importancia de la organización de la producción

El diseño de procesos de producción supone una gran problemática, dado que un correcto planteamiento y una solución satisfactoria son de vital importancia para la empresa. Esta, quiere conseguir una ventaja competitiva mediante unos productos que satisfagan las necesidades, con una máxima calidad y un coste y tiempos de procesamiento mínimos.

Actualmente, el área de producción es uno de los aspectos claves a la hora de elaborar una estrategia empresarial, siempre intentando conseguir una ventaja frente a los competidores. Los procesos de producción son aquellos donde la empresa puede conseguir un mayor beneficio. Con la estrategia adecuada, pueden alcanzarse grandes niveles de eficiencia y por tanto de competitividad. (Cuatrecasas, 2009)

## 2.3 Evolución de los sistemas de organización de la producción

La actividad productiva de cualquier empresa debe estar organizada de manera que puedan lograrse los objetivos previstos, obteniendo el producto o servicio deseado, con la mayor calidad posible, y con unos costes tanto de tiempo como de materiales mínimos.

Si podemos obtener un producto con una calidad aceptable, pero con un coste superior a lo admisible, dicho proceso se descartará. Sin embargo, los aspectos económicos no siempre han tenido relevancia. De hecho, hasta principios del siglo XX, con la introducción del método científico en la organización del trabajo, los responsables de la producción se centraban en obtener productos mejores, pero sin pararse en aspectos clave como los tiempos de producción, el coste, etc.

Los primeros ingenieros propiciaron el desarrollo de la organización de la producción mediante el método científico, provocando una evolución con resultados más que favorables. Se considera que la era de la implantación de la organización y gestión de la producción fue iniciada por Frederick Winslow Taylor. El objetivo de Taylor era la investigación de la organización de procesos industriales, con el fin de lograr la máxima *economía de tiempos*.

Por otra parte, H. Fayol se centró mucho más en los aspectos de dirección, y en lo que hoy se conoce como *Management*.

Actualmente, tenemos que introducir un nuevo elemento que aumenta la complejidad de la organización de la producción: la internacionalización. Tras la continua

evolución de estos sistemas, existen dos grandes modelos de la organización de sistemas productivos:

- Producción en masa, siguiendo el enfoque tradicional del Taylorismo y Fordismo.
- *Lean manufacturing*, más concretamente el Sistema Productivo de Toyota (TPS), apoyado en dos componentes:
  - *Just In Time* (JIT): movimiento rápido y coordinado de piezas para cumplir con la demanda en el plazo previsto
  - *Jidoka*: humanización de la interfaz entre operador y máquina.

Este último sistema, es el más avanzado hoy en día, pues gestiona la producción con la mínima cantidad de recursos para cumplir con la demanda de los clientes.

A raíz de esto, implementar sistemas de producción eficientes y competitivos no es tarea sencilla en la actualidad, pues depende de que se alcancen objetivos como:

- Variedad de la gama de productos: Necesidad creciente de una mayor mezcla de productos y lotes más pequeños. Necesidad que obliga a las empresas a que un proceso permita obtener distintos productos con el mínimo tiempo de preparación posible.
- Flexibilidad: Los procesos productivos tienen que ser capaces de adaptarse a las fluctuaciones de la demanda manteniendo unos niveles de eficiencia competitivos.
- Rapidez de respuesta a la demanda y la flexibilidad
- Calidad: asegurar que los procesos puedan obtener un producto correcto.

Todos estos objetivos tienen que conseguirse con el problema añadido de tener unos costes mínimos y una máxima productividad, aspectos clave para la competitividad empresarial (Cuatrecasas, 2009).

A continuación, se adjunta una tabla resumen de la evolución del mercado desde su situación inicial hasta la situación actual:

**Tabla 1: Evolución del mercado. Fuente: (Cuatrecasas,2009)**

Situación inicial	Situación actual
Mercados en expansión	Exceso de oferta sobre demanda
Gama de producto restringida	Gran variedad de producto
Alta normalización del producto	Nivel elevado de personalización
Calidad: un factor más	Calidad total, condición previa
Cliente poco exigente	Cientes muy exigentes
Plazos de entrega sencillos	Plazos de entrega muy cortos
Servicio postventa no relevante	Gran importancia de todo servicio anexo
Ciclo de vida largo	Ciclo de vida cada vez más corto

## 2.4 Industria 4.0

La industria 4.0 es considerada la cuarta revolución industrial. La primera revolución industrial apareció con la máquina de vapor en la segunda mitad del siglo XVIII. La segunda revolución apareció 100 años más tarde con la generación de energía eléctrica y la producción en masa. La tercera se inició en los años 70 con la automatización de los procesos industriales. Actualmente, estamos inmersos en la cuarta revolución industrial, gracias a la informatización y digitalización de la producción (Basco, Beliz, Coatz & Garnero, 2018).

En el entorno actual, con el continuo desarrollo tecnológico, las empresas se ven obligadas a adaptar sus procesos. La industria 4.0 es parte de esta transformación, donde las tecnologías de fabricación e información son aspectos clave para proponer productos con un mayor valor para los clientes (Ynzunza, Izar & Bocarando, 2017).

Según (Rüßmann, Lorenz, Gerbert & Waldner, 2015), la industria 4.0 se fundamenta en 9 pilares básicos:

- **Big Data y análisis:** El análisis basado en grandes conjuntos de datos optimiza la calidad de la producción, ahorra energía y mejora el servicio. De este modo, la recopilación y evaluación de datos de muchas fuentes diferentes se convertirán en un estándar para apoyar la toma de decisiones en tiempo real.
- **Robots autónomos:** Los fabricantes de diversos tipos de industrias han empleado desde hace varios años robots para abordar tareas complejas. Actualmente se busca la robótica colaborativa, robots más autónomos y capaces de interactuar entre ellos.
- **Simulación:** Se trata de tener un modelo virtual de la factoría real, de modo que se aprovecharían datos en tiempo real para llevar a cabo simulaciones que puedan incluir máquinas, productos y personas. Esto permite evaluar ciertos cambios en el mundo virtual antes de pasar al mundo físico.
- **Integración horizontal y vertical:** Actualmente la mayoría de los sistemas no están completamente integrados. Con la industria 4.0 se pretende una mayor cohesión entre compañías, departamentos y funciones de modo que se consigan redes universales.
- **Internet de las Cosas (IoT):** Hoy en día son pocas las empresas fabricantes de máquinas y sensores que están conectadas a la red. Gracias a *Internet Of Things*, una mayor cantidad de dispositivos pueden comunicarse e interactuar entre ellos, además de tomar decisiones en tiempo real.
- **Ciberseguridad:** Con el aumento de las conectividades, aumentan las necesidades de proteger los sistemas de ataques informáticos. Es esencial disponer de comunicaciones fiables y seguras, así como de un adecuado sistema de gestión de accesos con verificación de identidades.
- **Computación en la nube:** Algunas empresas ya están utilizando software basado en la nube para algunas aplicaciones, pero con la llegada de la Industria 4.0, las empresas relacionadas con la producción demandarán un mayor intercambio de datos. Este incremento de la demanda propiciará un aumento del rendimiento de las tecnologías en la nube, logrando mejores tiempos de reacción.
- **Fabricación aditiva:** Las empresas están incorporando esta estrategia para producir pequeños lotes de productos personalizados con alguna ventaja constructiva. Métodos como la impresión 3D, se emplean para crear prototipos y componentes individuales. Además, los sistemas de fabricación aditiva y descentralizada de alto rendimiento permiten reducir las distancias de transporte y el stock disponible.

- **Realidad aumentada:** Los sistemas basados en realidad aumentada ofrecen una gran variedad de servicios, como el envío de instrucciones de reparación a dispositivos móviles o la selección de material de un almacén. Actualmente estos sistemas se encuentran en fase de desarrollo, las compañías usarán estas tecnologías, junto con la realidad virtual para proporcionar información en tiempo real a los trabajadores, mejorando la toma de decisiones y los procedimientos de trabajo.

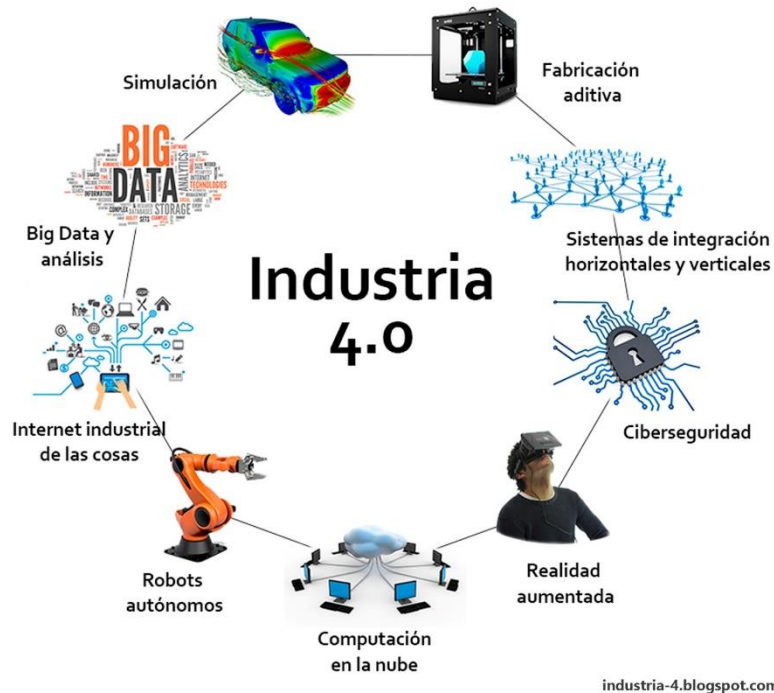


Figura 2: 9 pilares Industria 4.0. (Fuente: [industria-4.blogspot.com](http://industria-4.blogspot.com))

Por lo tanto, la Industria 4.0 consiste en aplicar las nuevas tecnologías en la industria, mejorando los tiempos de fabricación y proporcionando unos productos con una relación calidad-precio mucho mejor.

Este Trabajo Fin de Grado se centrará en los capítulos posteriores en el aspecto de la simulación que, como hemos visto, es uno de los pilares fundamentales de esta revolución industrial.

## 3 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se realizará la revisión bibliográfica de diferentes textos que han sido estudiados para la elaboración de este trabajo final de grado.

Se ha encontrado diversa bibliografía referida a la programación de la producción en talleres, no obstante, el número de textos en los cuales se tienen en cuenta los tiempos de cambio o la asignación laboral es mucho menor.

### 3.1 Reglas de despacho

A continuación, procederemos a analizar diversos textos que tienen en cuenta las reglas de despacho para la asignación de prioridades de los trabajos que entran en el taller. No todos los textos comentan las mismas reglas, ni analizan el mismo tipo de taller, por lo que hay que tenerlo en cuenta a la hora de extraer conclusiones.

Una referencia que debe aparecer en nuestra búsqueda, pues ha resultado de inspiración en diversos textos es (Pinedo, 2016). En él, se comentan diversas reglas de despacho en base a los problemas que queramos resolver, además comenta dos maneras de clasificar las reglas de prioridad. La primera clasificación radica en diferenciar entre reglas estáticas y reglas dinámicas. Las reglas estáticas se aplican a situaciones en las que todos los trabajos que se van a programar están disponibles al comienzo de la programación (tiempo cero). Por otra parte, las reglas dinámicas implican que los trabajos llegan al taller en diferentes momentos, por consiguiente, como la programación empieza con el trabajo o trabajos llegados en el instante cero, la programación de otros trabajos, debe tener en cuenta que no puede comenzar antes de la fecha de llegada.

Una segunda manera de clasificar las reglas de despacho es según en la información en la que se han basado. Una regla local utiliza solo información de la cola donde está esperando al trabajo o en la máquina donde está la cola. Una regla global puede emplear información sobre otras máquinas.

Seguidamente, se comentarán las reglas de prioridad más comunes que ha destacado el autor y continuaremos con las denominadas reglas de prioridad compuestas.

- SIRO (*Service In Random Order*): La secuencia de trabajos es aleatoria, y por tanto los resultados no serán muy buenos.
- EDD (*Earliest Due Date*): Ordena los trabajos en orden creciente de las fechas de entrega.
- MS (*Minimum Slack*): Es una regla dinámica que ordena los trabajos según la ecuación:

$$\max(d_j - p_j - t, 0)$$

Siendo:

- $d_j$  representa la fecha de entrega establecida del trabajo  $j$ . Esa fecha puede no cumplirse, pero se incurriría una penalización. Si la fecha debiese cumplirse se denotaría como  $\bar{d}_j$ .
- $p_j$  tiempo de procesamiento restante del trabajo  $j$ .
- $t$  tiempo actual.

- SPT (*Shortest Processing Time*): escoge como próximo trabajo aquel con el tiempo de procesamiento más corto. Minimiza el tiempo total de finalización.
- WSPT (*Weighted Shortest Processing Time*). De acuerdo con esta regla, los trabajos se ordenan en orden decreciente de:

$$\sum w_j C_j$$

Siendo:

- $w_j$  peso del trabajo  $j$ . Es un índice que indica la prioridad del trabajo  $j$  sobre otros.
- $C_j$  tiempo de finalización del trabajo  $j$ .

- LPT (*Longest Processing Time*): Escoge como próximo trabajo aquel con el tiempo de procesamiento más largo. Este método busca colocar los trabajos más cortos al final de cronograma para intentar equilibrar la carga.
- CP (*Critical Path*): Proporciona máxima prioridad al trabajo al frente de la cadena más larga de trabajos. Si presentamos los trabajos en un diagrama en forma de árbol, el trabajo único sin ningún sucesor se llama raíz, y se ubica en el nivel 1. Los trabajos inmediatamente antes de la raíz están en el nivel 2, los inmediatamente antes del nivel 2, son los del nivel 3 y así sucesivamente. La regla CP significa que se escoge primero el trabajo con mayor nivel.

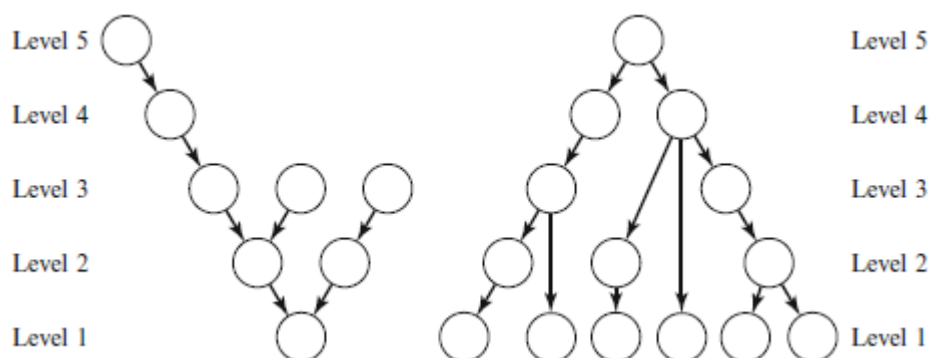


Figura 3: Intree and Outtree. (Fuente: Pinedo,2016)

- LNS (*Largest Number of Successors*): Tiene prioridad el trabajo con mayor número total de sucesores, no necesariamente inmediatos. En el caso de un intree, la regla LNS coincide con la regla CP.

- SST (*Shortest Setup Time*): Esta regla implica que cuando un trabajo termina, se selecciona como siguiente, el trabajo con menor tiempo de preparación.
- LFJ (*Least Flexible Job*) La regla LFJ selecciona, cada vez que una máquina queda libre, el trabajo que se pueda procesar en un menor número de máquinas, es decir, el trabajo menos flexible. No se especifica que máquina debe escogerse primero cuando hay varias máquinas libres al mismo tiempo.
- LAPT (*Longest Alternate Processing Time*): El autor presenta el caso de que existen 2 máquinas y que los trabajos tienen que pasar por ambas. La regla consiste en que cada vez que una máquina se libera, se comienza a procesar, entre los trabajos que aún no ha recibido procesamiento de ninguna de las dos máquinas, aquel cuyo tiempo de procesamiento en la otra máquina sea mayor. De este modo se intentan reducir los tiempos muertos y por tanto el *makespan*. En el caso de que las dos máquinas estén inactivas, puede ocurrir que un trabajo sea apto para ser procesado en ambas máquinas. En este caso, no importa en cual empieza a procesarse primero.
- SQ (*Shortest Queue*): Si suponemos un conjunto de máquinas en paralelo, cada una con su propia cola. Se comenzará a trabajar primero en la máquina con la cola más corta. Es una forma de equilibrar el contenido de las diferentes máquinas y no bloquear aquellas máquinas que tienen ya de por sí una cola grande en espera de ser procesada.

Las reglas de despacho son frecuentemente empleadas para encontrar buenas soluciones con respecto a objetivos específicos, como el tiempo de procesamiento, el *makespan*, o la tardanza. Sin embargo, a menudo los objetivos son más complejos, pues no basta con minimizar sólo un parámetro. Por ello, existen reglas de despacho más elaboradas, aunque algunas simplemente son una combinación de las mencionadas anteriormente.

- Reglas de despacho compuestas

Una regla de despacho compuesta combina reglas elementales. Una regla elemental es función de los atributos, de los trabajos y de las máquinas. Un atributo es una propiedad asociada con el trabajo o con la máquina que puede ser constante o dependiente del tiempo, como por ejemplo el tiempo de procesamiento, la fecha de entrega...

La regla ATC (coste aparente de la tardanza) combina la regla WSPT y la regla MS. Cada vez que la máquina queda libre, se calcula un índice de clasificación para cada trabajo restante. Se selecciona el trabajo con un índice mayor.

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} e^{-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K\bar{p}}}$$

Donde  $K$  es un parámetro de escala que puede determinarse empíricamente y  $\bar{p}$  es el promedio de los tiempos de procesamiento en la máquina de los trabajos restantes en la cola.

Si el valor de  $K$  es muy grande, la expresión anterior nos conduce a la regla WSPT, mientras que, si  $K$  es muy pequeño, la regla se reduce a la regla MS cuando no hay trabajos atrasados y a la regla WSPT para trabajos atrasados. El valor de este parámetro de escala debe de ser el apropiado para obtener buenos resultados. Esto



puede determinarse mediante el optimizador del software de simulación. El factor de estanqueidad de la fecha de vencimiento  $\tau$  se escribe como:

$$\tau = 1 - \frac{\sum d_j}{nC_{max}}$$

Donde:

$(\sum d_j)/n$  promedio de las fechas de vencimiento. Los valores de  $\tau$  cercanos a uno indican que las fechas de vencimiento son ajustadas, mientras que los valores próximos a 0 indican que hay holgura.

$C_{max}$  *makespan*

$n$  número de puestos de trabajo.

Otro factor importante para el cálculo de  $K$  es el factor del rango de fecha de vencimiento  $R$

$$R = \frac{d_{max} - d_{min}}{C_{max}}$$

Valores altos de  $R$  nos indican que tenemos un amplio rango de fechas de vencimiento, mientras que valores altos nos indican un rango estrecho. Se ha determinado tras numerosas investigaciones que existe una relación con los factores  $R$  y  $\tau$  a la hora de determinar el parámetro  $K$ .

Cuando se desea minimizar  $\sum w_j T_j$  (siendo  $T_j$  la tardanza del trabajo  $j$ ), primero hay que caracterizar el problema a través de los dos factores anteriores. A continuación, se calcularía el parámetro  $K$  y con este aplicaríamos la regla ATC.

A raíz de la regla ATC, han surgido otras como la ATCS (Coste Aparente de la Tardanza con preparaciones). De nuevo, se quiere minimizar la tardanza ponderada total, pero ahora con trabajos sujetos a una secuencia dependiente del tiempo de configuración. La regla ATCS combina la regla WSPT, la MS y la regla SST. La regla calcula el índice del trabajo  $j$  en el momento  $t$  cuando el trabajo  $l$  ha completado su procesamiento en la máquina como:

$$I_j(t, l) = \frac{w_j}{p_j} e^{-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_1 \bar{p}}} \cdot e^{-\frac{s_{lj}}{K_2 \bar{s}}}$$

- $\bar{s}$  es el promedio de los tiempos de configuración de los trabajos restantes
- $K_1$  es el parámetro relacionado con la fecha de vencimiento
- $K_2$  es el parámetro relacionado con el tiempo de configuración

Tanto  $K_1$  como  $K_2$  son adimensionales y son función de tres factores:

- El factor de estanqueidad de la fecha de vencimiento  $\tau$
- El factor del rango de la fecha de vencimiento  $R$
- El factor de severidad del tiempo de configuración  $\eta = \frac{\bar{s}}{\bar{p}}$

Estas estadísticas ya no son tan sencillas de determinar como en el caso de la regla ATC, ya que ahora el *makespan* es dependiente de los tiempos de configuración. Por ello, antes de calcular los factores  $R$  y  $\tau$  tenemos que llevar a cabo una estimación del *makespan*.

$$C_{max} = \sum_{j=1}^n p_j + n\bar{s}$$

Los factores  $R$  y  $\tau$  deberán modificarse para emplear esta nueva estimación.

En (Vinod & Sridharan, 2008) se estudia el comportamiento de un *job shop* con dependencia de los tiempos de cambio mediante 7 reglas de despacho clásicas y 5 nuevas reglas.

La terminología aplicada para la explicación de las reglas es la que sigue:

- $m$  índice de la máquina
- $t$  tiempo en el que se calculan los valores de prioridad
- $i$  índice del trabajo
- $j$  índice de la operación del trabajo  $i$
- $k_i$  conjunto de operaciones a realizar de acuerdo con la ruta de trabajo  $i$
- $r_i^m$  hora de llegada del trabajo  $i$  a la máquina  $m$
- $N_m^t$  conjunto de trabajos en espera en la cola de la máquina  $m$  en el tiempo  $t$
- $s_{iq}$  tiempo de configuración (cambio) de la operación  $q$  del trabajo  $i$  en la máquina  $m$
  
- $p_{iq}$  tiempo de procesamiento de la operación  $q$  del trabajo  $i$  en la máquina  $m$
- $d_i$  fecha de entrega del trabajo  $i$
- $Z_i^t$  prioridad del trabajo  $i$  en el tiempo  $t$
- $i^*$  trabajo con la prioridad más alta

Reglas clásicas:

- FIFO (First In First Out): los trabajos se procesan en orden de llegada a la máquina.

$$Z_i^t = r_i^m$$
$$Z_{i^*}^t = \min(Z_i^t \mid i \in N_m^t)$$

- SPT (Shortest Processing Time): se selecciona el trabajo con menor tiempo de procesamiento.

$$Z_i^t = p_{iq}$$
$$Z_{i^*}^t = \min(Z_i^t \mid i \in N_m^t)$$

- EDD (Earliest Due Date): se selecciona el trabajo con fecha de entrega más reciente

$$Z_i^t = d_i$$

$$Z_{i^*}^t = \min(Z_i^t \mid i \in N_m^t)$$

- EMDD (Earliest Modified Due Date): se selecciona el trabajo con el valor de la fecha de entrega modificada más pequeño.

$$Z_i^t = \max\left(0, d_i - t - \sum_{q=j}^{ki} p_{iq}\right)$$

$$Z_{i^*}^t = \min(Z_i^t \mid i \in N_m^t)$$

- CR (Critical Ratio): se selecciona el trabajo con menor valor de relación crítica.

$$Z_i^t = \frac{d_i - t}{\sum_{q=j}^{ki} p_{iq}} = \frac{\text{Tiempo remanente}}{\text{Trabajo por hacer}} = \frac{\text{Fecha de entrega} - \text{Fecha actual}}{\text{Trabajo por hacer}}$$

$$Z_{i^*}^t = \min(Z_i^t \mid i \in N_m^t)$$

- SIMSET (Similar Setup): se selecciona el trabajo con menor tiempo de cambio o configuración.

$$Z_i^t = r_{ij}$$

$$Z_{i^*}^t = \min(Z_i^t \mid i \in N_m^t)$$

- JCR: se selecciona un trabajo idéntico al que se acaba de procesar. Si en la cola no hay un trabajo idéntico se escoge como siguiente aquel con la relación crítica más baja.

Reglas propuestas:

- SSPT: se selecciona el trabajo con menor valor de la suma del tiempo de cambio y el tiempo de procesamiento.

$$Z_i^t = p_{ij} + s_{ij}$$

$$Z_{i^*}^t = \min(Z_i^t \mid i \in N_m^t)$$

- JSPT: se selecciona un trabajo idéntico al que se acaba de procesar, en caso de no haber, se aplica la regla SPT.
- JEDD: se selecciona un trabajo idéntico al que se acaba de procesar, en caso de no haber, se aplica la regla EDD.
- JEMDD: se selecciona un trabajo idéntico al que se acaba de procesar, en caso de no haber, se aplica la regla EMDD.
- JSSPT: se selecciona un trabajo idéntico al que se acaba de procesar, en caso de no haber, se aplica la regla JSPT.

En este artículo se estudia el comportamiento ante el tiempo medio de flujo, la tardanza media, el tiempo medio de cambio o el número medio de cambios. Se ha estudiado en modelos diferentes aumentando los tiempos de cambio (20% al 40%), con diferentes tiempos entre llegadas de trabajos (27 o 28 minutos), con diferentes factores en la fecha de vencimiento y con diferentes factores de utilización (87% y 90%).

Entre las conclusiones que se pueden sacar de este estudio mencionaremos que la regla SPT es la que mejor funciona minimizando el tiempo de flujo medio con un tiempo de cambio del 20%. En cambio, si aumentamos este porcentaje, la regla SSPT aporta mejores resultados.

La regla SSPT vuelve a destacar en cuanto a la tardanza media, siendo la mejor en la mayoría de los casos.

En cuanto al tiempo medio de cambio, los mejores resultados los aporta la regla SIMSET, seguida de las reglas JSSPT y SSPT. Por otra parte, en cuanto al número medio de cambios, los valores más pequeños son proporcionados por la regla JCR.

Las reglas orientadas a los tiempos de cambio, como SSPT, JSPT, SIMSET, JEDD, JEMDD y JSSPT proporcionan mejores rendimientos. Esta diferencia se hace más notable al aumentar la carga de trabajos en el taller.

A continuación, se mostrará una tabla resumen donde podremos comprobar, tras 9 simulaciones, en cuantas ocasiones una regla ha obtenido los mejores resultados.

**Tabla 2: Reglas de despacho con mejores resultados. (Fuente: Vinod & Sridharan, 2008)**

	Regla de despacho	
	U=90%	U=87%
Tiempo medio de flujo	SSPT (6) SPT(3)	SSPT(6) SPT(3)
Tardanza media	SSPT(7) SPT(1) JEDD(1)	SSPT(4) SPT(3) JCR(1) JEMDD(1)
Tiempo medio de cambio	SIMSET(9)	SIMSET(9)
Número medio de cambios	JCR(7) JEDD(1) JEMDD(1)	JCR(6) JEMDD(2) JEDD(1)

Otro aspecto a destacar de este último texto es la utilización del método TWK (*Total Work Content*) para la asignación de las fechas de entrega. Con este método se establece la fecha de vencimiento de cada trabajo como la suma del tiempo de llegada y un múltiplo del tiempo total de procesamiento. Por lo tanto, la fecha de entrega de un trabajo se determina mediante la siguiente ecuación:

$$d_i = a_i + k(p_i + n_i \cdot \mu_s)$$

Siendo:

$d_i$	fecha de entrega del trabajo $i$
$a_i$	tiempo de llegada del trabajo $i$
$k$	factor de rigidez de la fecha de vencimiento
$p_i$	tiempo total de procesamiento del trabajo $i$
$n_i$	número de operaciones del trabajo $i$
$\mu_s$	tiempo de cambio medio

Un trabajo muy interesante es el de (Jayamohan & Rajendran, 2000) en el cual se estudia el comportamiento de diferentes reglas de despacho ante un *job shop* o un *flow shop*.

En el trabajo se analizan hasta 9 reglas de despacho tras contrastar sus resultados en diversa bibliografía, frente a 7 nuevas reglas de despacho propuestas por los autores del texto, con las que intentan cumplir una serie de requerimientos.

Antes de comenzar a analizar las reglas de despacho, comentan la terminología empleada que nos servirá para comprender mejor la lectura posterior.

$\tau$	hora a la que se toma la decisión
$T_{ij}$	tiempo de proceso para la operación $j$ del trabajo $i$
$m_i$	número total de operaciones en el trabajo $i$
$D_i$	fecha de entrega del trabajo $i$
$ODD_{ij}$	fecha de entrega operacional para la opción $j$ del trabajo $i$
$W_{i,j+1}$	contenido total de trabajos de todos los trabajos en la cola de la próxima operación del trabajo $i$
$A_i$	tiempo de llegada del trabajo $i$
$Z_i$	índice de prioridad del trabajo $i$ en el instante $\tau$ (se elige el trabajo con menor $Z_i$ )
$Z'_i$	índice de prioridad del trabajo $i$ en el instante $\tau$ (se elige el trabajo con mayor $Z_i$ )
$C_{i,j-1}$	tiempo de finalización de la operación anterior
$C$	factor de asignación de la fecha de entrega

Reglas contrastadas:

- SPT (*Short Process Time*): se usa para minimizar el porcentaje de trabajos entregados fuera de plazo y el tiempo medio de flujo. La prioridad se asigna de la siguiente manera:

$$Z_i = T_{ij}$$

- PT + WINQ (*Process Time Plus Work In the Next Queue*): elige el trabajo con el mínimo tiempo de procesamiento en la siguiente cola. Se usa para minimizar el tiempo medio del flujo de trabajo. La prioridad se asigna de acuerdo con:

$$Z_i = T_{ij} + W_{i,j+1}$$

- ATC (*Apparent Tardiness Cost*): empleada para minimizar el porcentaje de trabajos retrasados y la tardanza media. Actualmente el criterio de asignación de prioridad consiste en:

$$Z'_i = \frac{1}{T_{ij}} \cdot \exp \left\{ -\max \left\{ \frac{[D_i - \sum_{q=j+1}^{m_i} (W'_{iq} - T_{iq}) - \tau - T_{ij}]}{(k \cdot T_{bar})} \right\}; 0 \right\}$$

Siendo

- $k$  parámetro exponencial de anticipación para escalar la holgura
- $T_{bar}$  tiempo de procesamiento medio de los trabajos restantes

- MOD (*Modified Operational Due-Date*): es una modificación de la regla ODD. El índice de prioridad se expresa:

$$Z_i = \max \left( A_i + c \cdot \sum_{k=1}^j T_{ik}; \tau + T_{ij} \right)$$

- EDD (*Earliest Due-Date*): es una de las reglas más empleadas hoy en día, minimiza los valores de tardanza máxima. El factor de prioridad será:

$$Z_i = D_i$$

- ODD (*Operational Due-Date*): se escoge el trabajo con menor  $ODD_{ij}$ . Esta regla tiene en cuenta la fecha de llegada de un trabajo y el tiempo de procesamiento de la actividad inminente.

$$ODD_{ij} = A_i + c \cdot \sum_{k=1}^j T_{ik}$$

- RR (*Raghu y Rajendran*): esta regla proporciona valores bajos de tardanza media y tiempo medio de flujo. El índice de prioridad es:

$$Z_i = \frac{(D_i - \tau - RPT_i) \cdot e^{-\mu} \cdot T_{ij}}{RPT_i} + e^{\mu} \cdot T_{ij} + W''_{nxt}$$

Siendo:

- $RPT_i$  tiempo de procesamiento restante del trabajo  $i$
- $\mu$  utilización de la máquina
- $W''_{nxt}$  tiempo de espera probable del trabajo  $i$  en la próxima máquina

- PT+WINQ+SL (*Process Time + Work In Next Queue + Slack*): empleada para minimizar la tardanza máxima. El índice de prioridad del sistema se establece como:

$$Z_i = T_{ij} + W_{i,j+1} + \min(D_i - \tau - RPT_i; 0)$$

- AT – RPT (*Arrival Time – Total Remaining Process times*): es una regla efectiva para minimizar el tiempo máximo de flujo y la varianza del tiempo de flujo de los trabajos. En cuanto a la regla de prioridad, es la que sigue:

$$Z_i = A_i - \sum_{q=j}^{m_i} T_{iq}$$

A continuación, los autores comentan que también han estudiado otras reglas como NOP, que elige el trabajo con menor número de operaciones restantes, LWKR, que escoge el trabajo con menor trabajo restante o la regla MWKR, la cual elige los trabajos con mayor cantidad de trabajo restante. No obstante, los autores no se han centrado en estas reglas pues obtienen resultados peores en comparación con las explicadas más en detalle anteriormente. A raíz de esto, proponen 7 nuevas reglas en función de diferentes requerimientos.

- FDD (*Flow Due-Date*): El índice de prioridad depende de  $FDD_{ij}$ .

$$Z_i = FDD_{ij}$$

Siendo:

$$FDD_{ij} = A_i + \sum_{q=1}^j T_{iq}$$

Nótese que cuando el factor de reducción ( $c$ ) es igual a 1, la regla es igual que  $ODD_{ij}$ .

- PT + PW: el índice de prioridad es:

$$Z_i = T_{ij} + (\tau - C_{i,j-1})$$

El término  $\tau - C_{i,j-1}$  indica el tiempo de espera del trabajo  $i$  en la operación actual.

- PT + PW + FDD: es una combinación de las reglas anteriores. Se le añade el tercer sumando para acelerar el trabajo que ha esperado durante mucho tiempo más allá de la fecha de entrega. El índice de prioridad el siguiente:

$$Z_i = T_{ij} + (\tau - C_{i,j-1}) - (\tau - FDD_{ij})$$

- PT + PW + ODD: es una modificación de la regla anterior. El índice de prioridad será:

$$Z_i = T_{ij} + (\tau - C_{i,j-1}) - (\tau - ODD_{ij})$$

- OPFSLK/PT; FDD: esta regla busca reducir la varianza del tiempo de flujo, el tiempo de flujo máximo, la variación de la tardanza y la tardanza máxima. El índice de prioridad es:

$$Z'_i = \frac{\max(\tau + T_{ij} - FDD_{ij}; 0)}{T_{ij}}$$

- OPSLK/PT; ODD: esta regla es similar a la anterior, sustituyendo el término  $FDD_{ij}$  por el término  $ODD_{ij}$ . El índice de prioridad es el siguiente:

$$Z'_i = \frac{\max(\tau + T_{ij} - ODD_{ij}; 0)}{T_{ij}}$$

- AV PRO: en esta regla se intenta desarrollar un índice de prioridad que supere a la regla SPT. Dicho índice será:

$$Z_i = \sum_{q=1}^{m_i} \frac{T_{iq}}{m_i}$$

Para una mayor comprensión, han realizado un ejemplo con un taller de 10 máquinas Donde el número de operaciones para un trabajo varía entre 5 y 9. Las llegadas de trabajo son generadas con una distribución exponencial y, los niveles de utilización de las máquinas son 85% y 95%.

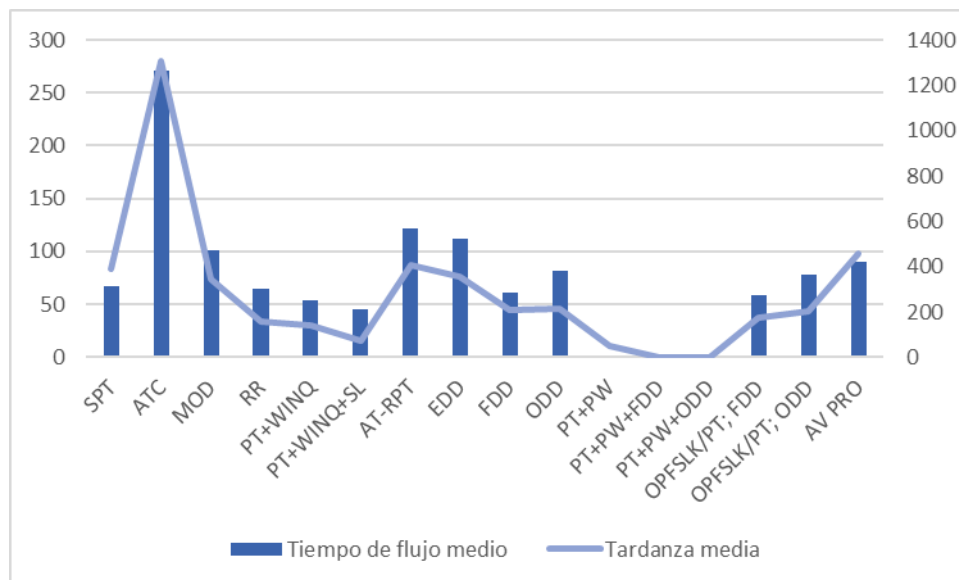


Figura 4: Tiempo de flujo y tardanza media con factor de utilización del 95%. (Fuente: Jayamohan & Rajendran, 2000)

Tras los resultados obtenidos se concluye que la regla PT + PW es la que mejor funciona en la mayoría de los casos para minimizar el tiempo medio de flujo. Se comporta incluso mejor que la regla PT + WINQ, que es la que hasta la fecha se



contemplaba como la que debería obtener mejores resultados. Esta mejora se debe a que la regla PT + PW busca el trabajo con el menor tiempo de procesamiento más el tiempo de espera. Además, debemos mencionar que las reglas que han propuesto los autores tienen resultados bastante favorables en comparación con el resto de las reglas.

En cuanto al tiempo de flujo máximo, las reglas propuestas (OPFSLK/PT; FDD) y FDD son las que han obtenido los mejores resultados. Esto es debido a que la regla FDD busca minimizar la desviación de la fecha de finalización de un trabajo con respecto a su fecha de entrega, además, la primera regla busca minimizar el tiempo de flujo máximo. En el tercer lugar, encontramos la regla AT – RPT, mientras que, si miramos la variación del tiempo de flujo, el orden es justo el contrario, siendo la regla AT – RPT la mejor y la regla (OPFSLK/PT; FDD) la tercera.

En cuanto a la tardanza media los resultados dependen del factor de utilización. Para factores de utilización altos, la mejor regla fue la PT+PW+ODD, seguida de las reglas PT+PW+FDD y PT+PW. Si el factor de utilización es menor, el orden es PT+PW+ODD, PT+WING+SL y PT+WING+FDD. Por otra parte, se concluye que la regla RR obtiene malos resultados en este ámbito.

La regla PT+WING+SL es la que mejor se comporta en cuanto a la tardanza máxima, seguida de las reglas (OPSLK/PT; ODD) y ODD. Esto puede ser debido a que las tres reglas emplean información de la fecha de entrega. Por otra parte, si nos fijamos en la variación de la tardanza, el orden es el mismo si invertimos el segundo y el tercer puesto.

Uno de los objetivos de los autores es comparar el funcionamiento en un *flow shop* y un *job shop*, y por ejemplo se concluye que la regla PT+WING+SL o la PT+PW funcionan mejor en *job shop* que en un *flow shop*.

No obstante, se puede concluir que estas reglas propuestas por los autores funcionan mejor ante cualquier variación del sistema además de que su rendimiento se ve menos afectado que las reglas clásicas ante el cambio de un sistema *flow shop*.

En (González, Montoya y Caballero, 2018) se comparan varias reglas de prioridad en un *Flow shop* mediante simulación de Monte Carlo, realizando un diseño experimental con trece reglas de despacho con tres distribuciones de probabilidad y diferentes coeficientes de variación de tiempos de procesamiento.

Los autores comentan las ventajas que tienen las reglas de despacho frente a métodos metaheurísticos más sofisticados:

- Son basadas en el presente por lo que no intentan predecir el futuro.
- No requieren altas inversiones computacionales.
- Resultan útiles en fábricas con incertidumbre en tiempos de procesamientos de trabajos.
- Fáciles de entender e implementar.
- Analizan el comportamiento de los problemas más comunes.

La notación empleada para explicar las reglas de despacho consiste en:

$j$	índice para trabajos
$i$	índice para máquinas
$n$	número total de trabajos
$m$	número total de máquinas
$p_{ij}$	tiempo de procesamiento esperado del trabajo $j$ la máquina $i$
$d_j$	fecha de entrega del trabajo $j$
$\pi$	secuencia de trabajos programados hasta el momento $t$
$t$	momento en el que se aplica la regla de despacho
$C_j(\pi)$	tiempo de finalización del trabajo $j$ en la última máquina

- SPT (*Short Processing Time*): se selecciona el mínimo valor de  $\sum_{i=1}^m E(p_{ij})$  del trabajo  $j \notin \pi$  en el tiempo  $t$ .
- LPT (*Longest Processing Time*): se selecciona el máximo valor de  $\sum_{i=1}^m E(p_{ij})$  del trabajo  $j \notin \pi$  en el tiempo  $t$ .
- EDD (*Earliest Due Date*): en el tiempo  $t$ , el trabajo  $j \notin \pi$  con el mínimo valor de  $d_j$  se selecciona.
- EDDP (*Earliest Due Date with Processing times*): se selecciona en el tiempo  $t$ , el trabajo  $j \notin \pi$  con el mínimo valor de:

$$\frac{d_j}{\sum_{i=1}^m E(p_{ij})}$$

- MDD (*Modified Due Date*): se selecciona en el tiempo  $t$ , el trabajo  $j \notin \pi$  con el mínimo valor de:

$$\max(d_j, C_j(\pi))$$

- SLACK: se selecciona en el tiempo  $t$ , el trabajo  $j \notin \pi$  con el mínimo valor de:

$$d_j - C_j(\pi)$$

- SRMWK (*Slack per Remaining Work*): se selecciona en el tiempo  $t$ , el trabajo  $j \notin \pi$  con el mínimo valor de:

$$\frac{d_j - C_j(\pi)}{\sum_{i=1}^m E(p_{ij})}$$

- COVERT (*Cost Over Time*): se selecciona en el tiempo  $t$ , el trabajo con el máximo valor de:

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^m E(p_{ij})} \left[ \max \left( 0.1 - \frac{\max(0, d_j - C_j(\pi))}{K \sum_{i=1}^m E(p_{ij})} \right) \right]$$

- ATC (*Apparent Tardiness Cost*): se selecciona el trabajo  $j$ , en el tiempo  $t$ , que tenga el máximo valor de:

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^m E(p_{ij})} \left[ \exp \left( - \frac{\max(0, d_j - C_j(\pi))}{K \bar{p}} \right) \right]$$

Siendo:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j \in \pi} E(p_{ij})}{n - |\pi|}$$

- NEH: consiste en una regla dinámica. Primero se construye una secuencia inicial para ordenar los trabajos incrementando los valores de  $\sum_{i=1}^m E(p_{ij})$ . Una vez hecho esto, la mejor secuencia parcial de los dos primeros trabajos de la secuencia inicial se selecciona según el mejor *makespan*. Después de esto, el tercer trabajo de la secuencia inicial es insertado en todas las posibles posiciones la secuencia parcial previa de los dos trabajos para determinar el mejor *makespan*. El proceso continuaría con el cuarto trabajo de la secuencia inicial y así sucesivamente.
- NEHedd (NEH *with earliest due date*): es una variación de la regla anterior. Ahora, para construir la secuencia final, la mejor secuencia parcial de los dos primeros trabajos de la secuencia inicial se selecciona según la mejor tardanza total. Posteriormente seguiría igual que la regla anterior, pero determinando la mejor tardanza total.
- ENS2 (*Extensive Neighbourhood Search method 2*): comienza con la regla NEHedd y trata de mejorar la solución mediante intercambios entre dos pares de trabajos hasta que la tardanza total no presente mejora.
- NEHedd(TB<sub>1T1</sub>): funciona de acuerdo al mismo principio que la regla NEHedd pero considera que el empate se rompe cada vez que se inserta un trabajo en una posición específica.

Para poder comprobar el funcionamiento y eficacia de cada una de las reglas, se propuso un ejercicio donde se analizaron tres trabajos cuyos tiempos de finalización son  $C_1 = 9$ ,  $C_2 = 8$  y  $C_3 = 5$ . En primer lugar, se determina la secuencia mediante la regla MDD obteniendo una secuencia  $\{3,2,1\}$ . Tras ello, y teniendo en cuenta los tiempos de procesamiento de los trabajos en cada máquina, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

La regla ENS2 se postula como la más eficaz a la hora de minimizar el tiempo de flujo medio y la tardanza esperada. Las reglas NEHedd y NEHedd(TB<sub>1T1</sub>) ocupan el segundo lugar a la hora de minimizar tardanzas.

En cuanto al *makespan*, el mejor rendimiento lo tuvo la regla NEH, seguida de la regla ENS2. Por el contrario, los peores resultados obtenidos en base a este parámetro han sido proporcionados por la regla MDD.

En el caso de la tardanza máxima, se recomienda el uso de las reglas EDD y SLACK, pues tienen en cuenta las fechas de entrega. En cambio, la regla SPT ha obtenido los peores resultados a instancias de minimizar este parámetro.

Las reglas ATC y COVERT son interesantes en cuanto a la minimización de trabajos tardíos con intervalos de confianza bajos, en cambio, para intervalos de confianza elevados, la regla SPT presenta mejores resultados.

El objetivo de (Vargas & Montoya, 2012) es cuantificar el impacto de diferentes estrategias de colaboración en una cadena formada por un proveedor y un fabricante en la programación de la producción. En este texto, se analizan varias reglas de programación de la producción con el fin de determinar qué escenario y que regla de secuenciación de trabajos permiten mejorar los indicadores locales y globales de los miembros de la cadena.

Se lleva a cabo una cadena didáctica, donde el fabricante ordena un tipo de producto al proveedor. De este modo, el proveedor recibe los trabajos y debe programar sus recursos de forma que pueda cumplir a tiempo con los pedidos demandados.

En su estudio, diseñan un *flowshop* híbrido con un conjunto de  $n$  trabajos que pueden ser procesados por dos eslabones en serie. Cada uno tiene dos máquinas idénticas en paralelo. Cada trabajo debe ser procesado por una sola máquina, en ambos eslabones. No se consideran interrupciones en el procesamiento de un trabajo. Existen unas fechas de entrega  $d_j$  acordadas entre el cliente y el fabricante y cada trabajo tiene una fecha de llegada al sistema  $r_j$ . El tiempo de procesamiento del trabajo  $i$  en el eslabón  $j$  se denomina  $p_{ij}$ . El objetivo del problema es minimizar el tiempo total de flujo y la tardanza total.

Para realizar el experimento, proponen tres escenarios diferentes en función de la colaboración y el traspaso de información entre cliente y proveedor. Asimismo, evaluarán diferentes reglas de secuenciación en función del escenario aplicado.

- **Escenario de colaboración total**

Este escenario representaría el caso ideal, pues tanto el proveedor como el fabricante conocen completamente la demanda y el resto de información relacionada con los trabajos que tienen que ser procesados. Conocen como deben procesar cada uno de los trabajos y cuentan con la tecnología necesaria para compartir la información. Este escenario fue evaluado mediante un método heurístico variante del *Shifting Bottleneck* de (Pinedo, 2016), denominada como GSBR.

- **Escenario de colaboración nula**

En este *escenario* existe una completa desconfianza y no existe intercambio de información entre los miembros de la cadena. Los algoritmos de programación de la producción deben tomar las decisiones de ejecución basadas en la información disponible en cada momento. Los algoritmos considerados fueron son:

- FIFO (*First In-First Out*): Las órdenes de producción se ejecutan en orden creciente de  $r_j$ . En caso de que lleguen dos trabajos simultáneamente, se procesa primera la que tenga una fecha de entrega  $d_j$  más reciente.
- SPT (Short Processing Time): Las órdenes de producción se ejecutan en orden creciente de  $p_j$ . En caso de que dos trabajos tengan el mismo tiempo de procesamiento, se procesa en primer lugar aquella con la fecha de llegada  $r_j$  más antigua.

- **Escenario de colaboración parcial**

En este escenario existe un cierto grado de confianza entre los miembros de la cadena de *suministro*. El proveedor tiene cierta información sobre las futuras órdenes de producción que le van a llegar. Gracias a esto, el proveedor puede administrar sus recursos en función de la información disponible. No obstante, el proveedor sólo conoce la fecha de llegada de los futuros trabajos, pero no el tiempo de procesamiento necesario ni la fecha de entrega. Por esto, tanto el fabricante como el proveedor necesitan definir una serie de estrategias. Para el segundo eslabón de la cadena (el fabricante), los trabajos pueden ser procesados por las reglas FIFO o SPT. Para el primer eslabón (el proveedor), se consideran las siguientes reglas de secuenciación:

- EDD (Earliest Due Date): Los trabajos se ordenan en una lista L por valor creciente de su fecha de entrega  $d_j$ . En caso de empate, se ejecuta aquel trabajo con fecha de llegada  $r_j$  más antigua. Si sigue existiendo empate, se escoge el trabajo arbitrariamente. Solo se podrá ejecutar un trabajo si es posible acabarlo antes de la llegada del siguiente.
- MDD (Modified Due Date): Los trabajos se ordenan en la lista L según el valor de:

$$MDD = t + (P_{j1} + P_{j2}) \cdot K$$

Siendo  $t$  el instante de la toma de decisión,  $K$  una constante con valor igual a 50 establecido por la bibliografía estudiada por los autores y  $P_{j1}$  y  $P_{j2}$  son los tiempos de ejecución de los trabajos en cada uno de los eslabones de la cadena. Cada instante en el que la máquina se libera, se procesa el primer trabajo de L sí y solo si es posible terminar su procesamiento antes de la siguiente llegada de trabajos. Si no es posible, se espera a dicha llegada.

- SLK1: El ordenamiento de tareas en la lista L se sigue mediante la ecuación:

$$s_j = d_j - P_{j1} - t$$

- De nuevo, se procesará el primer trabajo de la lista L siempre que se pueda terminar su ejecución antes del siguiente instante de llegada.
- SLK2: Es una modificación de la regla anterior. Las tareas en la lista L se ordenarán siguiendo el criterio:

$$s_j = d_j - \max(P_{j1}, P_{j2}) - t$$

Igual que en el resto de las reglas de este escenario, sólo se procesarán los trabajos que terminen antes de que llegue una nueva tarea.

A continuación, se llevaron a cabo las oportunas simulaciones. En el caso de colaboración nula, se escogieron las estrategias FIFO\_FIFO, FIFO\_SPT, SPT\_FIFO y SPT\_SPT, representando las reglas seguidas tanto por el primer como por el segundo eslabón. En cuanto al número de trabajos  $n$ , la regla SPT\_SPT presentó los mejores resultados para un número de trabajos pequeño, y también para un número  $n$  mayor (entre 100 y 150 trabajos).

En cuanto al escenario de colaboración parcial, se esperaba que la regla SLK fuese la que obtuviese mejores resultados a instancias de minimizar el tiempo total de flujo y la tardanza total. Sin embargo, tras las simulaciones, para un número de trabajos  $n = 10$ , la regla EDD\_SPT tuvo mejores resultados que las reglas SLK2\_SPT, SLK1\_SPT y MDD\_SPT en un 12,1%, 21,2% y 13,1% de los casos, respectivamente. Con  $n = 50$ , la regla MDD\_SPT genera los mejores resultados entre el 47,5% y el 76,8% de los casos. Dicha regla también se coloca en primera posición para instancias más grandes (100 casos), aunque, para  $n = 150$ , EDD\_SPT vuelve a ganar.

Posteriormente, se analizaron los resultados de los tres escenarios comparando la colaboración nula y parcial con el método GGBR de colaboración total con el objetivo de analizar el impacto que produce el intercambio de información en el rendimiento global de la cadena de suministro.

**Tabla 3: Comparación de escenarios de colaboración. (Fuente: Vargas & Montoya, 2012)**

Comparación de los escenarios de colaboración	Instancias	Estrategia de programación	Comparación con otra estrategia	Diferencia significativa	Porcentaje de instancias con mejores resultados
Escenario de colaboración nula	10	SPT_SPT	SPT_FIFO	No	25,3
			FIFO_SPT	No	40,4
			FIFO_FIFO	No	53,5
	50	SPT_SPT	SPT_FIFO	No	94,9
			FIFO_SPT	No	95,9
			FIFO_FIFO	No	100
	100	SPT_SPT	SPT_FIFO	No	98,9
			FIFO_SPT	Sí	
			FIFO_FIFO	Sí	
	150	SPT_SPT	SPT_FIFO	No	98,9
			FIFO_SPT	Sí	
			FIFO_FIFO	Sí	
Escenario de colaboración parcial	10	EDD_SPT	SLK2_SPT	No	12,1
			SLK1_SPT	No	21,1
			MDD_SPT	No	13,1
	50	MDD_SPT	SLK2_SPT	No	47,5
			SLK1_SPT	No	76,8
			MDD_SPT	No	61,6
	100	MDD_SPT	SLK2_SPT	No	55,6
			SLK1_SPT	No	86,9
			EDD_SPT	No	85,9
	150	SLK2_SPT	SLK1_SPT	No	83,8
			MDD_SPT	No	52,5
			EDD_SPT	Sí	
Escenario de colaboración total	10	GSBR	SLK2_SPT	No	59,6
			MDD_SPT	No	61,6
			EDD_SPT	No	60,6
			SPT_SPT	No	64,6
	50	GSBR	SLK2_SPT	No	51,5
			MDD_SPT	No	53,5
			EDD_SPT	No	67,7
			SPT_SPT	No	48,5

Tras los resultados obtenidos en la experimentación, se concluye que los resultados no son óptimos si no existe una estrategia de colaboración entre los miembros de la cadena de suministro. No obstante, los resultados mostraron que, aunque se tomen ciertas estrategias, no siempre conducirán a buenos resultados, pues dichas estrategias, deben ser escogidas con cautela. Se debería identificar y evaluar de manera exhaustiva el tipo y la cantidad de información a aportar.

En (Öner-Közen & Minner, 2017) se modela un problema de secuencia de prioridades de producción a medida (MTO) donde los clientes especifican la cantidad de tiempo que están dispuestos a esperar, es decir, la fecha de entrega. Con cada pedido entregado fuera de plazo, la empresa tiene un coste de penalización. El objetivo del modelo es minimizar las penalizaciones por retraso comparando varias reglas simples con la política óptima para analizar la probabilidad de pedidos a tiempo y la tardanza de los pedidos.

El modelo consiste en un único procesador y una cola de tamaño limitado. El número de pedidos que el sistema puede aceptar es  $K$ , por lo que se aceptarán todos los pedidos siempre que no se haya alcanzado el valor de  $K$ . El plazo de tiempo que el cliente está dispuesto a esperar, se llama plazo de entrega requerido y se denota como  $CRL$ . El mayor tiempo de espera requerido por el cliente será  $C_{max}$ .

Se consideran 2 estrategias de toma de decisiones:

- PA (*Position Arriving order*): la decisión sobre la posición inicial de la orden de llegada en la cola se toma en cada llegada.
- DC (*Decision upon Completion*): la decisión de que orden procesar a continuación se toma al completar una orden.

Las reglas consideradas serán las que siguen:

- FCFS
- EDD
- $EDD^{otp}$ : es una modificación de la regla anterior que considera que una vez que se alcance la fecha de vencimiento de una orden que se encuentra en espera, se considere de menor prioridad que las órdenes con plazos de entrega restantes más grandes pero positivos, es decir, que aún se puedan cumplir. Es una regla dinámica pues va a variar con el tiempo. Se consideran dos versiones:
  - $EDD_{PA}^{otp}$ : la orden de llegada se asigna con mayor prioridad que las que ya están retrasadas. La fórmula se aplica a cada llegada.
  - $EDD_{DC}^{otp}$ : la prioridad más alta se otorga al pedido con el tiempo restante más pequeño que es estrictamente mayor que 0. Esta fórmula considera la selección del siguiente pedido para procesar al finalizar el pedido.
- LDD (*Latest Due-Date*): se le otorga prioridad al pedido con la fecha de vencimiento más tardía.

Tras realizar la experimentación, los resultados muestran que la estrategia DC predomina sobre la estrategia AP. Por otra parte, al comparar las reglas de prioridad entre sí, se concluye que cuando aumenta el valor de coste fijo debido a los retrasos, el rendimiento de EDD disminuye, en cambio, las reglas propuestas  $EDD^{otp}$  arrojan mejores resultados.

La probabilidad de acabar los trabajos a tiempo es menor en la regla EDD que en la regla FCFS siempre que  $\sigma > 0$ . La regla con mayor probabilidad de puntualidad en la mayoría de los casos es la regla  $EDD_{DC}^{otc}$ , seguida por la regla LDD.

Si se aumenta el tamaño de  $K$  y de  $C_{max}$ , las reglas  $EDD_{DC}^{otc}$  y LDD mejoran la probabilidad de puntualidad en comparación con FCFS, pero  $EDD_{PA}^{otc}$  y EDD lideran esta disciplina.

Las reglas propuestas  $EDD_{DC}^{otc}$  y  $EDD_{PA}^{otc}$  arrojaban resultados casi óptimos para sistemas de pequeño tamaño, pero en el caso de sistemas más grandes, siguen presentando buenos resultados, por lo que los autores concluyen que son más eficaces que las reglas LDD y EDD.

En (Sharma & Jain, 2014) se lleva a cabo una simulación mediante nueve reglas de despacho en un SDJS (Sistema de fabricación de un taller dinámico estocástico). El taller consiste en un *job shop* formado por diez máquinas. Existen seis tipos diferentes de trabajos numerados de la A a la F con una probabilidad de llegada idéntica. Cada trabajo, tiene un número determinado de operaciones, una ruta y un tiempo de procesamiento específico. Para calcular el tiempo entre llegadas, determinan que hay que seguir una distribución de Poisson, y por ello recurren a la expresión:

$$b = \frac{1}{\lambda} = \frac{\mu_p \mu_g}{UM}$$



Siendo:

$b$	Tiempo medio entre llegadas.
$\lambda$	Tasa media de llegadas.
$\mu_p$	Tiempo medio de procesamiento por operación (incluido el tiempo de configuración).
$\mu_g$	Número medio de operaciones por trabajo.
$U$	Factor de utilización.
$M$	Número de máquinas en el taller.

En este texto también se comenta una forma de calcular la fecha de entrega de un trabajo en caso de que el cliente no haya exigido una fecha concreta:

$$d_i = a_i + k(p_i + n_i \cdot u_i)$$

Siendo:

$d_i$	Fecha de vencimiento del trabajo $i$ .
$a_i$	Fecha de llegada del trabajo $i$ .
$k$	Factor de estanqueidad de la fecha de entrega.
$p_i$	Tiempo total de procesamiento de todas las operaciones del trabajo $i$ .
$n_i$	Número de operaciones del trabajo $i$ .
$u_i$	promedio de todos los tiempos de configuración del trabajo $i$ .

Las 9 reglas de secuenciación elegidas por los autores para llevar a cabo su experimento son:

- FCFS
- SPT
- SIMSET: Se otorga la máxima prioridad al trabajo que tiene el menor tiempo de preparación.
- EDD
- SSPT: Se da la mayor prioridad al trabajo que tiene menor valor de la suma del tiempo de configuración y el tiempo de procesamiento.
- JSPT: Se selecciona como próximo trabajo aquel que sea idéntico al que se acaba de procesar. Si no hay un trabajo idéntico, se le da mayor prioridad al que tenga un tiempo de procesamiento menor.
- JEDD: Se selecciona como próximo trabajo aquel que sea idéntico al anterior. Si no hay un trabajo idéntico, se le da mayor prioridad a aquel trabajo con fecha de entrega más temprana.

- JMEDD: Se selecciona como próximo trabajo aquel que sea idéntico al anterior. Si no hay un trabajo idéntico, se le da mayor prioridad al trabajo habiendo modificado su fecha de entrega más temprana.
- JSSPT: Se selecciona como próximo trabajo aquel que sea idéntico al que se acaba de procesar. Si no hay un trabajo idéntico, se aplica la regla SSPT.

Tras llevar a cabo la simulación de 20000 trabajos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En cuanto al *makespan*, la regla JMEDD ha obtenido los resultados más favorables, seguido de EDD y JEDD. Por otra parte, la regla FCFS ha sido la peor en base a minimizar este parámetro.

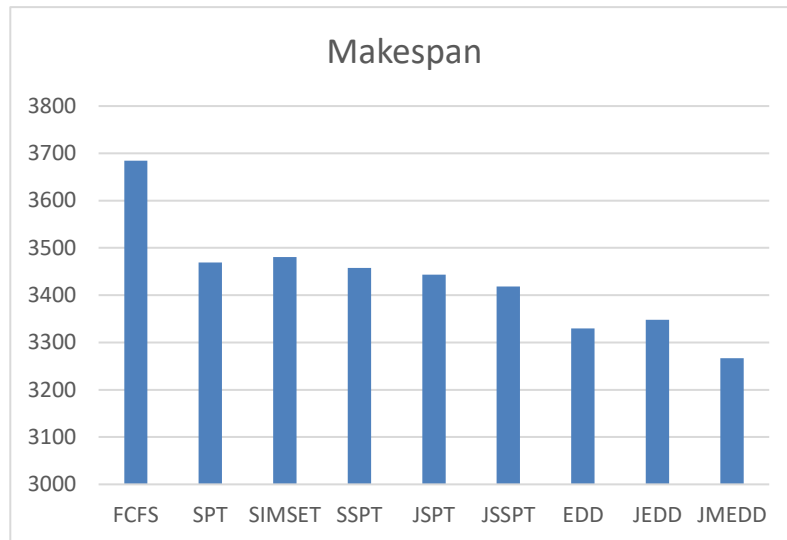


Figura 5: Makespan. (Fuente: Sharma & Jain, 2014)

La regla SIMSET es la mejor regla en cuanto al tiempo medio de flujo, en cambio, la regla FCFS vuelve a ocupar la última posición. En segundo y tercer lugar podemos ver las reglas SSPT y JMEDD.

La regla JMEDD es la mejor en cuanto al tiempo de flujo máximo, la tardanza media y la tardanza máxima. Por otro lado, la regla FCFS sigue siendo la que proporciona peores resultados.

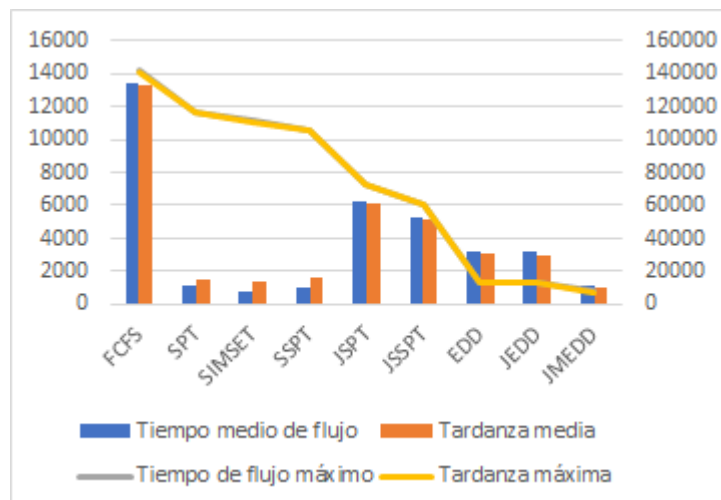


Figura 6: Tiempos de flujo y tardanzas medias y máximas. (Fuente: Sharma & Jain, 2014)

En cuanto al número de trabajos tardíos, la regla que consigue una mayor reducción es la regla SIMSET, seguida de cerca por las reglas SPT y SSPT.

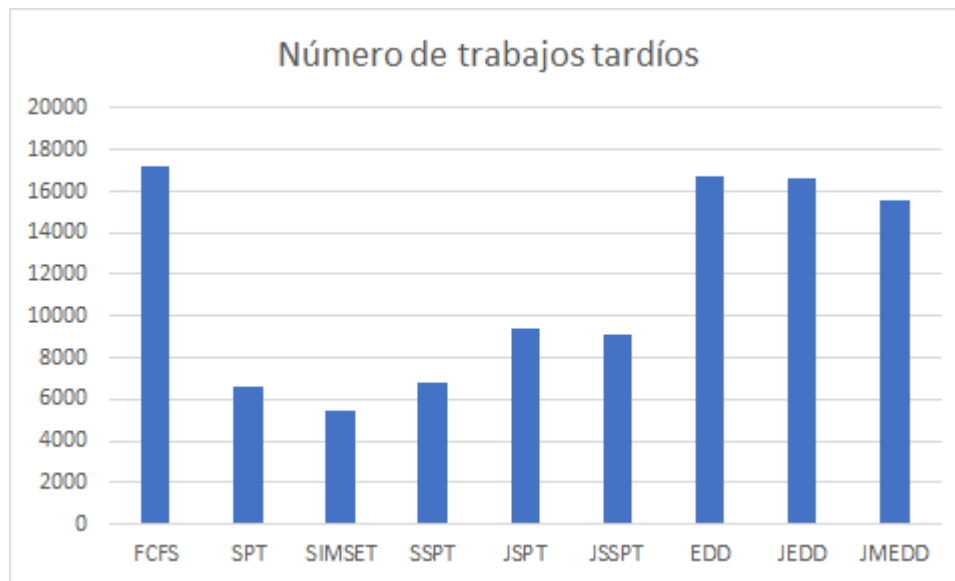


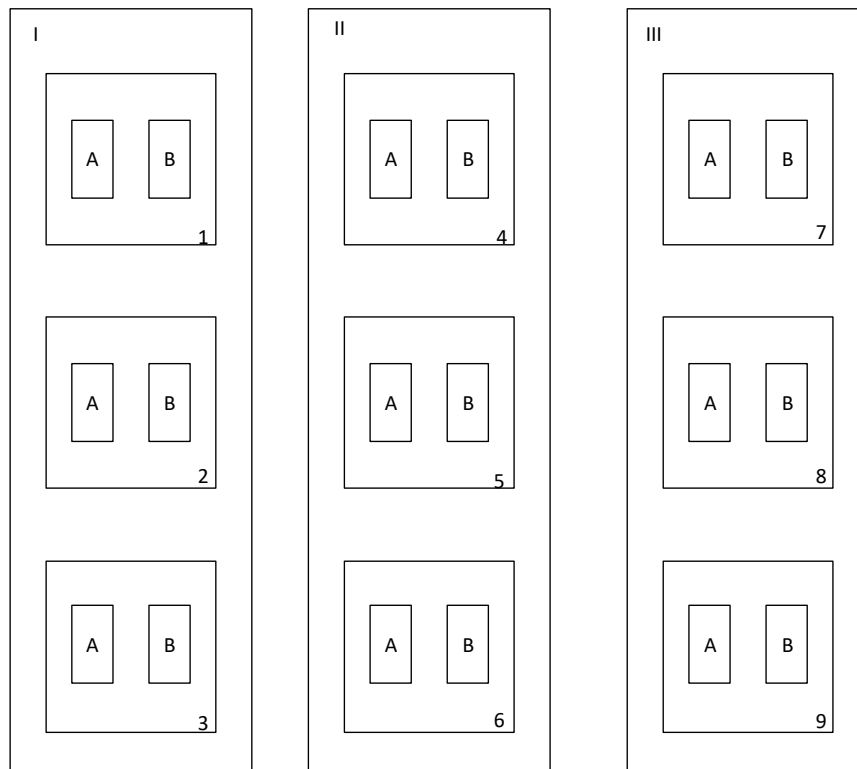
Figura 7: Número de trabajos tardíos. (Fuente: Sharma & Jain, 2014)

### 3.2 Reglas de asignación laboral

En el apartado anterior hemos estudiado casos donde se aplican diversas técnicas de asignación de prioridades a los trabajos que entran en el taller. A continuación, estudiaremos casos con una dificultad añadida, un recurso limitado a mayores, los operarios. Los problemas con doble restricción se conocen como DRC (*Dual Constrained*). La asignación laboral frecuentemente trata de resolver dos cuestiones: 'dónde moverse' y 'cuando moverse'. Las reglas de 'cuando moverse' se utilizan para determinar la disponibilidad de un trabajador. Cuando dicho trabajador puede ser transferido a otro centro de trabajo la regla 'dónde moverse' se aplica para determinar dónde desarrollará su próximo trabajo. Algunos textos solo aplican reglas que resuelven alguna de estas dos cuestiones, mientras que otros hablan de aplicar reglas conjuntas de ambos casos para adaptarse más a la realidad. Igual que se ha comentado en el punto anterior, las reglas aplicadas que veremos a continuación se aplican en casos y modelos diferentes, por lo que a la hora de extraer conclusiones hay que actuar con cautela.

En (Treleven & Elvers, 1985) se examina el efecto de varias reglas de asignación de operarios en un taller. Se simulan once reglas diferentes de asignación laboral, junto con las reglas RC y SPT para saber que trabajos se deben procesar primero. Además, se prueban cinco nuevas reglas de asignación laboral que usan un promedio de los valores de prioridad de todos los trabajos en la cola en un centro de trabajo para determinar si ese centro de trabajo debería recibir al trabajador disponible.

Los autores plantean una relación operario-máquina del 50% o 66.67%, por tanto, el modelo constará de dieciocho máquinas y nueve o doce empleados respectivamente. Estará dividido en tres secciones donde éstas representan zonas donde los trabajadores no pueden transferirse, pues necesitan un cierto grado de especialización. Dentro de cada división nos encontramos con tres centros de trabajo, cada uno tiene dos máquinas idénticas en paralelo alimentadas por una cola común.



Nota: I,II y III son las divisiones  
1,2...9 son los centros de trabajo  
A y B son las máquinas

**Figura 8: Distribución Taller. (Fuente: Treleven & Elvers, 1985)**

Los trabajos llegan al taller con una distribución de Poisson y con igualdad de probabilidad de ir a cualquier centro de trabajo. El factor de utilización de los operarios es del 90%.

Las once reglas de asignación laboral examinadas son las siguientes:

- FISFS: Tiene prioridad el trabajo en la cola con la entrada más temprana en el sistema
- AFISFS: Tiene prioridad la entrada promedio más temprana en el sistema de todos los trabajos en su cola.
- SOT: Tiene prioridad el trabajo en cola con el menor tiempo de operación inminente.
- ASOT: Tiene prioridad el tiempo de operación inminente promedio más corto de todos los trabajos en su cola.
- DDATE: Tiene prioridad el trabajo en la cola con fecha de vencimiento más temprana.
- ADDATE: Tiene prioridad el trabajo con fecha de vencimiento promedio más temprana de todos los trabajos en su cola.
- CRT: Tiene prioridad el trabajo en la cola con la relación crítica más baja.
- ACRT: Tiene prioridad el trabajo con la relación crítica promedio más baja de todos los trabajos en la cola.
- SPRO: Tiene prioridad el trabajo en cola con la menor holgura por número restante de operaciones.
- ASPRO: Tiene prioridad el trabajo con la holgura promedio más baja por el número restante de operaciones de todos los trabajos en su cola.

- LNGQ: Tiene prioridad el trabajo con la cola más larga.

Las reglas de despacho aplicadas son:

- FISFS
- SOT
- DDATE
- CRT
- SPRO

Para evaluar los resultados, se midió el tiempo medio en la cola, varianza de tiempo en cola, tardanza media, variación de la tardanza, porcentaje de trabajos tardíos y el número total de transferencias laborales.

El estudio demuestra que no existe diferencia significativa entre las reglas de asignación de trabajos y las reglas de asignación laboral sólo afectan significativamente en el número de transferencias laborales. Si un operario se transfiere constantemente de un centro de trabajo a otro su productividad puede disminuir.

En (Weeks & Fryer, 1976) podemos ver un estudio de simulación del impacto relativo de las reglas de asignación de fechas de vencimiento, de despacho y de asignación de mano de obra en un *Job Shop* de doble restricción.

El taller estudiado consta de tres divisiones, cada una con cuatro centros de trabajo con diferentes tipos de máquinas y cuatro trabajadores. Cada centro de trabajo contiene dos máquinas idénticas y los trabajadores pueden transferirse entre centros de trabajo, pero no entre divisiones. Las reglas de despacho analizadas son:

- FIFS
- SOT
- SPRO

El grado de control centralizado de la asignación de trabajos determina cuando se considerará el personal asignado a un centro de trabajo para su reasignación a otro centro de la misma división. Las siguientes reglas representan niveles variables de control divisional centralizado sobre las tareas laborales:

- Centralización completa: cuando un trabajador completa el servicio, está disponible para su reasignación.
- Descentralización completa: cuando un trabajador completa el servicio, está disponible para su reasignación solo si no hay trabajos en la cola del centro de trabajo en el que actualmente está asignado.

La asignación de personal se rige por las siguientes reglas de selección del centro de trabajo.

- Asignar el personal disponible al centro de trabajo con el trabajo en cola que ha estado esperando durante más tiempo.
- Asignar el personal disponible al centro de trabajo con mayor cola de trabajos.
- Asignar el personal disponible al centro de trabajo cuya cola tiene el trabajo con el menor tiempo de inactividad por operación restante.

Tras efectuar la simulación, se concluye que las reglas de despacho han sido muy influyentes en cuanto al tiempo de flujo, la tardanza media y la proporción de los trabajos retrasados.

Las reglas de decisión para determinar cuando el personal es elegible para la transferencia tienen efectos importantes sobre el tiempo de flujo medio y la varianza del tiempo de flujo. La descentralización completa obtiene mejores resultados que la

centralización completa en cuanto a transferencias totales de trabajo, mientras que la centralizada funciona mejor en el resto de las medidas. La regla centralizada aumenta la flexibilidad en el taller, reduciendo los tiempos de procesamiento.

En cuanto a las reglas de decisión de asignación del personal elegible a los centros de trabajo influyen en la variación del tiempo del flujo. La regla que asigna el personal disponible al centro de trabajo con la cola que ha esperado durante más tiempo presenta una menor variación del tiempo de flujo que el resto. La regla que asigna el personal disponible al centro de trabajo con la cola más larga proporciona un mayor número total de transferencias laborales.

En (Bovrowski & Park, 1993) se examina como asignar la mano de obra a los centros de trabajo cuando existen diferencias en la eficiencia de dichos trabajadores. El objetivo de esta investigación es evaluar las reglas de asignación laboral existentes, proponer una nueva candidata que incorpore información de la eficiencia de los trabajadores y medir su efectividad.

Se simula un *Job Shop* con 9 centros de trabajo, cada centro tiene dos máquinas idénticas y un empleado y el nivel de utilización laboral se establece en 85%.

La regla de asignación de trabajos empleadas son CR, FCFS, SPT y EDD. En cuanto a las reglas de asignación laboral, los autores especifican dos tipos de reglas referidas a cuando moverse (WHN) y donde moverse (WHR). Las reglas estudiadas para determinar cuando está disponible el trabajador son:

- WHN 1: Centralización. Un trabajador es elegible en el momento que termine el trabajo que estaba realizando.
- WHN 2: Descentralización. Un trabajador es elegible cuando la cola del trabajo que esté procesando se encuentre vacía.
- WHN 3: Regla de eficiencia. Mover el trabajador inmediatamente al centro de trabajo donde sea más eficiente cuando éste esté libre.
- WHN 4: Regla del seguidor. Mover el trabajador cuando acabe el número de trabajos que estaban en ese centro de trabajo cuando llegó.
- WHN 5: Regla de cola normalizada. Mover el trabajador cuando NQL sea menor que el valor objetivo estimado mediante una simulación previa. NQL es la longitud de la cola dividida por la suma de eficiencias de los trabajadores.

Una vez tomada la decisión de cuándo debe moverse el trabajador, debemos seleccionar el centro de trabajo donde debe desplazarse. Se estudian siete reglas:

- WHR 1: Regla de longitud de cola más larga. Moverse al centro de trabajo con la mayor cantidad de trabajos por hacer.
- WHR 2: Regla de longitud de cola modificada. Moverse al centro de trabajo con el mayor valor de QEFFC.

$$QEFFC = \text{Longitud Cola} \cdot \text{Eficiencia trabajador}$$

- WHR 3: Regla de longitud de cola normalizada. Moverse al centro de trabajo con el valor de NQL más cercano al valor objetivo estimado a través de una simulación previa.

$$NQL = \frac{\text{Longitud cola}}{\sum \text{eficiencias trabajadores en ese centro de trabajo}}$$

- WHR 4: Regla de eficiencia. Moverse al centro de trabajo donde el trabajador sea más eficiente.

- WHR 5: Regla de tiempo de procesamiento más corto (SPT). Moverse al centro de trabajo que tenga el trabajo con el menor tiempo de procesamiento.
- WHR 6: Regla de pérdida total de holgura mínima. Moverse al centro de trabajo con la menor pérdida de holgura total.

$$\text{Pérdida holgura total} = NNQ \cdot [\rho \cdot (1 - \text{eficiencia})]$$

Siendo:

$NNQ$  número de trabajos en la cola

$\rho$  tiempo de procesamiento del trabajo que se procesará primero.

- WHR 7: Regla de menor holgura agregada. Moverse al centro de trabajo con la menor cantidad de holgura agregada.

$$\text{Holgura agregada} = \sum_{i=1}^{NNQ} (ODD_i - \rho_i \cdot \text{eficiencia})$$

Siendo:

$ODD_i$  fecha de entrega del trabajo  $i$ .

$\rho_i$  tiempo de procesamiento del trabajo  $i$ .

Tras la experimentación, la regla WHN 3 se coloca como la superior dentro de las reglas de asignación de cuando un trabajador debe moverse, mientras que la WHN 1 es la que obtiene los peores resultados. Dado que el trabajador no es igualmente eficiente en todas las máquinas, las reglas WHN deben de tener esto en cuenta (WHN 3) o, al menos, restringir el número de veces que un trabajador puede moverse a una máquina diferente (WHN 2,4 y 5).

En cuanto a las reglas WHR, se determinó que moverse a la cola más larga (WHR 1) no produce rendimientos superiores, en cambio, la regla WHR 4, que considera la eficiencia de los trabajadores, se postula como la mejor a instancias de determinar dónde deben desplazarse los operarios. También se determina que, independientemente de la regla WHN utilizada, el tiempo de flujo se minimizará cuando se emplea la WHR 4.

Finalmente, se concluyó que las reglas de asignación laboral existentes no son las más adecuadas cuando existen diferencias en las habilidades de los trabajadores. Las reglas WHN y WHR son capaces de proporcionar resultados superiores en el rendimiento del sistema. Concretamente, la regla WHR 4 se impuso sobre todas las reglas WHR y también predominó en la selección de la regla WHN y de la regla de despacho utilizada.

En (Park, 1990) se simula un taller con nueve centros de trabajo, con dos máquinas y un trabajador cada uno. En este texto se han centrado en las reglas de asignación laboral basadas en 'dónde moverse'. Se emplean un total de diez reglas, cinco de ellas comunes, ya explicadas anteriormente y cinco que son versiones de las anteriores aplicadas a los centros de trabajo con cuello de botella.

Las diez reglas utilizadas son las siguientes:

- FISFS
- BFISFS
- EDD

- BEDD
- SPT
- BSPT
- CR
- BCR
- LNGQ
- BLNGQ

En cuanto a las reglas de prioridad de asignación de trabajos, se escogieron 4 reglas comúnmente empleadas:

- FISFS
- EDD
- SPT
- CR

Para comprobar si estas reglas, tanto las de asignación laboral como las de asignación de trabajos son eficientes, se ha analizado el tiempo medio de espera de cada trabajo, el porcentaje de trabajos tardíos, la tardanza y la prontitud media de cada trabajo y el número medio de transferencias laborales.

Tras la simulación se determinó que las reglas de asignación laboral LNGQ y SPT obtuvieron los rendimientos más bajos para todas las reglas de despacho en cuanto a la prontitud media de los trabajos, por otro lado, la que obtuvo mayores rendimientos fue la regla CR. Por otra parte, la regla LNGQ fue la que mejor funcionó intentando minimizar el número de transferencias laborales en todas las reglas de despacho. Esto se debe a que, con esta regla, se maximiza el tiempo en el centro de trabajo actual, reduciendo de esta forma el tiempo empleado en desplazarse entre centros.

Para la mayoría de los casos, las reglas de asignación de movimiento de trabajadores en función de los cuellos de botella no funcionaron mejor que las reglas clásicas. Forzar el movimiento de operarios a los centros de trabajo con cuellos de botella puede producir cuellos de botella temporales debido a la cantidad de movimientos que tienen que llevar a cabo los empleados.

### 3.3 Conclusiones

Tras la revisión bibliográfica realizada podemos establecer las siguientes conclusiones:

- Se han llevado a cabo numerosos estudios y se han inventado diferentes métodos para intentar solucionar los problemas de *scheduling*.
- La simulación es un método ampliamente utilizado pues permite observar el comportamiento de los talleres ante diversas situaciones.
- Búsqueda continua de reducción de costes.
- Las reglas que tienen en cuenta los tiempos de cambio son las más eficientes, y esta diferencia se hace más notable al aumentar la carga de trabajos en el taller.
- Los textos analizados no tienen en cuenta los tiempos de preparación del cambio, sino que sólo se contempla el propio tiempo de cambio.
- Tendencia creciente actual en diseñar reglas de asignación de prioridades combinando reglas clásicas procurando así cumplir más de un objetivo.



- Las reglas propuestas por los autores suelen proporcionar mejores resultados que las reglas clásicas, pero del mismo modo suelen ser más complejas.
- Muchas de las reglas analizadas no podrían ser empleadas en cualquier planta, pues algunas de ellas tienen un alto nivel de complejidad como para ser realizadas por un operario, por lo que se requeriría de sistemas informáticos que realicen la asignación de prioridades.
- La búsqueda de textos que recogiesen reglas de asignación laboral ha sido más laboriosa.
- Las reglas que tienen en cuenta la asignación laboral evitan que los operarios tengan que realizar desplazamientos excesivos.

## 4 METODOLOGÍA

En este capítulo se analizarán una serie de conceptos importantes relacionados con la metodología aplicada para la realización de este Trabajo Final de Grado. Se comentarán las principales características de los sistemas y procesos productivos, clasificaciones y los objetivos que se persiguen optimizar en las plantas actuales.

### 4.1 Diseño del proceso productivo

Un aspecto a tener en cuenta a la hora de diseñar y planificar una línea de producción es repartir las tareas de modo que los recursos productivos estén utilizados de la forma más ajustada posible a lo largo del proceso. El equilibrado de la línea de producción consiste en dividir el proceso en estaciones de modo que la carga de trabajo de cada puesto se encuentre lo más ajustado posible al tiempo de ciclo. Una cadena está bien equilibrada cuando no hay tiempos de espera entre estaciones: esto se consigue sincronizando el flujo del proceso.

En (Suñé, Gil y Arcusa, 2004) se habla del concepto de producción en *flujo de arrastre* donde se persigue producir en todo momento lo que el cliente demanda en el instante en el que lo demanda. Se denomina así porque el cliente “arrastra” mediante su demanda del resto de eslabones que serían las etapas del proceso productivo. Comenta que para conseguir este tipo de producción es necesaria una buena planificación de la capacidad productiva, ya que se debe garantizar, en la medida de lo posible, que las instalaciones puedan satisfacer la demanda de sus clientes.

El equilibrio de capacidad es una condición necesaria en la producción en flujo síncrono para que no se generen stocks intermedios, pero no es una condición suficiente, ya que el diseño de los procesos también influye en la aparición de stocks.

Podemos clasificar los stocks en 3 tipos:

- **Stock de materias primas:** componentes a la espera de ser procesados
- **Stock de producto acabado:** productos a la espera de ser enviados al cliente
- **Stock en curso:** cantidad de producto semielaborado entre procesos. Se puede deber a:
  - La tecnología necesita unos tiempos de proceso o espera como el secado
  - Enlace entre dos procesos de diferentes capacidades
  - Tiempos de preparación elevados

#### 4.1.1 Estudio del trabajo

La meta de la medición de trabajos es establecer unos tiempos para cada tarea que debamos ejecutar. La medición de trabajos nos sirve para saber cuánto tarda un operario en realizar una tarea determinada. Todas las mejoras que podamos realizar sobre nuestros trabajos irán ligadas a los tiempos de procesamiento, ya que son estos los que nos marcan los plazos de entrega o los posibles presupuestos (Suñé, Gil y Arcusa, 2004).

La empresa tiene que conocer bien los tiempos de toda su planta porque nos va a permitir:

**Tabla 4: Aspectos que se pueden conseguir conociendo los tiempos del proceso.  
(Fuente: Suñé, Gil y Arcusa, 2004).**

<b>Respecto a la maquinaria</b>
Controlar la proporción de paradas y sus causas
Programar la carga de la máquina
Seleccionar nueva maquinaria
<b>Respecto al personal</b>
Determinar el nº de operarios necesario
Establecer los costes de mano de obra
Establecer planes de trabajo
<b>Respecto al producto</b>
Comparar diseños
Establecer presupuestos
Comparar métodos de trabajo

Una vez hayamos determinado cuales son nuestros tiempos de trabajo, los directores necesitarán actualizaciones constantes del estado de la producción para proporcionar información a los directores de la cadena de suministro, personal, clientes, etc.

La complejidad de estas actuaciones hace que sea necesario la implementación de sistemas de programación de tareas informatizados.

#### **4.1.2 Simulación de procesos industriales**

Como se ha comentado previamente, las empresas buscan configurar su proceso productivo de modo que el desperdicio sea mínimo. La incertidumbre de la demanda, los cambios en los suministros, retrasos o adelantos de la llegada de productos u otras modificaciones en el entorno pueden provocar que nuestro proceso no sea completamente eficiente. Además, la complejidad del producto o productos fabricados, así como la distribución en planta también afecta a la eficiencia del proceso. Por todo esto es fundamental aplicar herramientas que nos permitan resolver esta problemática.

La simulación se ha consolidado como una de las mejores herramientas en el ámbito de la organización industrial, pues nos permite representar nuestros procesos de manera sencilla y anticiparse a diversos problemas que puedan aparecer en nuestro sistema. Además, nos permite comprobar si ciertos cambios en nuestra planificación son plausibles sin tener que llevarlos a cabo con los costes que estos podrían conllevar.

Según (Himmelblau & Bischoff, 2004) las ventajas de la simulación son las siguientes:

- **Experimentación económica:** Se puede estudiar de un modo más sencillo, económico y rápido que mediante una planta real.
- **Extrapolación:** Se pueden ensayar modelos extremos que podrían ser impracticables en una planta real.
- **Estudio de conmutabilidad:** La simulación permite comparar distintos diseños que aún no se están llevando a cabo y ensayar diferentes hipótesis.
- **Repetición de experimentos:** Se puede estudiar el efecto de diversas variables introduciendo o retirando errores.
- **Ensayo de sensibilidad:** Puede verse la sensibilidad de ciertos parámetros para establecer unos valores límites que el proceso real no podría sobrepasar.

#### 4.1.2.1 Sistemas y modelos de simulación

En (Guasch, Piera, Casanovas & Figueras, 2002) se define sistema como una colección de objetos o entidades que interactúan entre sí para alcanzar un cierto objetivo. Por lo tanto, el estado de un sistema puede definirse como el conjunto mínimo de variables necesarias para caracterizar o describir todos aquellos aspectos de interés del sistema en un cierto instante de tiempo. A estas variables se las conoce como variables de estado. Además, considerando como finalidad de los experimentos el estudio del comportamiento ante el dominio temporal, podemos clasificar los sistemas en continuos, discretos, orientados a eventos discretos y combinados.

- **Sistemas continuos:** Las variables de estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo, como por ejemplo el aumento del nivel del agua en una bañera.
- **Sistemas de eventos discretos:** Las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en un instante de tiempo o en una secuencia de instantes y permanecen constantes el resto del tiempo.
- **Sistemas mixtos:** Combinan subsistemas que siguen filosofías continuas y discretas.

Existen otras alternativas a la simulación digital para imitar el comportamiento de un sistema, como pueden ser el prototipado a escala, la representación analógica del sistema mediante circuitos eléctricos o la descripción cualitativa del sistema entre otros. Todas estas técnicas tienen en común que, para imitar el comportamiento de un sistema, necesitan la descripción de las características internas del mismo. Esto es lo que se conoce como modelo, y el proceso de obtención de estas características se denomina modelado.

Existen muchos tipos de modelos, pero en este caso el objetivo para el cual se va a desarrollar es la simulación digital, por lo que es necesario que los modelos puedan ser procesados por un ordenador. Estas características determinan el uso de modelos simbólicos matemáticos, los cuales mapean las relaciones existentes entre las propiedades físicas del sistema que se pretende modelar en las correspondientes estructuras matemáticas.

Aunque existe una gran diversidad de métodos para el desarrollo de modelos matemáticos, existen consideraciones que deben tenerse en cuenta a la hora de garantizar una representación eficiente de la realidad:

- Un modelo se desarrolla a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis, de modo que la realidad es representada parcialmente.
- Un modelo se construye con una finalidad específica, de manera que tiene que resultar útil para dicho fin.

Una vez aclarado esto, podemos clasificar los modelos según la evolución temporal, según como son las variables que dependen del sistema y según como se comporta el sistema.

En función de la evolución temporal, podemos distinguir:

- **Modelos estáticos:** Representan el sistema en un cierto instante de tiempo y en su formulación no se considera el avance del tiempo. Si se cambia el punto de equilibrio, el modelo permite deducir el resto de los valores, pero no la manera en la que han cambiado.
- **Modelos dinámicos:** Permiten deducir cómo las variables de interés evolucionan respecto al tiempo.

Por otra parte, atendiendo a como son las variables que dependen del sistema, podemos diferenciar:

- **Modelos deterministas:** Ofrecen un conjunto de valores de salida para un conjunto de entradas conocidas. Pueden ser completamente definidos a partir del estado previo y sus entradas.
- **Modelos estocásticos:** Precisan una o más variables aleatorias. No se genera un único conjunto de salida, sino que los resultados generados son utilizados para estimar el comportamiento real del sistema.

Por último, si tenemos en cuenta cómo se comporta el sistema:

- **Modelos continuos:** Representan la evolución de las variables de manera continua.
- **Modelos discretos:** Representan la evolución de las variables de estado en un instante determinado o en un conjunto de instantes.

En lo concerniente a este trabajo, llevaremos a cabo simulaciones de eventos discretos, que son modelos dinámicos, estocásticos y discretos en los que las variables de estado cambian de valor en instantes no periódicos de tiempo. Estos instantes de tiempo se corresponden con la ocurrencia de un evento. Un evento se define como una acción instantánea que puede cambiar el estado de nuestro modelo.

La simulación de eventos discretos representa la base de este Trabajo Fin de Grado, pues en los sistemas productivos y logísticos reales se modelan adecuadamente con esta metodología.

#### 4.1.2.2 Etapas de un proyecto de simulación

Una vez comentado en qué consiste la simulación de procesos y sus características principales, debemos mencionar las etapas a la hora de llevar a cabo un proyecto de este tipo. Según (Guasch, Piera, Casanovas & Figueras, 2002) podemos diferenciar las siguientes etapas:

- **Formulación del problema:** La especificación de objetivos es una de las tareas más importantes de un proyecto de simulación. Estos objetivos tienen que estar claros tanto para el cliente como para el ingeniero para poder abordar el problema eficientemente.
- **Diseño del modelo conceptual:** A partir del sistema real, se debe realizar un modelo simplificado e ir desarrollándolo poco a poco hasta completarlo. Esta simplificación consiste en una serie de relaciones matemáticas y estructurales.
- **Recogida y tratamiento de datos:** Para obtener buenos resultados es indispensable tener buenos datos. En el mejor de los casos los datos los proporcionará el cliente, pero si esto no es así, habrá que destinar un tiempo determinado a la recogida de estos para poder llevar a cabo la simulación.
- **Construcción del modelo:** Deben construirse varios modelos simplificados con las partes más esenciales del sistema.
- **Verificación y validación:** Comprobar que el modelo virtual se ajusta al modelo conceptual y comprobar si se ajusta o no a la realidad.
- **Análisis:** Experimentar con el modelo con el objetivo de obtener conclusiones que permitan tomar decisiones con mayor seguridad.
- **Documentación:** Documentar día a día el estado del proyecto con los objetivos de poder informar en cada momento del estado del proyecto y una posible reutilización del modelo en un futuro.
- **Implementación:** Tomar decisiones como consecuencia del estudio de simulación.

A continuación, se muestra una tabla resumen de las etapas de un proyecto simulación:

**Tabla 5: Tabla resumen de las etapas de un proyecto de simulación. (Fuente: Guasch, Piera, Casanovas & Figueras, 2002)**

Etapa	Descripción
Formulación del problema	Define el problema que se pretende estudiar
Diseño del modelo conceptual	Elaboración de un modelo simplificado mediante las características del sistema
Recogida de datos	Identificar, recoger y analizar los datos necesarios para el estudio
Construcción del modelo	Construcción del modelo a partir del modelo conceptual y de los datos
Verificación y validación	Comprobar que el modelo se comporta adecuadamente y que se corresponde con el sistema real
Análisis	Analizar los resultados de la simulación para detectar problemas y proponer mejoras y soluciones
Documentación	Proporcionar información sobre el trabajo efectuado
Implementación	Poner en práctica las decisiones efectuadas

#### 4.1.2.3 *FlexSim* como herramienta de simulación

Dado que las simulaciones de este Trabajo Fin de Grado se van a llevar a cabo con el software *FlexSim*, es conveniente añadir una breve introducción.

*FlexSim* es un potente software de simulación con interfaz 3D, lo que nos permite emular la apariencia de un sistema real, haciendo que sea más fácil de comprender lo que está sucediendo en nuestro sistema. A pesar de su sencillez, ofrece multitud de posibilidades, permitiendo modelar sistemas altamente complejos.

En cuanto a la construcción del modelo, contiene una extensa biblioteca de objetos standard que pueden ser usados para construir nuestros talleres, aunque también nos permite modificarlos o importar objetos 3D personalizados, hechos previamente. Además, *FlexSim* nos ofrece una amplia gama de listas y prioridades pre-programadas. Cuenta con un lenguaje de programación *FlexScript*, semejante al lenguaje C, aunque fue diseñado con una arquitectura compatible con C++.

Una vez hayamos construido nuestro modelo, este *software* cuenta en su panel de recursos una extensa lista de tablas y gráficos para visualizar los resultados obtenidos tras nuestra simulación.

Por último, podemos elaborar diversos escenarios con diversas variables y restricciones para ver como estas pueden afectar a nuestro modelo sin la necesidad de que sean modificadas en el diseño real.

Actualmente este software se encuentra en auge gracias a que encaja adecuadamente con los pilares de la Industria 4.0:

- **Simulación:** el modelado nos permite simular unas instalaciones reales con el fin de obtener una serie de resultados clave en nuestro proceso.
- **Integración del sistema:** los modelos virtuales evalúan las posibilidades del sistema para poder tomar decisiones en el mundo real.
- **Sistemas autónomos:** gracias a la herramienta *Process Flow* se pueden crear multitud de lógicas.
- **Computación en la nube:** este software ofrece la posibilidad de ejecutar modelos en la nube mediante su servidor web.
- **Realidad aumentada:** existe un soporte para la realidad virtual.
- **Big Data:** los datos generados mediante las simulaciones pueden predecir sucesos futuros o las soluciones bajo ciertas circunstancias.

A continuación, comentaremos la interfaz de usuario de *FlexSim* de modo introductorio.

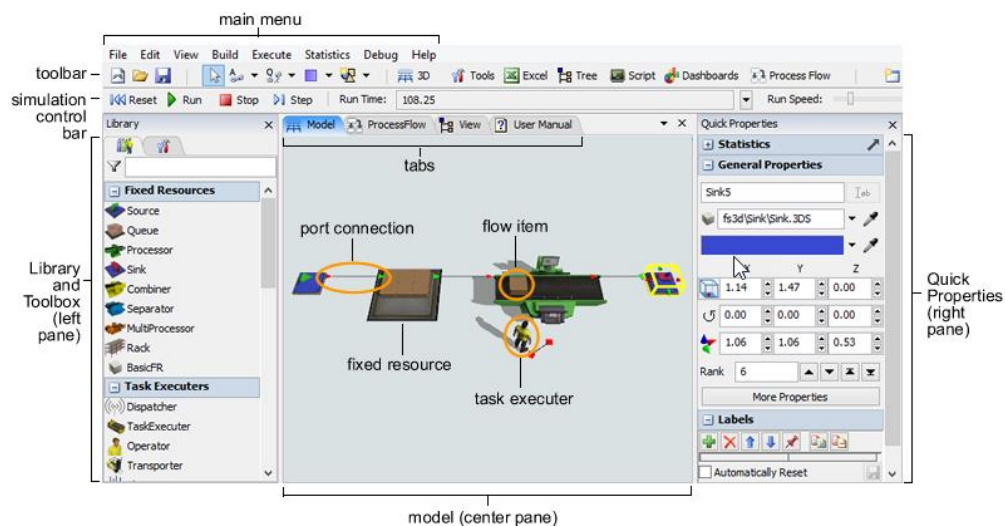


Figura 9: Interfaz usuario *FlexSim*. (Fuente: [www.flexsim.com/es/](http://www.flexsim.com/es/))

- **Modelo 3D (Panel central):** Corresponde con el espacio de trabajo principal que se utiliza para crear el modelo de simulación 3D. Los objetos se arrastran desde la librería para crear la simulación.
- **Elementos de flujo (Flow item):** Objetos que se mueven a través de la simulación.
- **Recursos fijos (Fixed resource):** Objetos que permanecen fijos en el modelo. Cada recurso fijo realiza una función específica.
- **Ejecutores de tareas (Task executor):** Objetos que pueden moverse en el modelo 3D y realizar tareas.
- **Biblioteca (Library):** Se ubica en el panel izquierdo. Contiene una variedad de objetos que pueden usarse para crear el modelo de simulación. La biblioteca mostrará diferentes objetos según la herramienta que esté activa en el panel central.
- **Caja de herramientas (Toolbox):** Situada en el panel izquierdo. Se administran las herramientas a usar en el modelo de simulación, como pueden ser recopiladores de estadísticas, tablas, listas...



- **Propiedades rápidas (*Quick properties*):** Ubicada en el panel derecho. Permite editar la configuración y propiedades del objeto seleccionado.
- **Pestañas (*Tabs*):** Cuando se abre alguna herramienta de FlexSim, se puede compartir el panel central.
- **Puertos y conexiones:** Los objetos del modelo de simulación deben estar conectados de algún modo para que puedan interactuar.
  - Puertos de entrada y salida: Determinan cuando y como un *flow ítem* pasa de un recurso fijo a otro.
  - Puerto central: Crean un punto de referencia entre dos objetos. Normalmente conectan un recurso fijo con un ejecutor de tareas.
- **Menú principal:** Contiene las herramientas y comandos que se pueden usar para construir el modelo.
- **Barra de herramientas (*Toolbar*):** Proporciona acceso rápido a las herramientas más empleadas como puede ser guardar el modelo.
- **Barra de control de simulación:** Contiene las herramientas y comandos que se necesitan para ejecutar la simulación.

### 4.1.3 Distribución en planta

Se denomina distribución en planta a la disposición de los procesos y sus actividades en las plantas de producción, siendo un aspecto muy importante en el proceso productivo, pues persigue optimizar la ordenación de materiales, personas y servicios. Entre sus objetivos destacaremos:

- Minimizar el manejo de materiales para disminuir los tiempos de transporte
  - Reducir los costes de movimiento de materiales
  - Disminuir deterioros en el transporte de productos
- Mejor utilización del espacio disponible

En resumen, lo que se busca es ocupar el mínimo espacio con el mínimo recorrido de personas y materiales, pero, persiguiendo la máxima comodidad y flexibilidad en las configuraciones (Suñé, Gil y Arcusa, 2004).

Según (Cuatrecasas, 2009), existen dos modelos básicos:

- Disposición orientada al proceso: puestos de trabajo agrupados por el tipo de actividad que desempeñan
- Disposición orientada al producto: puestos de trabajo dispuestos de acuerdo con la secuencia de operaciones a seguir para obtener el producto.

Como podemos observar, en la disposición orientada al proceso (funcional), el producto tiene que ir hasta el puesto de trabajo mientras que, en la disposición orientada al producto (cadena), los puestos de trabajo ya se encuentran en el camino del producto. A continuación, profundizaremos un poco más en estos aspectos:

- Distribución funcional (por talleres)

Distribución basada en puestos de trabajo diferenciados por los que tienen que pasar los productos siguiendo una ruta específica para cada uno. Es la distribución más empleada y la más recomendada para plantas convencionales, pero no para aquellas que utilicen la gestión *lean*.

En este tipo de plantas se emplean equipamientos genéricos, costosos y que precisan mano de obra cualificada. Ningún puesto está especializado en un producto en concreto. Gracias a que los productos pueden seguir muchas rutas, las averías en algún puesto de trabajo no suponen una incidencia reseñable.

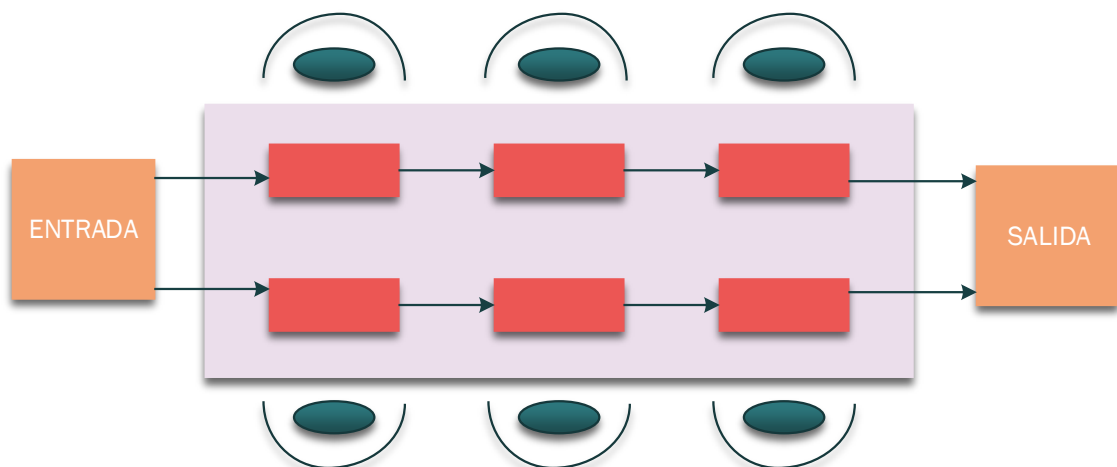
Por el contrario, este tipo de disposición opera habitualmente por lotes, lo que implica que cada unidad de producto tendrá que estar en un puesto de trabajo el tiempo que lleve procesar dicho producto, más el tiempo que lleve procesar el resto del lote.

- Disposición en flujo (en cadena de montaje)

Los puestos de trabajo están situados juntos, de acuerdo con la secuencia de operaciones que tiene que realizar el producto deseado. Por ello, el entregable debe tener un alto grado de normalización y con una demanda regular.

En este tipo de disposición ya no será necesario el procesamiento en lotes porque cuando un puesto de trabajo termine, esa unidad de producto será transferida al puesto siguiente. Esto tiene un inconveniente, y es que, si los tiempos de procesamiento en los puestos de trabajo no es igual, o muy similar, se acabarán acumulando unidades entre puesto y puesto.

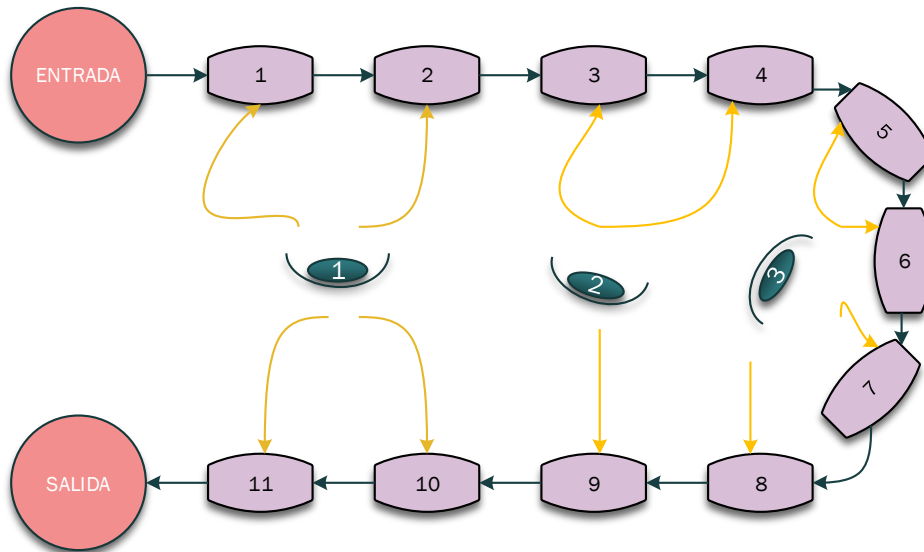
La distribución en cadena más simple consiste en una serie de operarios unos al lado de otros en una misma mesa. Tras haber ejecutado la operación asignada sobre la pieza, el operario cede la pieza al siguiente trabajador. Si los puestos de trabajo están más alejados, se pueden unir mediante una rampa, un transportador de rodillos o algún elemento similar de transporte. Este medio de transporte debe poseer una velocidad lo suficientemente lenta para que a los operarios les dé tiempo a procesar la pieza (Suñé, Gil y Arcusa, 2004)



**Figura 10: Distribución en cadena simple. (Fuente: Suñé, Gil y Arcusa, 2004)**

La disposición en forma de U es una disposición más flexible y avanzada que disminuye los tiempos de desplazamiento de los operarios, y que, además, permite la reasignación de más o menos operaciones a cada trabajador. Los puestos de entrada y salida de la línea se encuentran a la misma altura y pueden ser manejados por el mismo operario. Podemos

apreciar lo explicado en la siguiente figura, donde el operador 1 se encargará de las máquinas 1,2,10 y 11, el operador 2 se encargará de las máquinas 3,4 y 8 y, por último, el operador 3 se encargará de las máquinas 5,6,7 y 8.



**Figura 11: Disposición en forma de U**

- Distribuciones derivadas

Anteriormente se han comentado los modelos básicos de la distribución en planta, de los que pueden derivar otros modelos. Ahora comentaremos dos tipos de distribución derivados de los anteriores (Cuatrecasas, 2017).

- Distribución en puesto fijo o cadena de puestos fijos

Disposición derivada de la funcional que puede llevar a cabo lotes muy pequeños de productos variados. La diferencia consiste en que ahora los productos pueden ser voluminosos, por lo que en vez de que se muevan los productos, pueden ser los operarios los que se muevan hacia el producto

- Distribución en flujo continuo

Obtenida a partir de la disposición en cadena. Se caracteriza por un volumen elevadísimo de producción de productos homogéneos.

#### ***4.1.4 Tipos de producción de acuerdo con el producto y proceso***

A partir de las distribuciones explicadas anteriormente, existen de igual modo tipos de producción diferentes (Cuatrecasas,2009):

- Producción funcional a medida (*Job Shop*)

Se producen lotes más o menos pequeños de una amplia variedad de productos de poca o nula estandarización (“personalizadas”). Se emplean

equipos de escasa especialización, los cuales pueden agruparse según la función a desempeñar. Los centros de trabajo suelen estar integrados por personal cualificado. Dicho personal siempre tiene que estar en activo, mientras que los centros de trabajo pueden encontrarse en espera, lo que puede acabar provocando retrasos en los plazos de entrega y una gran cantidad de stock.

○ Producción funcional en lotes

El proceso requiere operaciones más especializadas que en el caso anterior. Los centros de trabajo siguen sin estar automatizados y se producen lotes mucho mayores.

El consumidor tiene que elegir entre las posibles variantes del producto, por lo que el entregable ya no es “a medida”.

Sigue habiendo una gran cantidad de recorridos, tiempos de espera, y stocks elevados. Este tipo de producción puede hacer frente a la variable demanda de los consumidores, pero necesitará reunir una cantidad suficiente de pedidos para su fabricación en lotes.

○ Producción en flujo o cadena (*Flow Shop*)

Nos encontramos con un sistema de orientación al producto, con lotes grandes de productos poco diferentes desempeñados en centros de trabajo no del todo especializados.

En este tipo de producción, resulta más sencillo solucionar los “cuellos de botella” pero a su vez, un fallo o una avería en una estación de trabajo puede detener toda la cadena.

○ Producción en flujo continuo

En esta modalidad, los trabajadores y los centros de trabajo desempeñan siempre las mismas labores, estando completamente especializados. De esta manera se consigue obtener una gran cantidad de productos, de gran calidad y a un coste muy bajo. Como el proceso, al ser tan especializado, es automático, los operarios sólo tienen que encargarse de las labores de supervisión y control.

## 4.2 Clasificación del sistema productivo

Existen diversas clasificaciones de los sistemas productivos recogidas en diversa bibliografía, ya que se pueden tener en cuenta diversos factores a la hora de realizar dicha separación. Según (Sánchez, 2019) una manera de clasificarlos es según los entornos de máquina.

### Entornos de máquina

- **Máquina única.**
- **Máquinas idénticas en paralelo (Pm):** Hay  $m$  máquinas idénticas en paralelo. El trabajo  $j$  requiere una sola operación y puede ser procesado en cualquiera de las  $m$  máquinas o en cualquiera que pertenezca al subconjunto dado.

- **Máquinas en paralelo con diferentes velocidades (Qm).**
- **Máquinas no relacionadas en paralelo (Rm).**
- **Flow Shop (Fm):** Hay  $m$  máquinas en serie. Todos los trabajos tienen que ser procesados en cada una de las  $m$  máquinas siguiendo la misma ruta.
- **Flow Shop Flexible (FFc):** Hay  $c$  etapas en serie y en cada etapa hay  $m$  máquinas en paralelo. También se denomina Flow Shop Híbrido.
- **Job Shop (Jm):** Es un taller con  $m$  máquinas donde cada trabajo tiene su propia ruta predeterminada.
- **Job Shop Flexible (FJc):** En lugar de  $m$  máquinas en serie hay  $c$  centros de trabajo y en cada centro hay una cantidad  $m$  de máquinas en paralelo.
- **Open Shop (Om):** Hay  $m$  máquinas y cada trabajo tiene que ser procesado de nuevo en cada una de las  $m$  máquinas. No hay restricciones en cuanto a las rutas.

No obstante, añadiremos 3 clasificaciones más para abarcar un mayor rango de posibilidades en los tipos de talleres:

Según la relación con el cliente

- **Taller que trabaja contra pedido.**
- **Taller que trabaja contra stock.**
- **Taller mixto (se trabaja parte contra pedido y parte contra stock)**

Según la naturaleza de los parámetros del problema (tiempo cambio, tiempo de procesamiento, etc.)

- **Taller determinístico:** los parámetros no tienen una distribución de probabilidad asociada, es decir, dichos parámetros son conocidos y fijos.
- **Taller estocástico:** al menos uno de los parámetros del problema es una variable aleatoria.

Según la naturaleza del proceso de llegada

- **Taller estático:** todos los trabajos están disponibles en el instante inicial y hasta que estos estén completamente finalizados, no llegarán nuevos trabajos. Pueden asignarse prioridades desde el comienzo y los atributos de los trabajos no cambian con el transcurso del tiempo. Para resolver estos casos suelen emplearse algoritmos matemáticos donde habitualmente no se tienen en cuenta flexibilidad de rutas, tiempos de cambio o el operario como recurso limitado.
- **Taller dinámico:** los trabajos van llegando al taller en el transcurso del tiempo lo cual implica que haya que modificar (replanificación) continuamente nuestro plan de trabajo para adaptarlo a las nuevas necesidades. Para resolver este tipo de casos suele emplearse la simulación.

### 4.3 Restricciones de procesamiento

En (Sánchez, 2019) se comentan una serie de restricciones de procesamiento que van a limitar el comportamiento de los talleres y sistemas de producción.

- **Fecha de lanzamiento (rj):** el trabajo  $j$  no puede iniciar su procesamiento antes de su fecha de lanzamiento.
- **Preemptions (prmp):** Indican preferencias de unos trabajos sobre otros, permitiendo interrumpir el procesamiento de un trabajo para procesar otro. Cuando este último trabajo haya acabado, el anterior puede continuar su procesamiento desde donde lo había dejado.
- **Restricciones de precedencia (prec):** Pueden aparecer en una máquina individual o en un entorno de máquinas en paralelo e indican que un trabajo se tiene que completar antes de que comience otro. Si cada trabajo tiene como máximo un sucesor y como máximo un predecesor, se denomina cadena. Si cada trabajo tiene como máximo un sucesor y no hay restricciones en los predecesores, se denomina *intree*. Si ocurre lo contrario, tenemos un *outtree*.
- **Familias de trabajo (fmls):** Los  $n$  trabajos se asignan a  $F$  familias de trabajo diferentes. Los trabajos de la misma familia pueden tener diferentes tiempos de procesamiento, pero pueden ser procesados en una máquina uno tras otro sin incurrir en tiempos de configuración.
- **Procesamiento por lotes (lote(b)):** Una máquina puede ser capaz de procesar una serie de trabajos al mismo tiempo.
- **Breakdowns o averías (brkdwn):** Las averías indican momentos de tiempo en los que la máquina no se encuentra disponible.
- **Bloqueo (bloqueo):** Si un sistema tiene un *buffer* limitado entre dos etapas sucesivas de un proceso, puede darse el caso de que alguna etapa no esté trabajando. Aparecen por falta de sincronización entre las etapas.
  - **Bloqueo aguas abajo:** las máquinas aguas abajo no son capaces de trabajar tan rápido como las predecesoras por lo que el *buffer* entre ambas etapas irá aumentando.
  - **Bloqueo aguas arriba:** si las máquinas aguas arriba van muy lento, el *buffer* entre las etapas se va vaciando, y las etapas aguas abajo se quedan sin trabajos.

Son numerosos los textos e investigaciones que tratan de reducir estos bloqueos, pues representan tiempos muertos en los que un trabajo no está siendo procesado o una máquina no está funcionando como debería.

- **Sin espera (nwt):** No se permite a los trabajos esperar entre dos máquinas sucesivas. Esto implica que la hora de inicio de un trabajo en la primera máquina tiene que retrasarse para garantizar que el trabajo pueda pasar por el taller sin tener que esperar por cualquier máquina.
- **Recirculación (rcrc):** la recirculación consiste en que un trabajo tiene que pasar por una misma etapa más de una vez. Puede ocurrir en un *job shop* cuando un trabajo tenga que visitar una máquina repetidas veces, o en algún tipo de proceso en el que se lleva a cabo un control de calidad. Si el producto no cumple con las exigencias será devuelto aguas arriba para repetir una parte del proceso.

Las recirculaciones son menos frecuentes hoy en día pues no están en consonancia con la filosofía *Lean* de fabricar todo bien a la primera.

## 4.4 Características del proceso básico del taller

El proceso del taller incluye, las máquinas, los trabajos con sus operaciones, el personal, etc.

El problema del taller ha originado diversas investigaciones por su naturaleza combinatoria. Los problemas combinatorios se clasifican en dos clases: P y NP.

La clase P (tiempo polinómico) consta de problemas donde se pueden encontrar algoritmos eficientes que conduzcan a una solución óptima. Un algoritmo es eficiente cuando el tiempo empleado en encontrar una solución óptima está acotado por una función polinómica del tamaño del problema.

En los problemas NP es poco probable encontrar un algoritmo de optimización que esté acotado polinómicamente. Los problemas NP, a su vez se dividen en *NP-hard* y *NP-complete*.

La mayoría de los problemas de *scheduling* son NP y por tanto se emplean algoritmos de aproximación, métodos metaheurísticos...

## 4.5 Objetivos a optimizar

Los términos mostrados a continuación hacen referencia a los objetivos más típicos en los sistemas de producción:

- **Makespan ( $C_{max}$ ):** Diferencia de tiempo entre el comienzo y finalización de una planificación (es decir, tiempo transcurrido desde el comienzo del procesamiento del primer trabajo hasta la fecha de finalización del último trabajo procesado). La idea de minimizar este factor es importante porque así se reducen los tiempos de espera del proceso, aumentando la productividad y la utilización de los elementos productivos. Esto implica que los costes totales de fabricación y mano de obra también se reduzcan.
- **Tiempo medio de flujo ( $\bar{F}$ ):** Tiempo promedio que un trabajo gasta en un sistema de fabricación durante su procesamiento.

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n F_i \right]$$

Siendo:

- $F_i$  tiempo de flujo del trabajo  $i$ .  $F_i = c_i - a_i$
- $c_i$  tiempo de finalización del trabajo  $i$
- $a_i$  tiempo de llegada del trabajo  $i$
- $n$  número de trabajos procesados durante la simulación

- **Tiempo de flujo máximo ( $F_{max}$ ):** Valor máximo de los tiempos de flujo durante el procesamiento de los trabajos.

$$F_{max} = \max(F_i), 1 \leq i \leq n$$

- **Tardanza media ( $\bar{T}$ ):** Tardanza promedio de un trabajo en un sistema de fabricación durante el procesamiento.

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n T_i \right]$$

Siendo:

$T_i$  tardanza del trabajo  $i$ .  $T_i = \max(0, L_i)$

$L_i$  retraso del trabajo  $i$ .  $L_i = c_i - d_i$

$d_i$  fecha de entrega del trabajo  $i$

- **Tardanza máxima ( $T_{max}$ ):** Valor máximo de la tardanza durante el procesamiento de los trabajos.

$$T_{max} = \max(T_i), 1 \leq i \leq n$$

- **Número de trabajos tardíos:** Cantidad de trabajos que se completan después de la fecha de entrega.
- **Número total de cambios:** Valor del número máximo de cambios producidos durante el procesamiento.
- **Tiempo medio de cambio ( $MST$ ):** Tiempo promedio que el trabajo gasta para la realización de un cambio de máquina.

$$MST = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n S_i \right]$$

Donde:

$S_i$  tiempo de cambio del trabajo  $i$

## 4.6 Problemas causados por los tiempos de cambio

Los procedimientos de cambio o configuración pueden considerarse infinitamente variados, pues dependen de los tipos de operaciones y del tipo de equipo que se esté usando. En (Shingo, 1985) se afirma que, si estos procedimientos son analizados desde puntos de vista diferentes, se puede comprobar que las operaciones de cambio comprenden una secuencia de pasos. Los 4 pasos básicos que originan los tiempos de cambio o configuración son:

- **Preparación, verificación de materiales, etc.** Este paso garantiza que todas las piezas y herramientas estén donde deben estar y que están funcionando correctamente. También se incluye en este paso el período después del



procesamiento donde algunos de estos elementos son devueltos a su almacenamiento, así como la limpieza de la maquinaria.

- **Montaje y extracción de herramientas, cuchillas, piezas, etc.** Este paso incluye la eliminación de este tipo de piezas después del procesamiento y la colocación de piezas nuevas para procesar el siguiente lote.
- **Mediciones, ajustes y calibraciones.** Aquí se recogen todas las medidas que tienen que realizarse antes del procesamiento, como pueden ser la colocación, el dimensionado, medición de temperaturas, etc.
- **Pruebas y ajustes.** En este paso se recogen los ajustes realizados después de procesar un producto de prueba. Cuanto más exhaustivas sean las mediciones del paso anterior, más sencillos serán los ajustes a realizar.

La duración y la frecuencia de los pasos anteriores dependerán en mayor o menor medida de la habilidad y experiencia de los operarios encargados de realizar estas tareas.

Se ha podido observar que, en diversa bibliografía, los tiempos de cambio no son tenidos en cuenta, lo que puede originar errores e imperfecciones a la hora de obtener resultados y conclusiones.

A continuación, se comentarán los problemas principales en la planificación de la producción originados por los tiempos de cambio.

#### *4.6.1 Capacidad real de la máquina menor que la capacidad teórica*

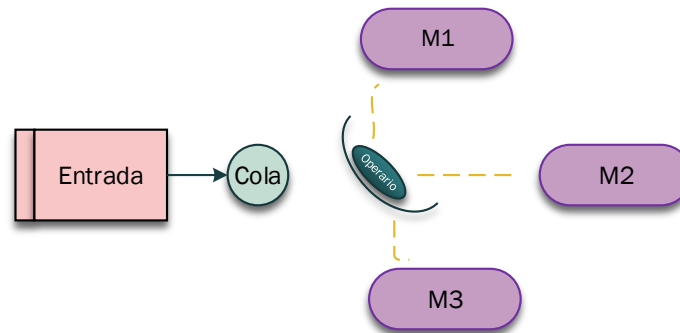
Los tiempos de cambio constituyen un intervalo de tiempo en el que la máquina no está produciendo, es decir, un tiempo muerto. Estos tiempos influyen de manera directa sobre la producción, por lo que hay que tenerlos en cuenta para determinar si una planificación determinada es o no factible.

#### *4.6.2 Superposición de cambios de máquinas*

Los recursos de un sistema de producción son limitados, lo que conlleva que no siempre se encuentren disponibles cuando se les necesite.

Para explicar este fenómeno, usaremos el siguiente ejemplo:

Un proceso de fabricación está formado por tres máquinas en paralelo y un operario encargado de realizar los cambios de máquina. Si coinciden dos o más cambios, aparecerán tiempos de espera en las máquinas en las que el operario no pueda trabajar. Estos tiempos de espera nos generan un tiempo muerto.



**Figura 12: Ejemplo superposición de cambio de máquinas**

Por lo tanto, podemos concluir que es necesario tener en cuenta dos recursos limitados, la máquina y el operario, pues una mala gestión de ambos puede resultar perjudicial para nuestra planificación.

#### 4.6.3 Dependencia de los tiempos de cambio con la secuencia

Un aspecto que debe tenerse en cuenta a la hora de realizar nuestra planificación es que los tiempos de cambio de una máquina no tienen por qué ser iguales para diferentes trabajos.

Para clarificar este aspecto, comentaremos un ejemplo que consiste en una máquina capaz de fabricar cuatro tipos de pintura. El tiempo de cambio consiste en el intervalo de tiempo necesario para limpiar la máquina y evitar que queden restos del color anterior antes de pasar a fabricar otro color. La tabla siguiente muestra los tiempos de cambio necesarios para pasar de un color a otro.

**Tabla 6: Ejemplo de los tiempos de cambio dependientes de la secuencia de pintura escogida**

Colores	Magenta	Amarillo	Azul	Negro
Magenta	0	7	6	3
Amarillo	1	0	9	2
Azul	5	5	0	10
Negro	8	2	4	0

Con este ejemplo podemos comprobar como los tiempos de cambio varían en función de la secuencia de colores escogida. Si escogemos la secuencia Magenta-Azul-Amarillo-Negro el tiempo total de cambio será de trece unidades de tiempo (6+5+2). En cambio, si utilizamos la secuencia inversa, el tiempo total de cambio será de dieciséis unidades de tiempo (2+9+5).

#### 4.6.4 Sincronización entre máquinas

Explicaremos este problema mediante otro ejemplo:

Contamos con un taller compuesto por dos máquinas en serie ( $M_1$  y  $M_2$ ) y dos operarios, cada uno atendiendo a una sola máquina, por lo que no podemos considerarlo como recurso limitado.

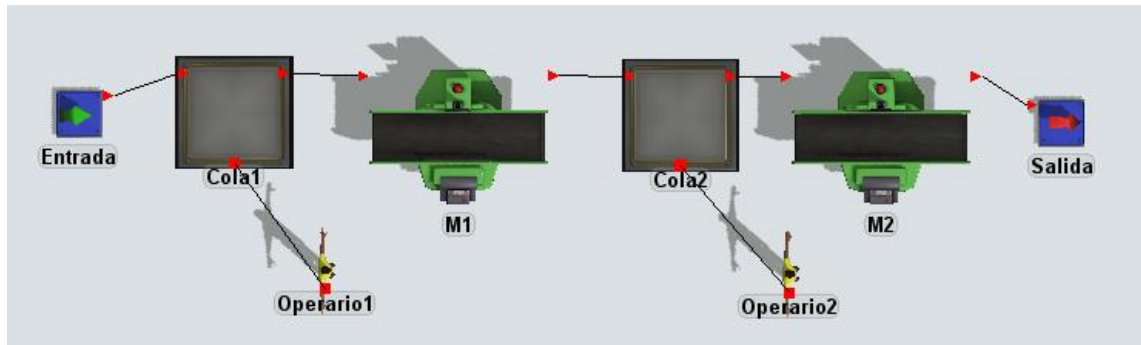


Figura 13: *Flow shop* de dos etapas

Existen dos trabajos ( $J_1$  y  $J_2$ ) con dos operaciones cada uno, que deben realizarse primero en  $M_1$  y luego en  $M_2$ . Según la regla de despacho en uso, primero debe procesarse  $J_1$  y luego  $J_2$ .

Dividiremos cada operación en tres tareas: el ajuste de la máquina para procesar el trabajo, el propio tiempo de procesamiento y la eliminación del material sobrante de la máquina.

La programación de ambas máquinas puede verse en la figura siguiente:

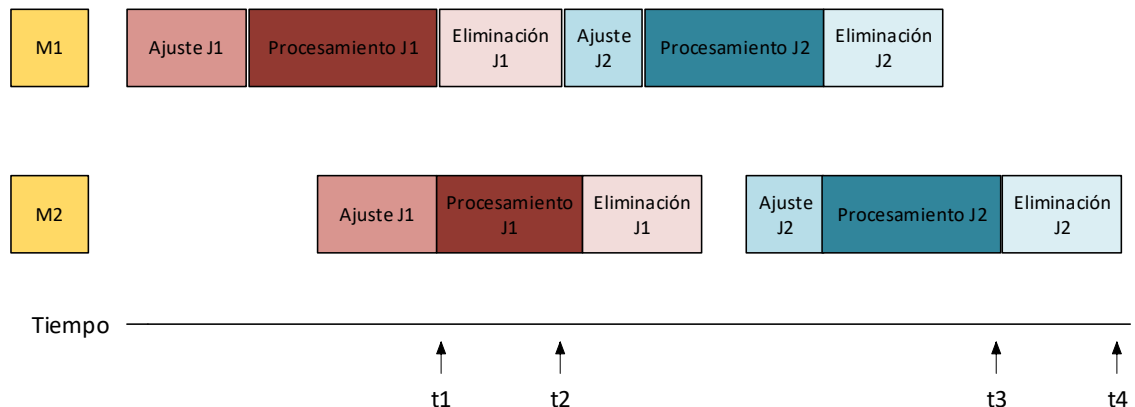


Figura 14: Planificación de los trabajos  $J_1$  y  $J_2$  representados en un diagrama de Gantt

En dicha programación:

- El trabajo  $J_1$  acaba en  $t_1$  pero mantiene la máquina  $M_1$  ocupada hasta  $t_2$ .
- Se puede comenzar el ajuste de  $J_1$  en  $M_2$  aunque se esté procesando en  $M_1$ .
- El taller queda libre en  $t_4$  aunque los trabajos acaban en  $t_3$ .
- La máquina  $M_2$  tiene dos tiempos muertos, uno mientras no comienza Ajuste  $J_1$  y otro entre la eliminación  $J_1$  y Ajuste  $J_2$ .

- Un trabajo solo necesita estar en la máquina mientras dure su procesamiento, pero la máquina dedicará su tiempo a ese trabajo durante el Ajuste, procesamiento y eliminación del sobrante.

## 4.7 Reducción de los tiempos de cambio

Como se ha indicado anteriormente, las empresas buscan producir la mayor cantidad posible de productos con unos plazos y costes mínimos para garantizar la competitividad en el mercado. Es por esto, que a lo largo de los años ha aumentado el interés en aumentar la capacidad de trabajo de las máquinas mediante la reducción de los tiempos de cambio.

Para poder conseguir este objetivo se han ido diseñando diferentes técnicas como la estandarización de tareas y herramientas, técnicas SMED, procesos de mejora continua, etc. Uno de los modos para poder paliar esta problemática es eliminando tareas innecesarias, así como convertir tareas que debían realizarse con la máquina detenida en tareas que puedan realizarse con la máquina en movimiento.

A pesar de que el estudio de estas técnicas no es el objetivo de este trabajo, se hará una introducción a la técnica SMED (*Single Minute Exchange of Die*) por su importancia en la actualidad a la hora de intentar reducir estos tiempos. Esta expresión significa cambio rápido de herramientas y utillajes en procesos para poder fabricar múltiples productos en lotes pequeños con el mismo equipo.

Para llevar a cabo la técnica SMED, son necesarias 4 etapas:

- Diferenciar entre las configuraciones internas (IED) y las configuraciones externas (OED). Las configuraciones internas son aquellas que deben realizarse cuando la máquina se encuentra detenida, mientras que el segundo tipo de configuración puede llevarse a cabo con la máquina o máquinas en funcionamiento.
- Transformar las operaciones IED en operaciones OED cuando sea posible para evitar que las máquinas estén paradas esperando herramientas o utensilios.
- Simplificar las configuraciones internas en cuanto sea posible.
- Las operaciones de tipo IED que no se hayan transformado a OED, intentar que puedan llevarse a cabo de manera simultánea para ahorrar tiempos.

Para poder llevar esto a cabo, es necesario un análisis concienzudo de las tareas y operaciones a realizar en la planta (Shingo, 1985).

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo podremos ver una serie de casos simulados para contrastar la información recopilada a lo largo de la búsqueda bibliográfica, con el fin de comprobar el funcionamiento de diferentes reglas de despacho y de asignación laboral. Estará estructurado en 2 partes: En la Parte I se analizarán dos casos con independencia de los tiempos de cambio, en la Parte II se analizará el problema de la superposición de cambios de máquina.

Los casos elegidos responden a diferentes tipologías de plantas y problemas que pueden aparecer en empresas reales y en diversas situaciones.

### 5.1 Parte I: Independencia de los tiempos de cambio

En esta primera parte se simularán dos modelos, el primero, el Caso 1 no tendrá en cuenta los operarios, pues representará una planta completamente automatizada. Por el contrario, el Caso 2 introducirá los trabajadores como recurso limitado. Por ello, deberemos determinar el número óptimo de trabajadores para poder satisfacer la demanda de pedidos siempre y cuando sean un recurso limitado.

#### 5.1.1 Caso 1

El primer modelo consistirá en un *flow shop* híbrido de cinco máquinas capaces de procesar 5 tipos de trabajos diferentes. En la siguiente figura podemos observar su diagrama de flujo.

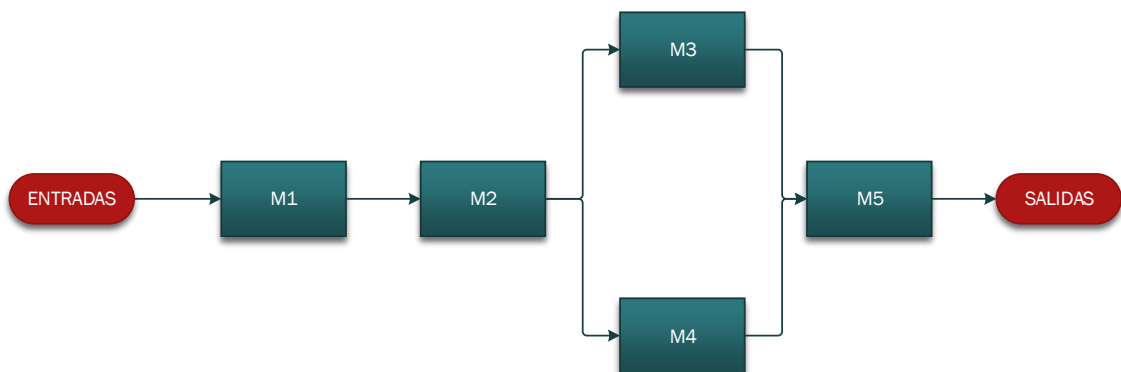


Figura 15: Esquema del Caso 1

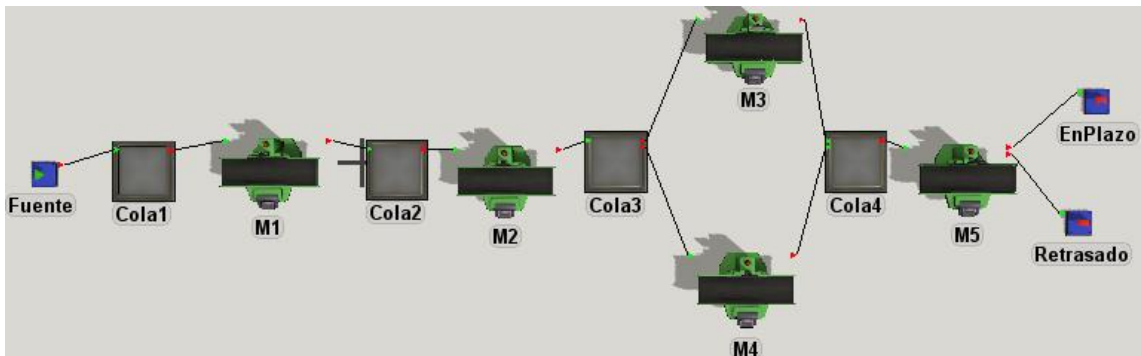


Figura 16: Esquema del Caso 1 en FlexSim

Se analizará el comportamiento del taller ante 6 reglas de despacho diferentes con el objetivo de mostrar la importancia de una buena planificación de la producción a la hora de conseguir resultados favorables.

Las hipótesis y restricciones aplicadas al modelo son:

- Cada máquina puede procesar un único trabajo al mismo tiempo.
- Un trabajo no puede abandonar una máquina hasta que su procesamiento haya terminado.
- Los tiempos de procesamiento serán constantes, pero dependerán de la máquina y el tipo de trabajo.
- Cada tipo de trabajo tiene que cumplir con un tiempo máximo de finalización.
- La llegada de trabajos al taller sigue una distribución exponencial de media 8 segundos.
- La llegada de los distintos tipos de trabajos es equiprobable.
- El cliente no exige una fecha de entrega por lo que éstas serán calculadas mediante el método TWK (Vinod & Sridharan, 2008; Sharma & Jain, 2014)

$$d_i = a_i + k(p_i + n_i \cdot u_i)$$

Probaremos el modelo con  $k = 2$  y  $k = 3$  para poder observar cómo se comportan las diferentes reglas en función de la holgura con respecto a la fecha de vencimiento.

- Se llevarán a cabo cien simulaciones con un intervalo de confianza del 90% para cada regla para aumentar la veracidad de los resultados.
- Se simulará un intervalo de tiempo de 28800 segundos, correspondientes a ocho horas (un turno de trabajo).
- Se analizarán las siguientes reglas de despacho:
  - FIFO
  - SPT
  - EDD
  - RC
  - MS
  - ATC

- En la siguiente tabla se adjuntan los tiempos de procesamiento de cada trabajo y el tiempo máximo en el que tienen que finalizarlo en segundos.

**Tabla 7: Tiempos de procesamiento y tiempo máximo de finalización por trabajos y máquina**

	Máquina				Tiempo Máximo Finalización	
	M1	M2	M3M4	M5	k=2	k=3
Trabajo 1	0	3	7	6	32	48
Trabajo 2	1	5	8	4	36	54
Trabajo 3	6	3	4	9	44	66
Trabajo 4	5	5	6	4	40	60
Trabajo 5	3	2	7	5	34	51

### 5.1.1.1 Cálculo de la constante $K$

Antes de efectuar las simulaciones, debemos determinar el valor de la constante  $k$  de la regla ATC. Para diferenciar esta constante del factor de estanqueidad, la representaremos con una  $K$  mayúscula. Como se explica en (Jayamohan & Rajendran, 2000), esta regla pretende minimizar la tardanza y el número de trabajos retrasados. Por ello, hemos recurrido a la herramienta *Optimizer* de *FlexSim* para determinar el valor de esta constante con el objetivo de minimizar ambos parámetros. Tras realizar esto, el *software* nos ha proporcionado cuatro valores que se consideraban como “óptimos”:  $K = 10.05$ ,  $K = 15.02$ ,  $K = 17.53$  y  $K = 20$ . Posteriormente hemos realizado 25 réplicas para observar los valores aportados de tardanza media y número de trabajos retrasados.

**Tabla 8: Número de trabajos retrasados y tardanza media en función del valor de la constante  $k$  en la regla ATC-k2**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 10,05$	254,36	10,4968
$K = 15,02$	256,24	10,3132
$K = 17,53$	256,40	10,2932
$K = 20,00$	257,48	10,3220

Como podemos comprobar en la tabla anterior, el valor de  $K$  que minimiza la tardanza media es 17,53, pero con este valor obtenemos aproximadamente 2 trabajos retrasados más. Se escogerá el valor de  $K = 10.05$  debido a que la diferencia entre su tardanza media y la de  $K = 17.53$  es del orden de dos décimas, mientras que podemos obtener dos trabajos más entregados a tiempo.

Llegados a este punto, habría que considerar cuales son las consecuencias económicas para la empresa de aumentar su tardanza media y el coste de entregar un pedido fuera de plazo. En este modelo se ha considerado de mayor importancia poder entregar más pedidos a tiempo, pero en un modelo más detallado podría estimarse los gastos para la empresa de elegir un valor de la constante  $K$  u otro.

La tabla anterior está realizada para el caso en el que el factor rigidez o estanqueidad es igual a dos. Si  $k = 3$  obtenemos otros tres valores de  $K$  diferentes. Además, añadiremos el valor de  $K = 10.05$  para observar si existe una gran diferencia

con respecto al resto de valores. Tras realizar de nuevo las simulaciones obtenemos los siguientes resultados:

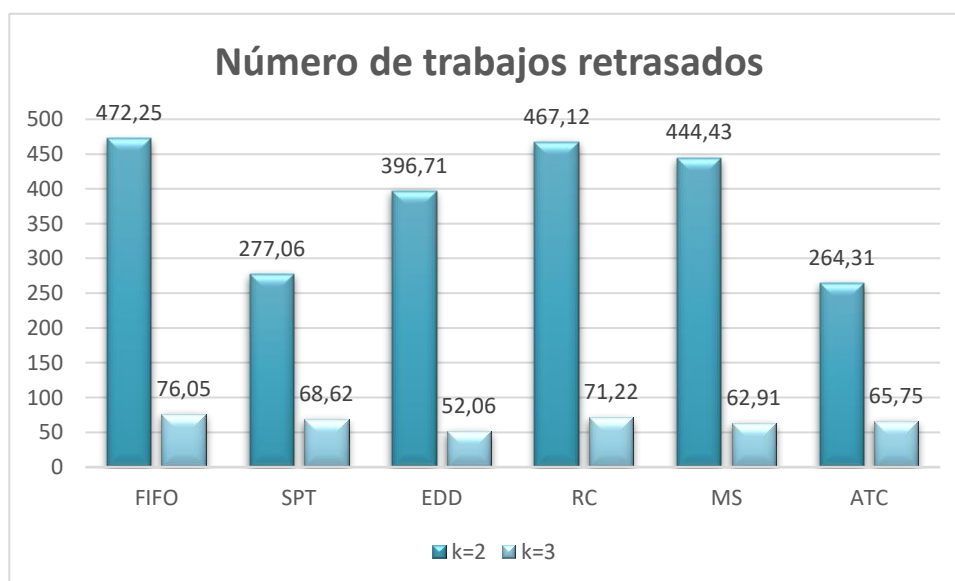
**Tabla 9: Número de trabajos retrasados y tardanza media en función del valor de la constante  $k$  en la regla ATC- $k3$**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
10,05	62,76	15,3472
13,25	63,32	15,3064
15,25	63,56	15,2492
17,65	63,44	15,2000

Como podemos comprobar en la Tabla 9, a pesar de que  $K = 10.05$  aporta la mayor tardanza, es el valor que minimiza el número de trabajos retrasados. Aunque las diferencias son muy pequeñas, nos decantaremos por este valor ya que de esta manera el valor de la constante para los diferentes valores del factor de rigidez será el mismo. De esta manera se evita realizar modificaciones en el modelo y en una posible planta real.

### 5.1.1.2 Simulación del modelo

Tras efectuar la simulación, hemos podido comprobar que el comportamiento del taller indica una clara diferencia en función de la regla seleccionada.



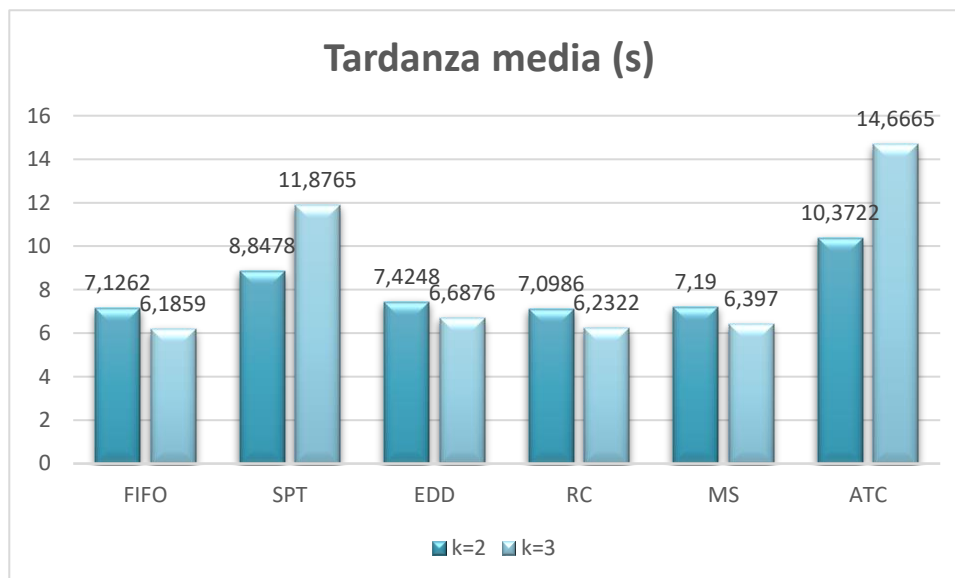
**Figura 17: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho y del factor de rigidez  $k$**

La primera conclusión a destacar, como es lógico, es que los trabajos retrasados descienden enormemente al aumentar el plazo de la fecha de entrega ( $k = 3$ ). En el caso de  $k = 2$  podemos tener como máximo un 13,13% de trabajos retrasados con la regla FIFO mientras que con  $k = 3$ , este valor desciende hasta un 2,11%.

En cuanto al número de trabajos retrasados, la regla que peor se ha comportado es la regla FIFO. Un resultado esperable pues no tiene en cuenta en ningún momento ni la fecha de entrega ni los tiempos de procesamiento. Por el contrario, con un factor de estanqueidad  $k = 2$  las reglas que mejor se han comportado frente a este parámetro



han sido las reglas ATC y SPT. Que la regla ATC ocupe la primera posición se debe a la optimización de la constante  $K$  que hemos calculado previamente, ya que, uno de los objetivos de estimar este valor era la minimización de la cantidad de trabajos entregados fuera de plazo. Por otra parte, la regla que otorga prioridad en función de los tiempos de procesamiento (SPT) ha sido la que más se ha acercado a la anteriormente mencionada. No obstante, si aumentamos la holgura con respecto a la fecha de vencimiento ( $k = 3$ ), es la regla EDD con 52 trabajos retrasados la que consigue minimizar este aspecto, pues tiene en cuenta únicamente las fechas de entrega a la hora de asignar prioridades. Seguida de cerca obtenemos la regla de mínima holgura (MS), cuya prioridad tiene en cuenta la fecha de entrega, el tiempo de procesamiento restante y el tiempo actual.



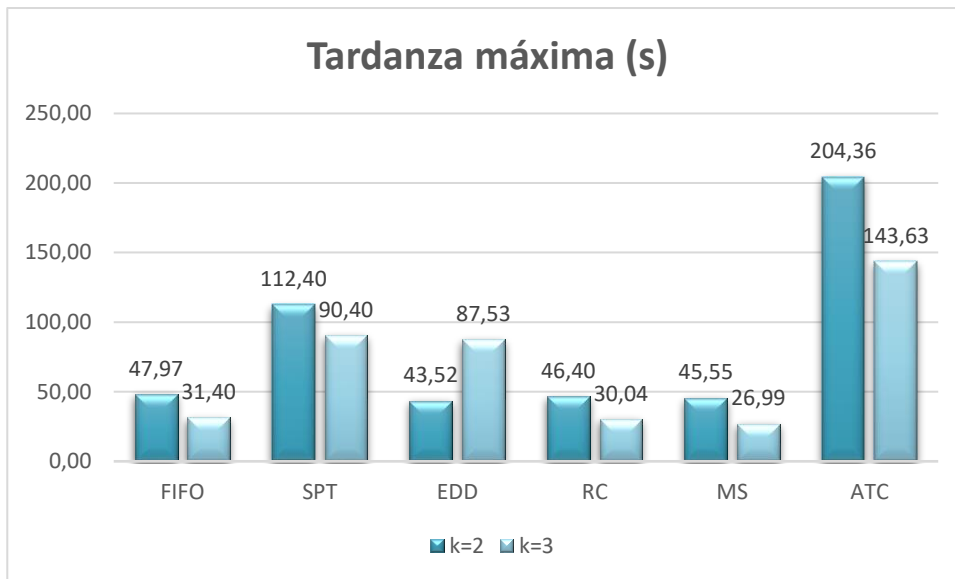
**Figura 18: Tardanza media en función de la regla de despacho y del factor de rigidez  $k$**

Como podemos ver en la anterior figura, los resultados en cuanto a la tardanza media son bastante similares en todas las reglas excepto en la regla ATC, proporcionando los resultados más altos en las dos variantes. Esto resulta paradójico ya que la regla ATC pretende minimizar la tardanza media. A pesar de haber optimizado el valor de la constante  $K$ , esta regla no ha conseguido superar a sus competidores a instancias de disminuir la tardanza.

Mencionaremos el comportamiento de la regla RC, que, aunque es la que aporta un número mayor de trabajos retrasados junto con la regla FIFO, su tardanza media es la menor, pues tiene en cuenta la diferencia entre la fecha de entrega y el instante actual.

Como hemos podido comprobar, sacar conclusiones a la hora de intentar minimizar estos dos parámetros al mismo tiempo es realmente complicado, pues aquellas reglas que reducen el porcentaje de trabajos entregados fuera de plazo no actúan tan bien a la hora de reducir la tardanza.

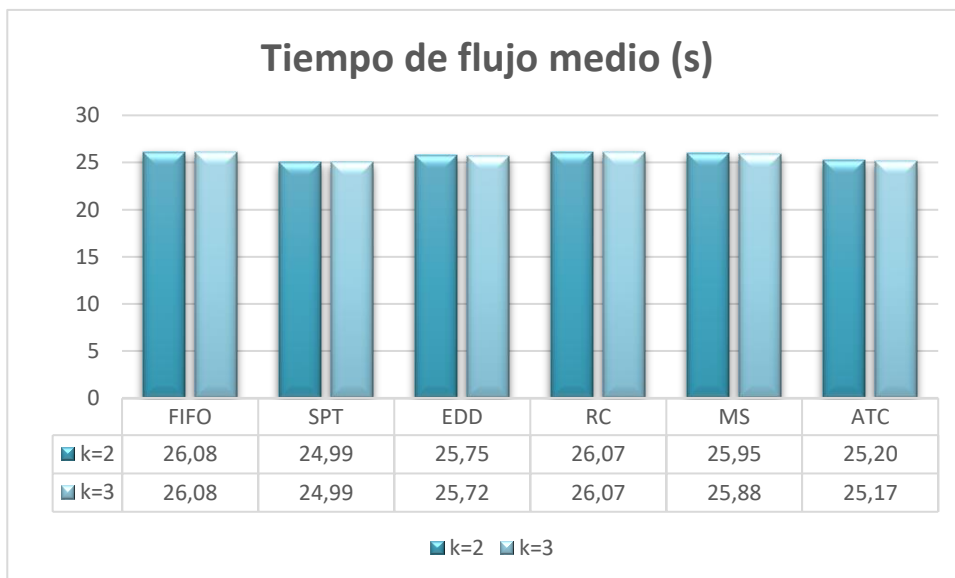
Si nos fijamos ahora en la tardanza máxima, la regla ATC, a pesar de ser la que aporta un menor número de trabajos entregados fuera de plazo, aquellos que sí lo hacen tienen una tardanza mayor, como pudimos ver en la Figura 18, y que se hace notable de nuevo en la Figura 19 resaltando sobre las demás reglas. En segundo lugar, e igual que ocurre con la tardanza media, obtenemos la regla que ordena los trabajos según sus tiempos de procesamiento.



**Figura 19: Tardanza máxima en función de la regla de despacho escogida y del factor de rigidez  $k$**

A continuación, prestaremos atención a los tiempos de flujo. En cuanto al tiempo de flujo medio las diferencias entre las diferentes reglas de secuenciación son casi inapreciables, siendo la diferencia entre la mejor regla y la peor de tan sólo un segundo. Debido a la semejanza entre las diferentes opciones, no nos decantaremos en elegir una regla u otra, pero añadiremos que aquella que ha conseguido los mejores resultados ha sido la regla SPT.

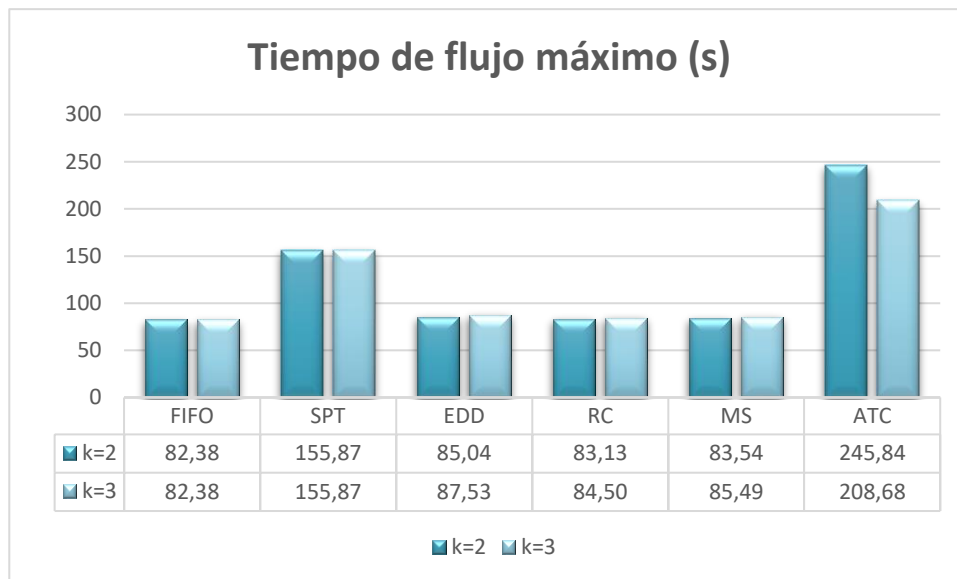
En el inferior de la Figura 20 se ha insertado una tabla con los valores para poder apreciar las diferencias entre los tiempos.



**Figura 20: Tiempo de flujo medio en función de la regla de despacho escogida y del factor de rigidez  $k$**

Por otra parte, en el tiempo de flujo máximo sí se pueden apreciar más diferencias. Como se puede apreciar en la Figura 21, las reglas FIFO, EDD, RC y MS aportan unos tiempos muy similares entre sí. No obstante, podemos apreciar diferencias notables con las reglas SPT y ATC, siendo esta última aquella que maximiza este intervalo de

fabricación, con 245,84 segundos para  $k = 2$ , y con 208,68 segundos cuando aumentamos la holgura.



**Figura 21: Tiempo de flujo máximo en función de la regla de despacho escogida y del factor de rigidez  $k$**

Como consecuencia de estas dos últimas figuras, si lo que se busca es minimizar los tiempos de flujo de la planta, habría que evitar las reglas ATC y SPT. Por el contrario, cualquiera de las otras 4 opciones analizadas puede ser una buena alternativa, pues, aunque la regla FIFO es la “peor” en cuanto al tiempo de flujo medio, es la que aporta un menor tiempo de flujo máximo. Del mismo modo, seleccionar aquellos pedidos que tengan una fecha de entrega más reciente da lugar a un tiempo de flujo medio menor, pero un intervalo de tiempo ligeramente mayor que las otras 3 competidoras más cercanas.

Una de las ventajas que nos aporta la simulación, es que podemos comprobar el rendimiento y funcionamiento de los elementos que conforman nuestro sistema. En este modelo, el factor de utilización de la maquinaria no es elevado, estando el más alto cerca del 70% de utilización en la máquina 5. La máquina M4 tiene un factor de utilización menor del 30%, lo que nos indica que está infrautilizada, aunque no implica necesariamente que podamos prescindir de ella, pues esto dependerá del producto.

**Tabla 10: Tabla resumen con los factores de utilización de las 5 máquinas**

Ocupación M1	37,52%
Ocupación M2	45,01%
Ocupación M3	50,57%
Ocupación M4	29,42%
Ocupación M5	69,92%

## 5.1.2 Caso 2

En este experimento, contaremos con un taller formado por once máquinas en serie capaz de procesar 5 tipos de trabajo diferentes. Existirán tres zonas de trabajo: Zona 1, Zona 2 y Zona 3. Ahora ya disponemos de operadores que se encargarán de llevar los ítems de las colas hasta las máquinas donde luego los procesarán. El diagrama de flujo es el siguiente:

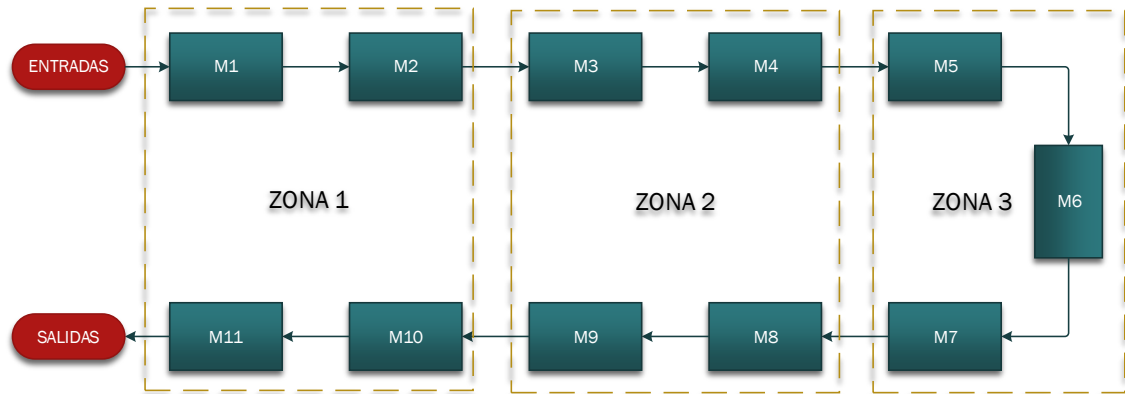


Figura 22: Layout del proceso del Caso 2

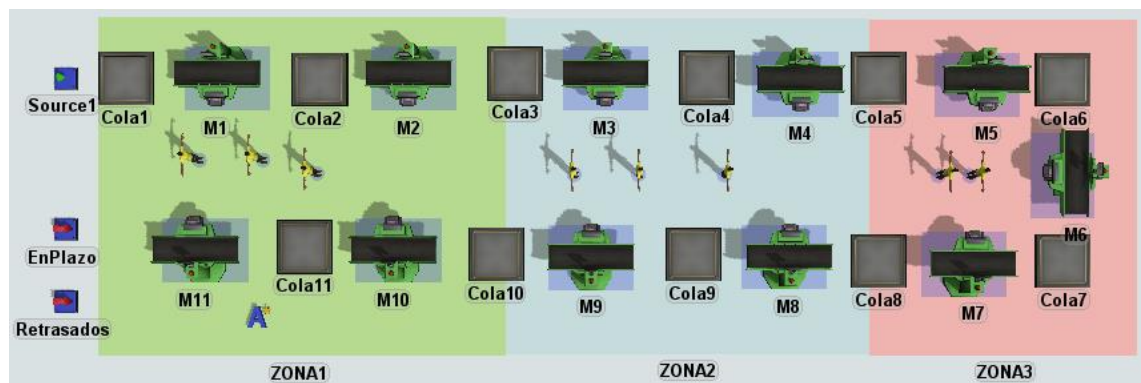


Figura 23: Layout del proceso del Caso 2 en FlexSim sin conexiones

Las hipótesis y restricciones aplicadas al modelo son:

- Cada máquina puede procesar un único trabajo al mismo tiempo.
- Antes de cada máquina existe una cola.
- La máquina necesita un operario para poder procesar un trabajo.
- Un trabajo no puede abandonar una máquina hasta que su procesamiento haya terminado.
- Los tiempos de procesamiento seguirán una distribución logarítmica normal. Se ensayarán 4 casos diferentes con el objetivo de observar la variabilidad del proceso y analizar las secuencias de prioridades en un mayor número de posibilidades:
  - Medias y desviaciones dependientes de la máquina y el tipo de trabajo.
  - Media dependiente del tipo de trabajo y desviación típica constante con valor  $\sigma = 1$
  - Media dependiente del tipo de trabajo y desviación típica constante con valor  $\sigma = 2$
  - Media dependiente del tipo de trabajo y desviación típica constante con valor  $\sigma = 3$
- Cada tipo de trabajo tiene que cumplir con un tiempo máximo de finalización.

- El número de operarios variará para encontrar el estado óptimo.
- Un operario puede escoger una máquina disponible dentro de su zona de aplicación, pero no puede ir a otra zona. De este modo impedimos que un operario recorra largas distancias empeorando los resultados de la simulación.
- La llegada de trabajos al taller sigue una distribución exponencial de media 30 segundos.
- La llegada de los distintos tipos de trabajos es equiprobable.
- El cliente no exige una fecha de entrega por lo que éstas serán calculadas mediante el método TWK (Vinod & Sridharan, 2008; Sharma & Jain, 2014)

$$d_i = a_i + k(p_i + n_i \cdot \mu_s)$$

Probaremos el modelo con  $k = 2$  y  $k = 3$  para poder observar cómo se comportan las diferentes reglas en función de la holgura con respecto a la fecha de vencimiento.

- Se llevarán a cabo cien simulaciones con un intervalo de confianza del 90% para cada regla para aumentar la veracidad de los resultados.
- Se simulará un intervalo de tiempo de 28800 segundos, correspondientes a ocho horas, como en un turno de trabajo.
- Se analizarán las siguientes reglas de despacho:
  - FIFO
  - SPT
  - EDD
  - RC
  - MS
  - ATC
- Las reglas de asignación de operarios estarán divididas en función de los dos tipos mencionados en el capítulo 3.
  - En cuanto a 'cuándo moverse', seguiremos el modelo de (Bovrowski & Park, 1993):
    - WHN 1: Centralización. Un trabajador es elegible en el momento que termine el trabajo que estaba realizando.
    - WHN 2: Descentralización. Un trabajador es elegible cuando la cola del trabajo que esté procesando se encuentre vacía.
    - WHN 4: Regla del seguidor. Mover el trabajador cuando acabe el número de trabajos que estaban en ese centro de trabajo cuando llegó.
  - En cuanto a 'dónde moverse':
    - SQ
    - LNGQ
- Para nombrar las reglas y que no haya equivocaciones se seguirá un patrón:

*Regla de despacho – Regla 'cuándo moverse' – Regla 'dónde moverse'*  
*– Factor estanqueidad*

En primer lugar, analizaremos nuestro modelo con las medias y desviaciones típicas dependientes de la máquina y tipo de trabajo. A continuación, se adjunta una tabla con las medias y desviaciones empleadas para calcular los tiempos de procesamiento en las diferentes etapas del proceso.

**Tabla 11: Medias y desviaciones dependientes de la máquina y del tipo de trabajo**

	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 4	Trabajo 5
M1	$\mu = 5; \sigma = 3$	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 6; \sigma = 2$	$\mu = 2; \sigma = 0.5$	$\mu = 8; \sigma = 2$
M2	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 2; \sigma = 2$	$\mu = 5; \sigma = 1$	$\mu = 6; \sigma = 3$	$\mu = 2; \sigma = 0.5$
M3	$\mu = 5; \sigma = 2$	$\mu = 1; \sigma = 1$	$\mu = 2; \sigma = 1$	$\mu = 6; \sigma = 2$	$\mu = 7; \sigma = 1$
M4	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 8; \sigma = 3$	$\mu = 2; \sigma = 0.5$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 8; \sigma = 2$
M5	$\mu = 4; \sigma = 1$	$\mu = 3; \sigma = 2$	$\mu = 2; \sigma = 3$	$\mu = 1; \sigma = 0.5$	$\mu = 4; \sigma = 1$
M6	0	$\mu = 6; \sigma = 2$	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 2; \sigma = 2$	0
M7	$\mu = 5; \sigma = 0.5$	$\mu = 2; \sigma = 3$	$\mu = 1; \sigma = 0.5$	$\mu = 4; \sigma = 2$	$\mu = 5; \sigma = 0.1$
M8	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$
M9	$\mu = 6; \sigma = 1$	$\mu = 8; \sigma = 3$	$\mu = 5; \sigma = 2$	$\mu = 4; \sigma = 1$	$\mu = 9; \sigma = 3$
M10	$\mu = 3; \sigma = 0.5$	$\mu = 6; \sigma = 2.2$	$\mu = 8; \sigma = 1$	$\mu = 2; \sigma = 0.25$	$\mu = 4; \sigma = 1.5$
M11	$\mu = 1; \sigma = 0.1$	$\mu = 7; \sigma = 3$	$\mu = 5.5; \sigma = 2.1$	$\mu = 4; \sigma = 0.5$	$\mu = 8; \sigma = 2$

Como podemos comprobar, ahora los tiempos de procesamiento son variables, por lo que no podemos emplear directamente el método TWK para estimar la fecha de entrega. Por ello, realizaremos cien simulaciones mediante la regla FIFO-WHN1-SQ-K2 y calcularemos una media de los tiempos de procesamiento totales para cada tipo de trabajo y así poder aplicar la siguiente ecuación:

$$d_i = a_i + k(p_i + n_i \cdot \mu_s)$$

Siendo:

- $d_i$  fecha de entrega del trabajo  $i$
- $a_i$  tiempo de llegada del trabajo  $i$
- $k$  factor de rigidez de la fecha de vencimiento
- $p_i$  tiempo total de procesamiento del trabajo  $i$
- $n_i$  número de operaciones del trabajo  $i$
- $\mu_s$  tiempo de cambio medio

Tras la simulación, los tiempos de procesamiento han sido los siguientes:

**Tabla 12: Tiempos de procesamiento totales dependiendo del tipo de trabajo**

Tiempo procesamiento total (s)	
Tipo Trabajo 1	56
Tipo Trabajo 2	60
Tipo Trabajo 3	54
Tipo Trabajo 4	51
Tipo Trabajo 5	65

Una vez hecho esto, ya se pueden calcular los tiempos máximos de finalización, que representarán el tiempo límite que un ítem puede estar en el proceso y a partir del cual, se considerará que el pedido sufre un retraso.

**Tabla 13: Tiempos máximos de finalización en función del tipo de trabajo en segundos**

	Tiempo máximo de finalización (s)	
	$k = 2$	$k = 3$
Trabajo 1	112	168
Trabajo 2	120	180
Trabajo 3	107	162
Trabajo 4	102	153
Trabajo 5	130	195

A continuación, determinaremos el número de operarios necesarios para nuestra planta. Para llevar esto a cabo hemos creado dieciocho escenarios diferentes variando el número de operarios siempre y cuando fuesen un recurso limitado en cada zona, es decir, en una zona, no puede haber el mismo número de operarios que máquinas pues entonces ya no podrían aplicarse reglas de asignación laboral, ya que los operarios siempre estarían en el mismo centro de trabajo. El objetivo ha sido reducir el número de pedidos entregados fuera de plazo.

Tras la experimentación, nos hemos percatado de que la cantidad de trabajos entregados fuera de plazo superaba el 90% en todos los casos, lo que indica que la fecha de entrega es demasiado ajustada. A la hora de calcular los tiempos de procesamiento totales se ha hecho la media de los tiempos en cada máquina tras cien réplicas, pero al llevar a cabo una media, es como si teóricamente no se hubiesen tenido en cuenta las desviaciones típicas. Para incrementar este plazo de entrega, e igual que se hace en algunas plantas actuales, multiplicaremos el tiempo de procesamiento total por un factor de 1,2. Esto quiere decir que al tiempo de procesamiento le estamos sumando un 20% de ese tiempo inicial para tener más holgura. Este es un método que aplican algunas empresas para no tener plazos tan restrictivos y asegurarse de entregar los pedidos a tiempo.

**Tabla 14: Tiempos de procesamiento totales modificados**

Tiempo procesamiento total (s)	
Tipo Trabajo 1	67
Tipo Trabajo 2	72
Tipo Trabajo 3	64
Tipo Trabajo 4	61
Tipo Trabajo 5	78

**Tabla 15: Tiempos máximos de finalización modificados**

	Tiempo máximo de finalización (s)	
	$k = 2$	$k = 3$
Trabajo 1	134	201
Trabajo 2	144	216
Trabajo 3	129	162
Trabajo 4	122	184
Trabajo 5	156	234

Una vez hecho esto se evaluaron los dieciocho escenarios indicados anteriormente, donde el escenario 1 es claramente aquel que minimiza el número de trabajos retrasados por ser la opción menos restrictiva. De este modo tendremos tres trabajadores en las zonas 1 y 2 y 2 operarios en la zona 3.

**Tabla 16: Resultados de los escenarios para determinar el número de trabajadores por zona**

Escenario	Zona	Nº Operarios	Trabajos retrasados
1	1	3	309
	2	3	
	3	2	
2	1	3	721
	2	3	
	3	1	
3	1	3	609
	2	2	
	3	2	
4	1	3	798
	2	2	
	3	1	
5	1	3	482
	2	1	
	3	2	
6	1	3	541
	2	1	
	3	1	
7	1	2	461
	2	3	
	3	2	
8	1	2	757
	2	3	
	3	1	
9	1	2	686
	2	2	
	3	2	
10	1	2	817
	2	2	
	3	1	
11	1	2	530
	2	1	
	3	2	
12	1	2	539
	2	1	
	3	1	



Escenario	Zona	Nº Operarios	Trabajos retrasados
13	1	1	590
	2	3	
	3	2	
14	1	1	674
	2	3	
	3	1	
15	1	1	636
	2	2	
	3	2	
16	1	1	689
	2	2	
	3	1	
17	1	1	530
	2	1	
	3	2	
18	1	1	547
	2	1	
	3	1	

#### 5.1.2.1 Cálculo de la constante $K$

Por último, antes de poder comenzar a extraer conclusiones de nuestro modelo, e igual que se ha hecho en el caso anterior, debemos determinar el valor de la constante  $K$  de la regla ATC para todas las variantes que analizaremos en este modelo.

Para poder determinar el valor de esta constante emplearemos el optimizador de *FlexSim*, modificando el valor de la constante para conseguir minimizar el número de trabajos retrasados y la tardanza media, puesto que es el objetivo de la regla ATC. En ocasiones el *software* proporciona más de un valor debido a que puede no existir un único valor que minimice ambos parámetros. En ese caso mostraremos una tabla con los resultados para cada valor de  $K$  e intentaremos justificar el uso de un valor u otro.

Antes de comenzar, debe comentarse que, en un modelo real, deberían tenerse en cuenta los costes por unidad de trabajo retrasada y los costes por segundo de retraso para ayudar en la toma de decisiones. En nuestro caso no contamos con estas penalizaciones, por lo que intentarán justificarse lo mejor posible las soluciones adoptadas. A pesar de elegir una opción u otra, las soluciones que muestra el optimizador serán buenas opciones.

- Regla *ATC* – *WHN1* – *SQ* –  $k2$ :

Tras emplear la herramienta *Optimizer* de *FlexSim* con el objetivo de encontrar un valor de  $K$  que minimice la tardanza media y el número de trabajos retrasados, hemos encontrado cuatro valores que el *software* ha considerado como óptimos,  $K = 10$ ,  $K = 20$ ,  $K = 25.5$  y  $K = 50$ . Para solventar las dudas sobre qué valor emplear, hemos recurrido a la simulación obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 17: Número de trabajos retrasados y tardanza media para diferentes valores de la constante  $K$  en la regla ATC-WHN1-SQ-k2**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 10,5$	294,05	21,4880
$K = 20,0$	292,00	21,3855
$K = 25,5$	290,05	22,1920
$K = 50,0$	280,65	22,1830

A la vista de los resultados obtenidos, el mejor valor resulta ser el de  $K = 50$ , pues a pesar de tener una tardanza mayor que la dos primeras opciones, consigue 14 y 12 trabajos retrasados menos respectivamente.

- Regla *ATC – WHN1 – LNGQ – k2*:

En esta variante nos encontramos con hasta 5 posibles soluciones:  $K = 1, K = 10.5, K = 20, K = 25.5$  y  $K = 50$ .

**Tabla 18: Número de trabajos retrasados y tardanza media para diferentes valores de la constante  $K$  en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k2**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,0$	241,9	12,645
$K = 10,5$	240,3	12,632
$K = 20,0$	228,0	12,934
$K = 25,5$	233,3	12,708
$K = 50,0$	234,7	12,589

Debido a que la tercera opción ( $K = 20$ ) es la que consigue minimizar el número de trabajos entregados fuera de plazo, ésta va a ser la opción escogida. Como se puede comprobar, la diferencia entre las tardanzas es casi inapreciable, siendo del orden de las décimas.

- Regla *ATC – WHN1 – SQ – k3*:

A continuación, el *software* ha aportado dos valores que conducen a buenos resultados. Para disipar las dudas sobre que opción emplear, hemos realizado 20 réplicas.

**Tabla 19: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante  $K$  en la regla ATC-WHN1-SQ-k3**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 5,75$	16,60	27,6300
$k = 25,5$	17,15	29,6065

Tras observar los resultados de la tabla anterior, resulta evidente que la primera opción ( $K = 5.75$ ) es la mejor dado que minimiza ambos parámetros.

- Regla  $ATC - WHN1 - LNGQ - k3$ :

En este caso, tenemos tres posibles soluciones recogidas en la tabla siguiente:

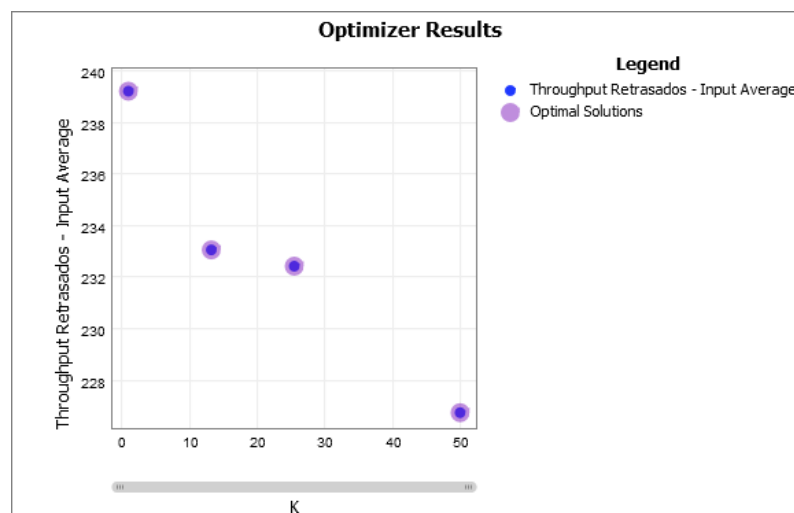
**Tabla 20: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante  $K$  en la regla  $ATC-WHN1-LNGQ-k3$**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 5,75$	1,60	6,9680
$K = 20,00$	1,65	5,8510
$K = 50,00$	1,95	7,1605

Tras analizar los datos, nos decantaremos por la segunda opción ( $K = 20$ ) ya que consigue 1 segundo menos de tardanza media que la primera opción teniendo prácticamente los mismos trabajos retrasados.

- Regla  $ATC - WHN2 - SQ - k2$ :

Como podemos ver en la siguiente imagen, el *software* nos muestra cuatro soluciones:



**Figura 24: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla  $ATC-WHN2-SQ-k2$**

A pesar de las diferencias que se puedan apreciar en la Figura 24 en cuanto al número de trabajos retrasados, si nos fijamos en la tardanza media, la pendiente se invierte, y este es el motivo por el cual se muestran cuatro posibles soluciones, ya que aquella que consigue menos trabajos retrasados, es la que consigue una mayor tardanza.

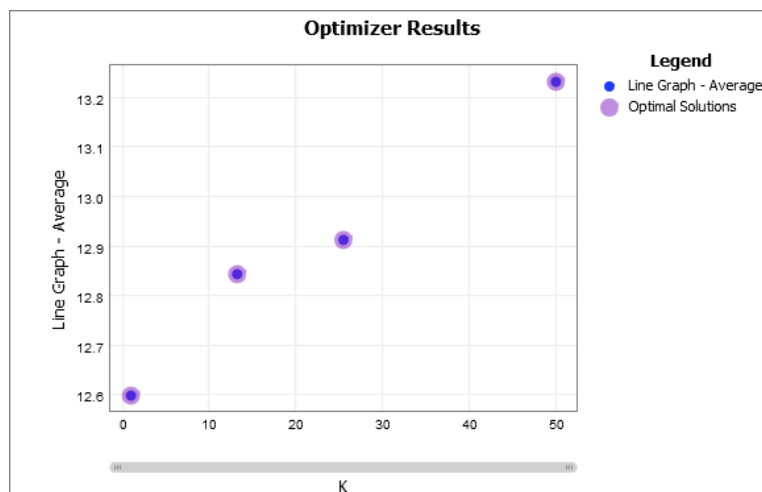


Figura 25: Valores de  $K$  que minimizan la tardanza media en la regla ATC-WHN2-SQ-k2

Si pasamos estos resultados a una tabla veremos mejor los datos para poder extraer conclusiones más acertadas.

Tabla 21: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante  $K$  en la regla ATC-WHN2-SQ-k2

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,00$	239,2	12,6
$K = 13,25$	233,1	12,8
$K = 25,50$	232,4	12,9
$K = 50,00$	226,7	13,2

Tras observar esto, habría que tener en cuenta el coste por unidad de trabajo retrasada y por segundo de retraso. En este modelo, esos factores no se tienen en cuenta, así que la opción elegida será  $K = 50$  puesto que, a pesar de tener una tardanza mayor, creemos que la diferencia es pequeña en comparación con los casi 13 trabajos retrasados menos que consigue.

- Regla ATC – WHN2 – LNGQ – k2:

En esta variante se nos proporcionan 3 opciones:  $K = 1$ ,  $K = 25.5$  y  $K = 50$ .

Tabla 22: Número de trabajos retrasados y tardanza media para diferentes valores de  $K$  en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k2

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,0$	238,9	12,5
$K = 25,5$	231,7	12,9
$K = 50,0$	226,8	13,2

Igual que ocurrió en la variante anterior, elegiremos la última opción de  $K = 50$ .

- Regla  $ATC - WHN2 - SQ - k3$ :

A continuación, se nos ha brindado una única solución capaz de satisfacer tanto la tardanza como los trabajos entregados fuera de plazo,  $K = 13.25$ . La solución óptima es el punto azul rodeado por una franja de color malva.

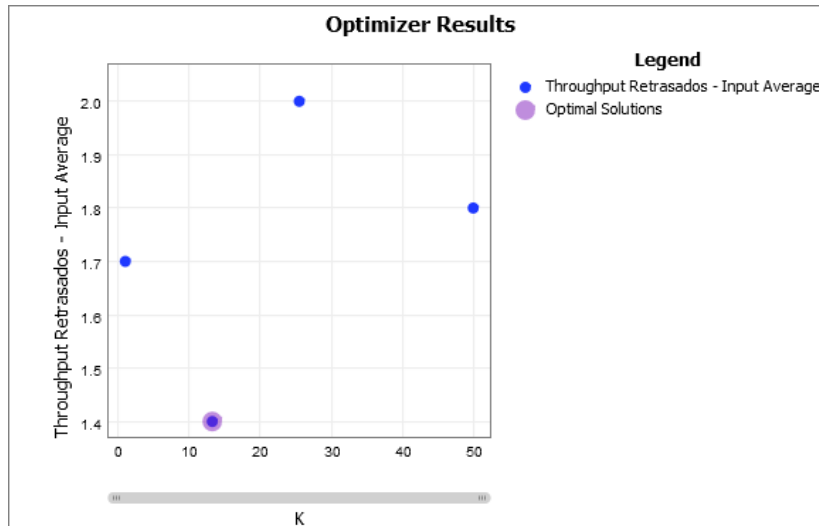


Figura 26: Valor de  $K$  que minimiza el número de trabajos retrasados en la regla  $ATC-WHN2-SQ-k3$

- Regla  $ATC - WHN2 - LNGQ - k3$ :

Al aumentar el factor de rigidez o estanqueidad no encontramos diferencias en cuanto al valor de  $K$ , siendo otra vez  $K = 13.25$  la mejor solución con una tardanza media de aproximadamente 5 segundos y con menos de 2 trabajos retrasados tras 20 réplicas.

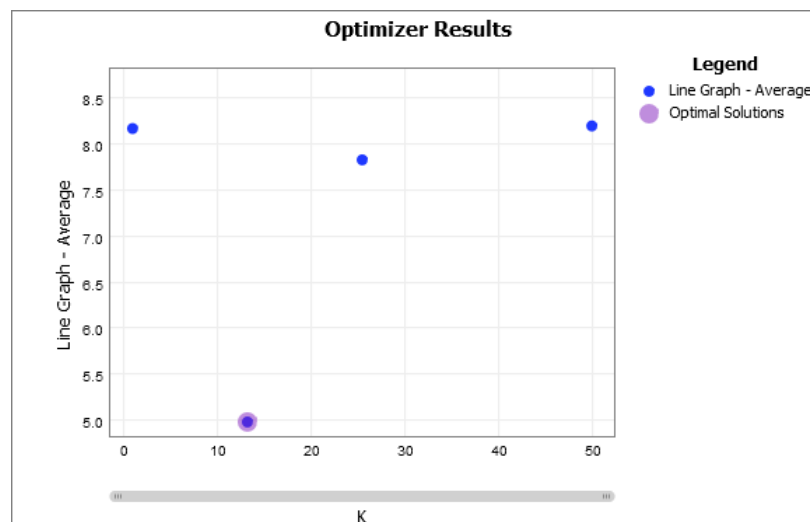


Figura 27: Valor de  $K$  que minimiza la tardanza media en la regla  $ATC-WHN2-LNGQ-k3$

- Regla  $ATC - WHN4 - SQ - k2$ :

En esta primera variante de las reglas  $ATC - WHN4$  nos hemos encontrado con que el valor que minimiza tanto la tardanza media como el número de trabajos retrasados es  $K = 25.5$ .

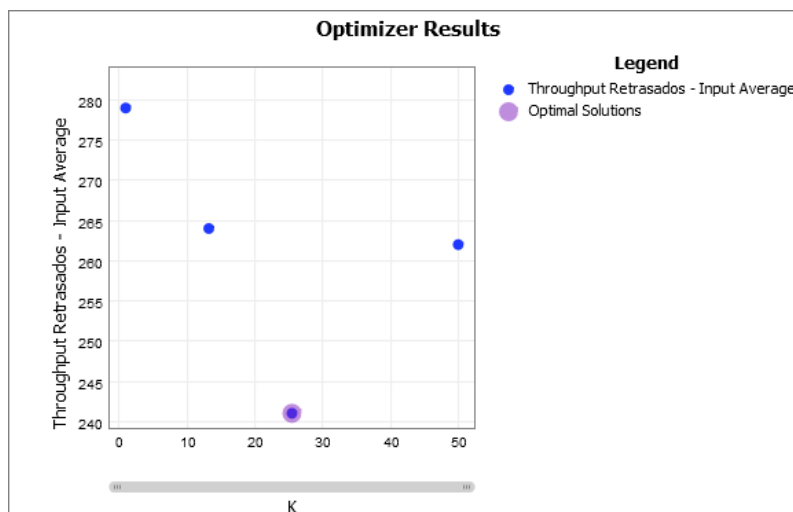


Figura 28: Valor de  $K$  que minimiza el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN4-SQ-k2

- Regla ATC – WHN4 – LNGQ – k2:

Si el operario tiene que ir a la máquina que tiene la cola más larga, nos aparecen dos posibles alternativas,  $K = 25.5$  y  $K = 50$ .

Tabla 23: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante  $K$  en la regla ATC-WHNN4-LNGQ-k2

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 25,5$	222	12,69
$K = 50,0$	213	13,04

A la vista de los anteriores resultados, creemos que la diferencia entre los trabajos retrasados compensa la diferencia entre las tardanzas medias. De este modo, elegiremos  $K = 50$ .

- Regla ATC – WHN4 – SQ – k3:

A continuación, se aportan dos posibles soluciones para la constante  $K$ , recogidas en la siguiente tabla:

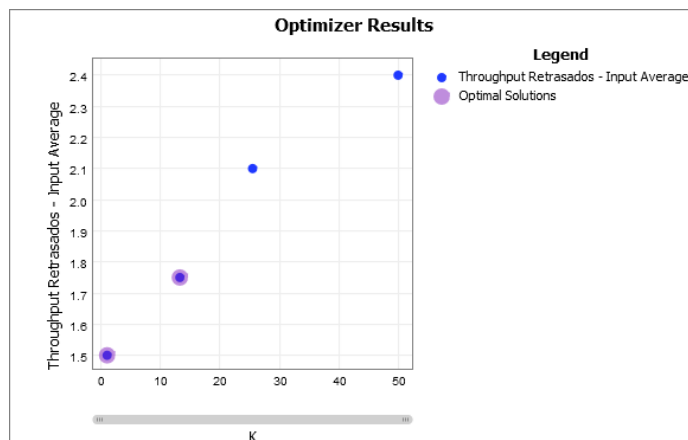
Tabla 24: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante  $K$  en la regla ATC-WHN4-SQ-k3

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,00$	3,5	9,91
$K = 13,25$	4,4	9,09

Como se puede comprobar, los resultados son realmente parejos, por lo que habría que tener en cuenta el coste por unidad retrasada y por segundo de retraso. Como no contamos con estos datos, escogeremos la primera opción, pues si multiplicamos el número de trabajos retrasados por la tardanza media, podríamos decir que tendríamos la tardanza total. Visto esto, la tardanza total con  $K = 1$  es menor que con  $K = 13,25$ . Por eso mismo, escogemos como válida la primera opción.

- Regla *ATC – WHN4 – LNGQ – k3*:

Por último, se nos muestran las dos mismas opciones:  $K = 1$  y  $K = 13.25$ . Ambos valores aparecen rodeados de color malva en la figura siguiente.



**Figura 29: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3**

Los valores aportados por dichas opciones están representados en la siguiente tabla.

**Tabla 25: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de  $K$  en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,00$	1,50	9,79
$K = 13,25$	1,75	7,55

Tras analizar la tabla anterior, escogemos la segunda opción pues la diferencia entre los trabajos retrasados se compensa con los dos segundos de margen en la tardanza media.

Para finalizar este apartado, se adjunta una tabla resumen con los diferentes valores de la constante  $K$  en función de la regla aplicada.

**Tabla 26: Tabla resumen con los valores de la constante  $K$  para las diferentes variantes de la regla ATC**

Regla	Valor de K
ATC-WHN1-SQ-k2	50,00
ATC-WHN1-LNGQ-k2	20,00
ATC-WHN1-SQ-k3	5,75
ATC-WHN1-LNGQ-k3	20,00
ATC-WHN2-SQ-k2	50,00
ATC-WHN2-LNGQ-k2	50,00
ATC-WHN2-SQ-k3	13,25
ATC-WHN2-LNGQ-k3	13,25
ATC-WHN4-SQ-k2	25,50
ATC-WHN4-LNGQ-k2	50,00
ATC-WHN4-SQ-k3	1,00
ATC-WHN4-LNGQ-k3	13,25

### 5.1.2.2 Simulación del modelo

Una vez realizados todos los preparativos necesarios, se recurre a la simulación de cada una de las 72 variantes que tenemos, entre reglas de secuenciación de prioridades, reglas de asignación laboral y modificaciones del factor de rigidez o estanqueidad. Para ello, hemos realizado 100 réplicas de cada una para obtener los resultados que se comentan a continuación.

Para organizar las conclusiones, primero comentaremos las diferencias aportadas por las reglas de asignación laboral y el factor de estanqueidad o rigidez, y a continuación analizaremos las reglas de secuenciación de prioridades.

- Reglas de asignación laboral y factor de rigidez.

El número de pedidos entregados fuera de plazo varía considerablemente al emplear un factor de estanqueidad igual a 2 o igual a 3. Como resulta obvio, con un factor mayor, el número de trabajos retrasados será menor. Para ilustrar este efecto emplearemos la variante *WHN1*.

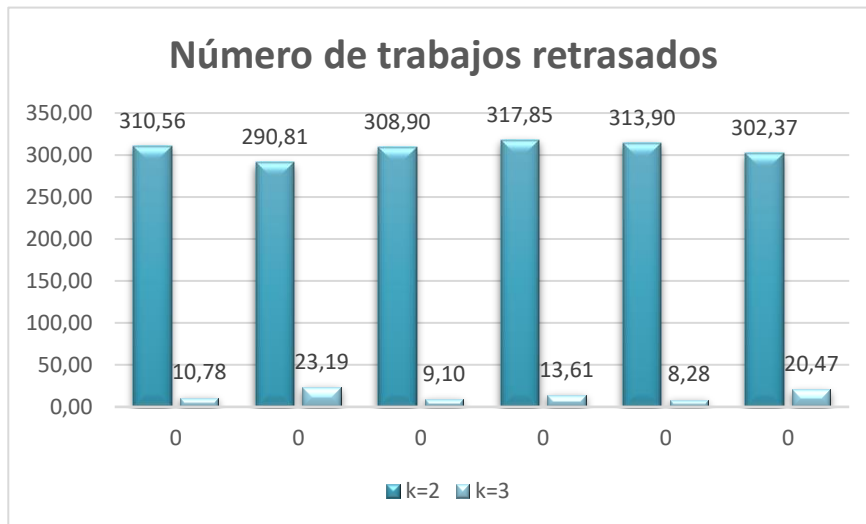


Figura 30: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante *WHN1-SQ*

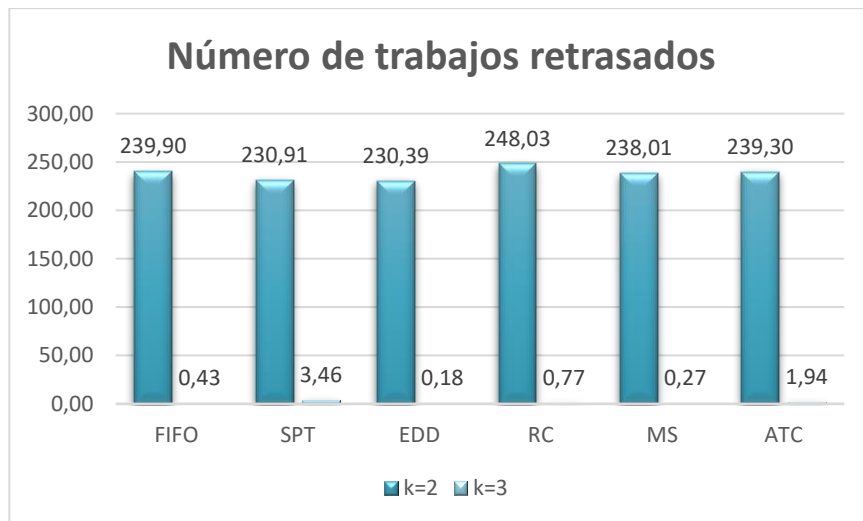


Figura 31: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante *WHN1-LNGQ*



En cuanto a las reglas de hacia dónde moverse, la lógica "LNGQ" consigue mejores resultados en todos los parámetros evaluados que la lógica de acudir a la cola con una menor cantidad de pedidos en espera en las variantes WHN1 y WHN4. No obstante, en la variante WHN2 las diferencias entre aplicar una lógica "SQ" o una lógica "LNGQ" son mínimas.

A continuación, veremos una serie de figuras con diferentes reglas "WHN" donde se observarán las diferencias entre acudir a la cola más corta, o acudir a la cola de la máquina con una mayor cantidad de ítems.

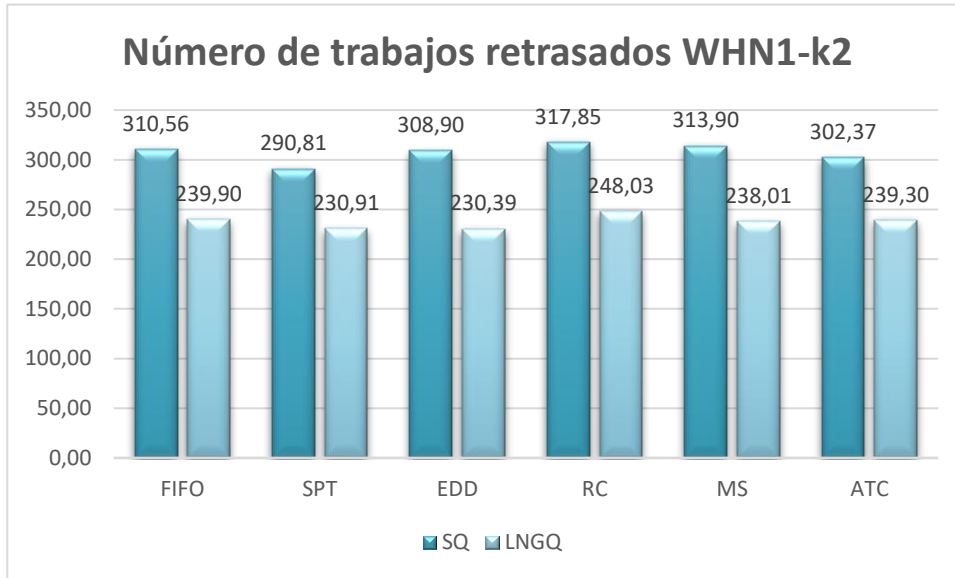


Figura 32: Número de trabajos retrasados para diferentes reglas de despacho en función de las lógicas "WHR" en la variante "WHN1-k2"

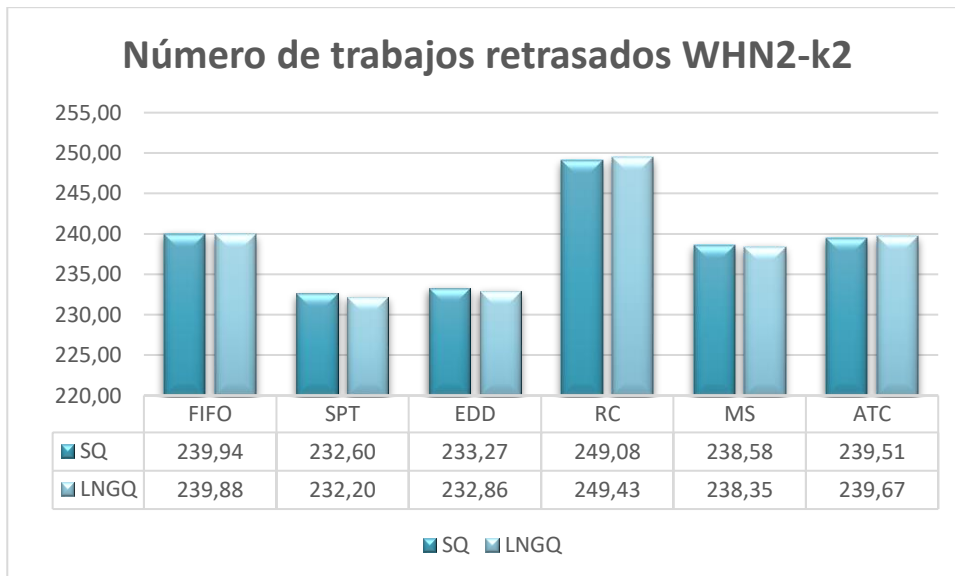


Figura 33: Número de trabajos retrasados para diferentes reglas de despacho en función de las lógicas "WHR" en la variante "WHN2-k2"

En la Figura 32 puede verse una clara diferencia entre acudir a la cola más corta o acudir a la cola más larga, mientras que en la Figura 33, las diferencias son inapreciables.

Otro beneficio de acudir a la cola con mayor cantidad de pedidos en espera es la reducción de la distancia recorrida por los operarios. Como las diferencias en las distancias atravesadas entre las diferentes reglas de asignación de prioridades son

mínimas, se ha calculado una media. En la siguiente figura, se puede comprobar la distancia media recorrida por operario según la zona de trabajo en la variante "WHN1".

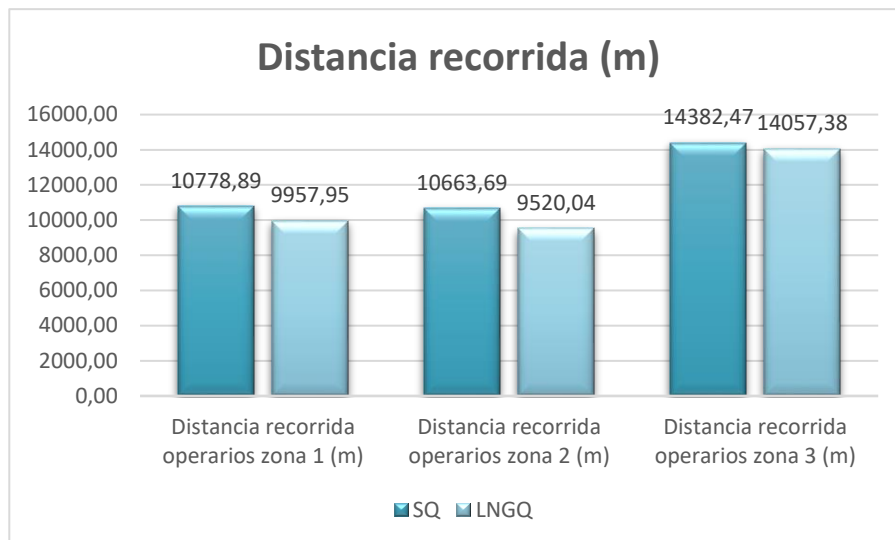


Figura 34: Distancia recorrida por operario en función de la zona de trabajo y la regla "WHR"

A continuación, analizaremos las tardanzas en la variante "WHN4" para seguir mostrando la importancia de aplicar la lógica "LNGQ".

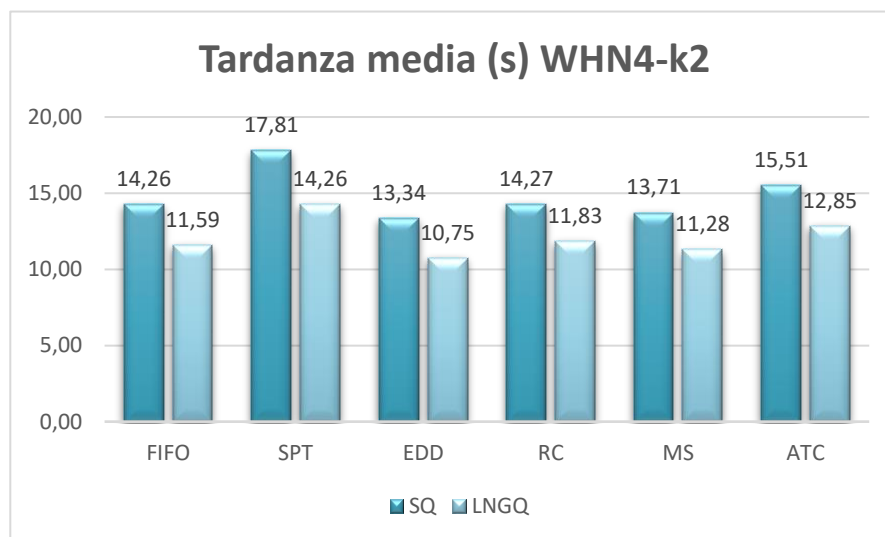
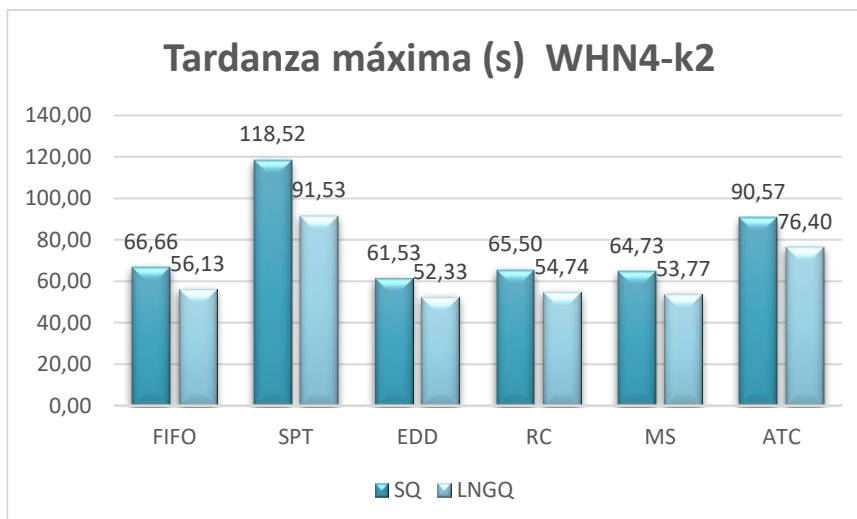


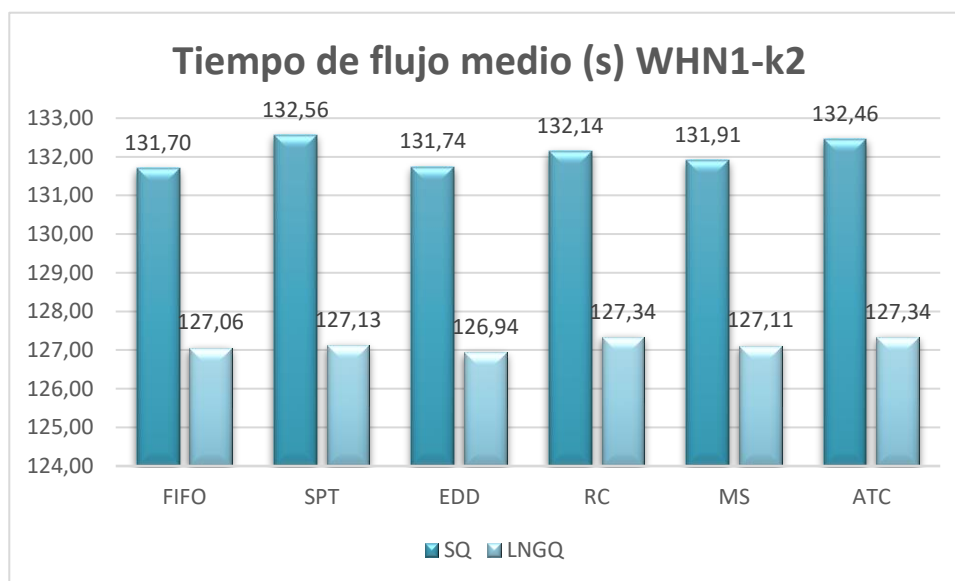
Figura 35: Tardanza media en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes reglas "WHR" en la variante "WHN4-k2"



**Figura 36: Tardanza máxima en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes reglas "WHR" en la variante "WHN4-k2"**

Como se hemos podido apreciar en las dos figuras anteriores, el valor de la tardanza desciende en todas las reglas al acudir a la cola con más ítems a la espera de ser procesados.

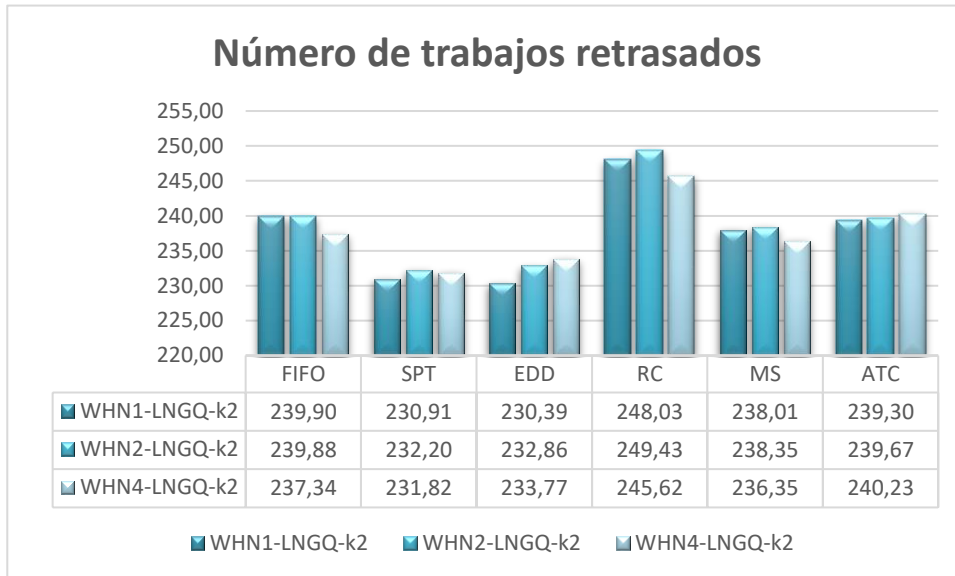
De igual modo, este fenómeno también ocurre con los tiempos de flujo, donde la diferencia más notable la podemos ver en la variante "WHN1" con una diferencia de entre 4 y 5 segundos aproximadamente.



**Figura 37: Tiempo de flujo medio en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes reglas "WHR" en la variante "WHN1-k2"**

Ahora que sabemos que aplicar la lógica "LNGQ" proporciona mejores resultados, debemos determinar que lógica "WHN" es la que mejor se comporta. Para comprobar esto, analizaremos los diferentes factores evaluados (número de trabajos retrasados, tiempos de flujo, tardanzas y distancias recorridas por los operarios) siempre bajo la lógica "LNGQ", para las diferentes variaciones de cuándo debe moverse el operador. Matizaremos también que emplearemos para este análisis el factor de estanqueidad igual a 2, puesto que, de esta manera, al contener "peores resultados", pueden verse mejor las diferencias. Con un factor de rigidez alto, como hemos podido comprobar en la Figura 30 y en la Figura 31, los resultados son demasiado favorables como para poder comprobar las diferencias adecuadamente.

Si prestamos atención al número de trabajos retrasados, podemos comprobar que no existe una tendencia clara acerca de que lógica es la mejor. La variante "WHN4" es la mejor en tres de las seis reglas analizadas y la "WHN1" en las tres restantes.



**Figura 38: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada para las diferentes variantes "WHN"**

Por el contrario, la regla que selecciona un operario cuando la cola en la que está trabajando está vacía ("WHN2"), no proporciona mejores resultados en ninguna regla. Esto se debe a que no varía entre aplicar una lógica "SQ" o aplicar una lógica "LNGQ". En el caso de que los operarios tuviesen que acudir a la cola más corta, por el motivo que sea, entonces deberíamos aplicar sin lugar a duda la variante "WHN2".



**Figura 39: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en las diferentes variantes de las reglas "WHN"**

Este proceso se va a repetir a lo largo de todos los factores evaluados, si existiese inviabilidad de acudir a la cola con mayor cantidad de ítems, debería aplicarse la lógica

"WHN2". Si sí existe esta posibilidad, habrá que escoger entre las lógicas "WHN1" o "WHN4".

Prestemos atención ahora al tiempo de flujo medio. De nuevo, los mejores resultados están repartidos entre las variantes "WHN1" y "WHN4". De todas formas, las diferencias con respecto a la segunda variante de las reglas que dictaminan a dónde debe moverse el operario son mínimas.

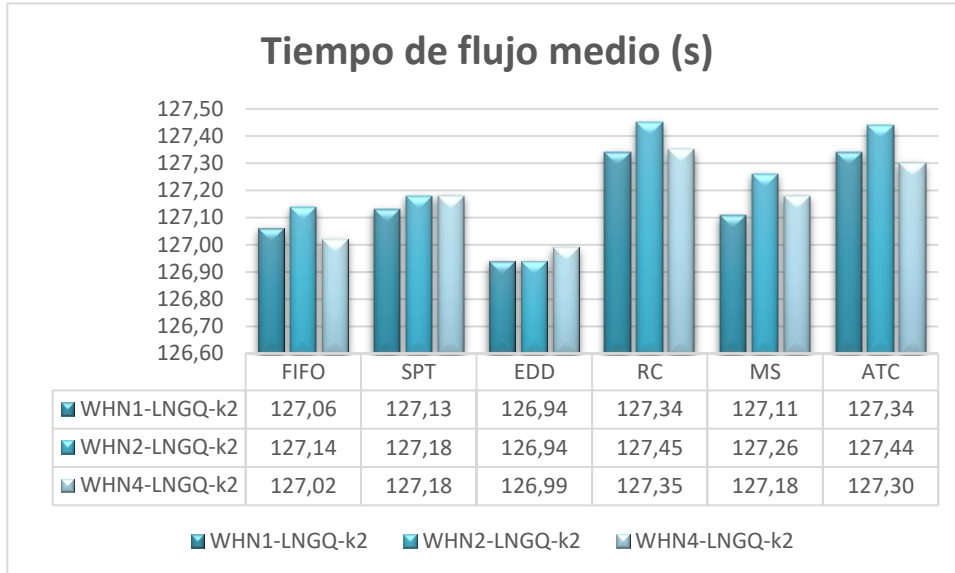


Figura 40: Tiempo de flujo medio para las diferentes reglas de despacho en función de las variantes "WHN"

Si nos fijamos en el tiempo de flujo máximo, sigue aconteciendo lo mismo, la segunda variante no llega a ser la mejor en ninguna de las reglas de despacho propuestas, pero las diferencias siguen sin ser grandes. La primera variante gana en cuatro de las reglas mientras que "WHN4" se coloca como la primera en las dos reglas restantes.

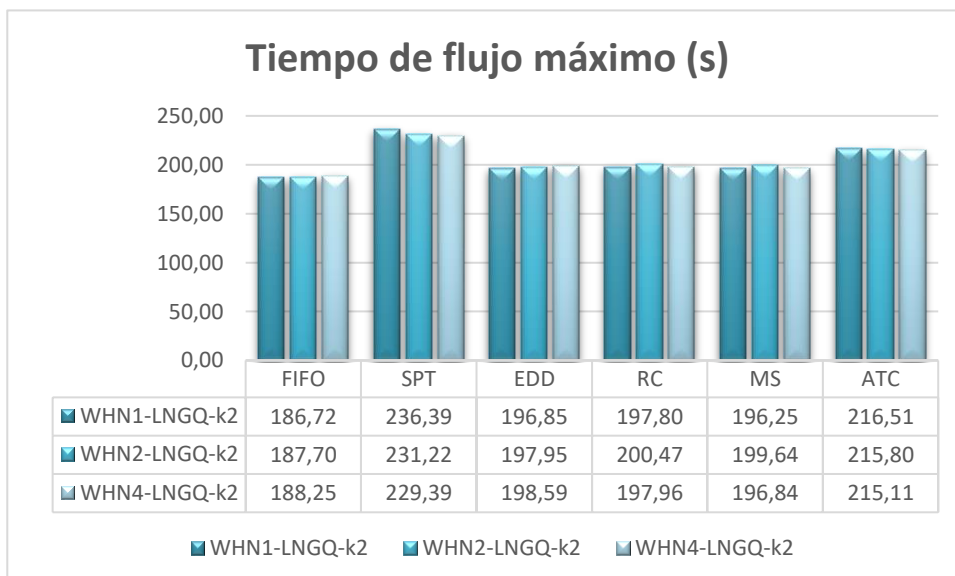
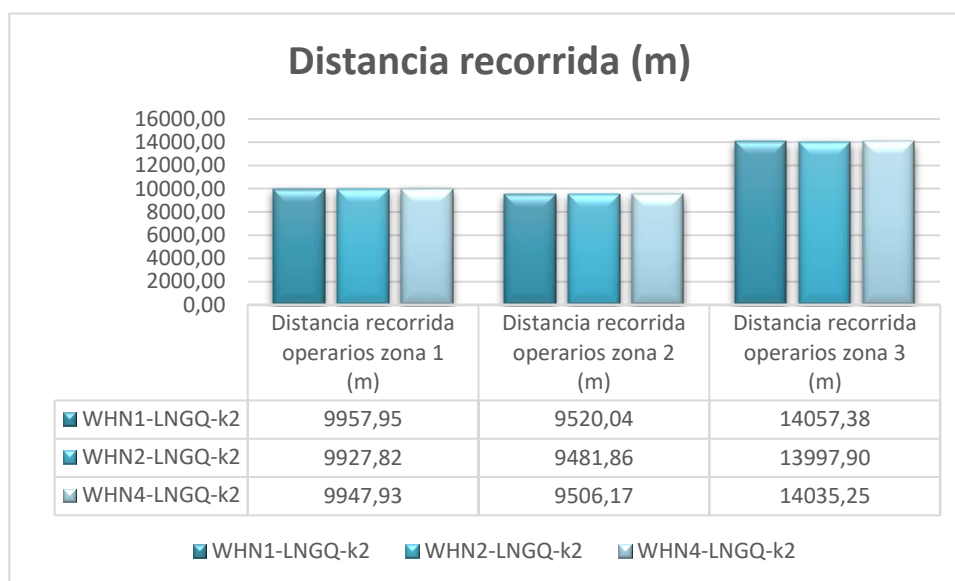


Figura 41: Tiempo de flujo máximo para las diferentes reglas de despacho en función de las variantes "WHN"

El único factor evaluado en el que la regla "WHN2 – LNGQ – k2" se comporta mejor que el resto, es en la distancia recorrida por los operarios. Aunque las diferencias son

mínimas y por lo tanto no suficientes para decantarnos por emplear siempre esta variante, debemos destacar que en cuanto a este parámetro es la mejor.



**Figura 42: Distancia recorrida por operario en las diferentes zonas de trabajo en función de las variantes "WHN"**

A la vista de estas comparaciones, resulta difícil elegir entre una variante de las reglas que deciden cuando un operario debe ser seleccionado para dirigirse a otra estación de trabajo. La elección de una u otra regla puede verse influenciada por la regla de despacho empleada y por lo tanto será lo siguiente que tengamos que analizar.

- Reglas de despacho.

A continuación, se adjuntan dos tablas resumen con los resultados recopilados tras las simulaciones. En estas tablas podremos ver que regla (regla de despacho + asignación laboral) ha sido la mejor y cuál ha sido la peor en base a la consecución de cada uno de los 9 objetivos marcados.

**Tabla 27: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 2$**

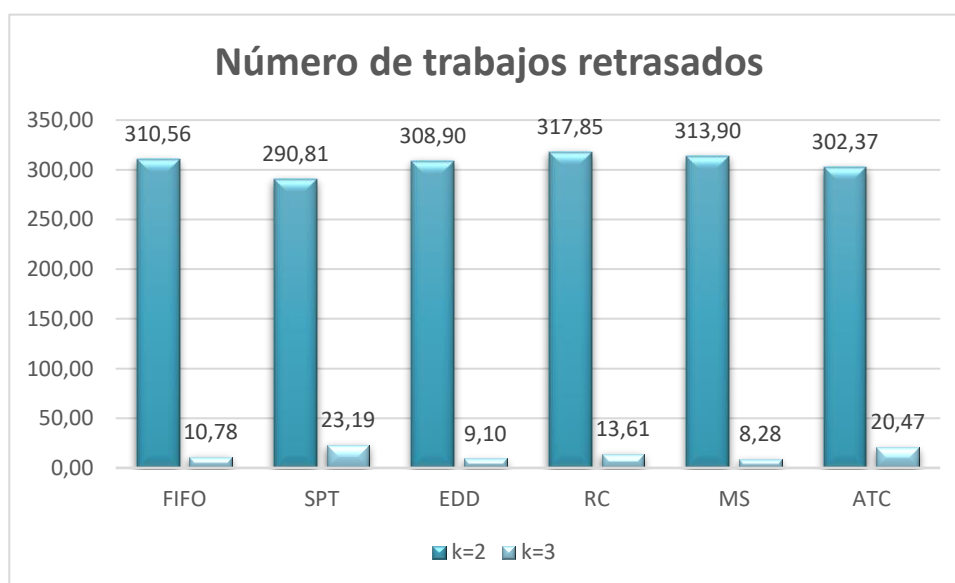
Factor de rigidez $k=2$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	EDD-WHN1-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Número de trabajos retrasados	EDD-WHN1-LNGK-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN1-LNGK-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza media	EDD-WHN1-LNGK-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza máxima	EDD-WHN1-LNGK-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	RC-WHN2-LNGQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	FIFO-WHN2-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	FIFO-WHN2-LNGQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2

**Tabla 28: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 3$**

Factor de rigidez $k = 3$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	EDD-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Número de trabajos retrasados	EDD-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN1-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN1-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza media	EDD-WHN2-SQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza máxima	FIFO-WHN1-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3

Debemos aclarar que la Tabla 28 no contiene las distancias recorridas porque son las mismas independientemente del factor de rigidez.

Tabla 28: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 3$ . Si nos parásemos a observar los datos regla por regla, a lo mejor observaríamos discrepancias con estas tablas. Es decir, si por ejemplo nos fijásemos únicamente en la regla *WHN1 – SQ*, observaríamos que, para un factor de rigidez restrictivo, la regla que consigue un menor número de trabajos retrasados es la regla SPT, junto con la regla ATC. Por el contrario, si ampliamos la holgura con respecto a la fecha de vencimiento, se comportan las peores, reemplazándose en los primeros lugares con las reglas MS y EDD respectivamente.



**Figura 43: Número de trabajos retrasados en función de las reglas aplicadas y el factor de rigidez en la variante WHN1-SQ**

En la Figura 43 podemos ver como la regla SPT puede ser una buena opción para minimizar el número de pedidos entregados con retraso. Por el contrario, en la Tabla 27 y en la Tabla 28 podemos ver como la regla SPT suele encontrarse entre las peores opciones.

Los que se pretende mostrar con las dos tablas anteriores es una visión global de lo que puede ser mejor para nuestra planta, sin la necesidad de analizar regla a regla, lo que podría acabar llevando a confusiones innecesarias. De este modo, podemos establecer conclusiones de que reglas de despacho y de asignación laboral serían las más adecuadas para una planta como ésta.



Con un factor de rigidez igual a 2, podemos afirmar que la regla EDD sería una firme candidata para ser seleccionada en una planta con estas características. Concretamente, la regla  $EDD - WHN1 - LNGQ - k2$  es la mejor en cuanto a número de trabajos entregados a tiempo, tiempo de flujo medio, tardanza media y tardanza máxima. En el tiempo de flujo medio y en la tardanza media aparecieron otras dos opciones con las variantes "WHN2" y "WHN4" respectivamente.

Otra regla que ha destacado ha sido la regla FIFO. Ésta, es la más sencilla de las reglas analizadas, pues se encarga de procesar los ítems por orden de llegada, sin ningún criterio adicional. Aun así, ha conseguido reducir la distancia recorrida por los operarios en las zonas 2 y 3.

Por otra parte, la regla  $SPT - WHN1 - SQ - k2$  ha sido la peor en 5 de los 9 parámetros analizados. Esta regla, escoge como próximo aquel trabajo con un tiempo de procesamiento menor. Esto puede conllevar que, si tenemos un pedido con un tiempo de procesamiento muy grande, tarde mucho en ser escogido, y por tanto el tiempo de flujo y la tardanza en ese pedido se pueden disparar.

Si contamos con un plazo de entrega más holgado ( $k = 3$ ), los resultados varían en cuanto a las reglas 'dónde moverse'. La regla de despacho EDD sigue postulándose como la mejor candidata, consiguiendo el primer puesto en 4 de los 6 parámetros analizados. Por el contrario, antes siempre se empleaba la variante "WHN1", mientras que ahora gana más fuerza moverse cuando se hayan acabado los pedidos que había en la cola cuando llegó el operador.

En la parte contraria,  $SPT - WHN1 - SQ - k3$  se consolida como la peor elección.

Seguramente, en una planta real, no se cuentan con plazos de entrega holgados, sino que los plazos puede incluso estimarlos o exigirlos el cliente, por lo que nos centraremos ahora en las conclusiones cuando tenemos un factor de rigidez menor. En una planta o línea de producción como ésta, se recomienda el empleo de la regla  $EDD - WHN1 - LNGQ - k2$ , pues sus resultados han sido los mejores en casi todos los parámetros. Con esta elección, se penalizaría un poco la distancia recorrida por los trabajadores. Si bien es cierto que la regla WHN2 consigue menores distancias, la diferencia no supone un motivo para descartar la elección WHN1. En la siguiente figura podremos ver las distancias recorridas en función de las diferentes reglas de despacho en la variante  $WHN1 - LNGQ - k2$ . Se puede observar que las diferencias son inapreciables.

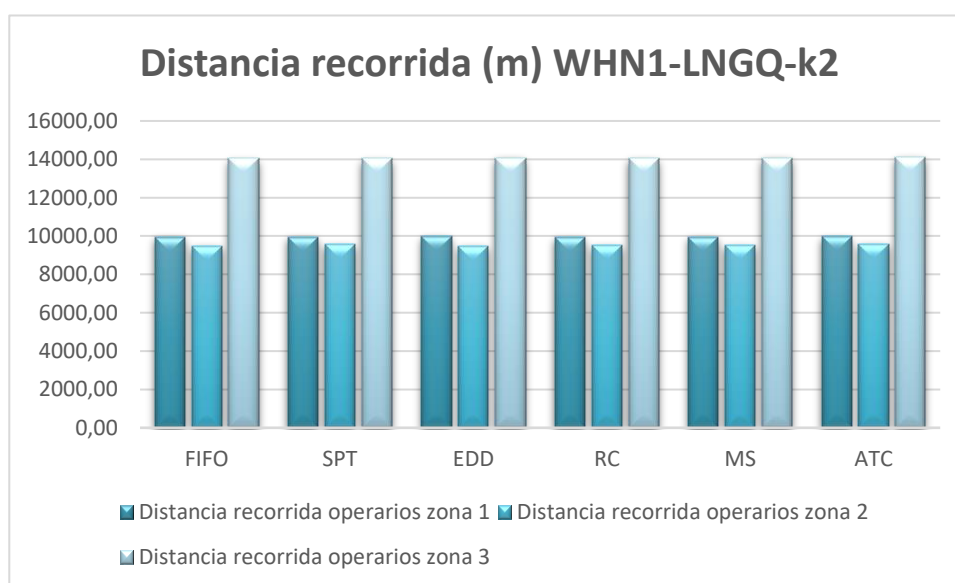


Figura 44: Distancia recorrida por operario según la zona de trabajo para las diferentes reglas de despacho en la variante WHN1-LNGQ-k2



Además de poder discernir que reglas podemos emplear, la simulación también nos ha servido para determinar la utilización de nuestras máquinas y operarios. A pesar de las diferencias entre las reglas de despacho y las reglas de asignación laboral, las ocupaciones han sido básicamente las mismas. Las diferencias no eran representativas como para explicarlas aparte, por lo que se explica la ocupación media.

**Tabla 29: Tabla resumen con los factores de utilización de las diferentes máquinas**

Ocupación M1	19%
Ocupación M2	17%
Ocupación M3	14%
Ocupación M4	23%
Ocupación M5	10%
Ocupación M6	10%
Ocupación M7	11%
Ocupación M8	33%
Ocupación M9	21%
Ocupación M10	15%
Ocupación M11	17%

Como podemos ver, los factores de utilización no son muy altos, siendo el mayor de un 33% y el menor de un 10%. Esto nos indica que las máquinas están infrautilizadas. A continuación, analizaremos la ocupación de nuestros operarios.

**Tabla 30: Tabla resumen con la ocupación de los operadores según su zona de trabajo**

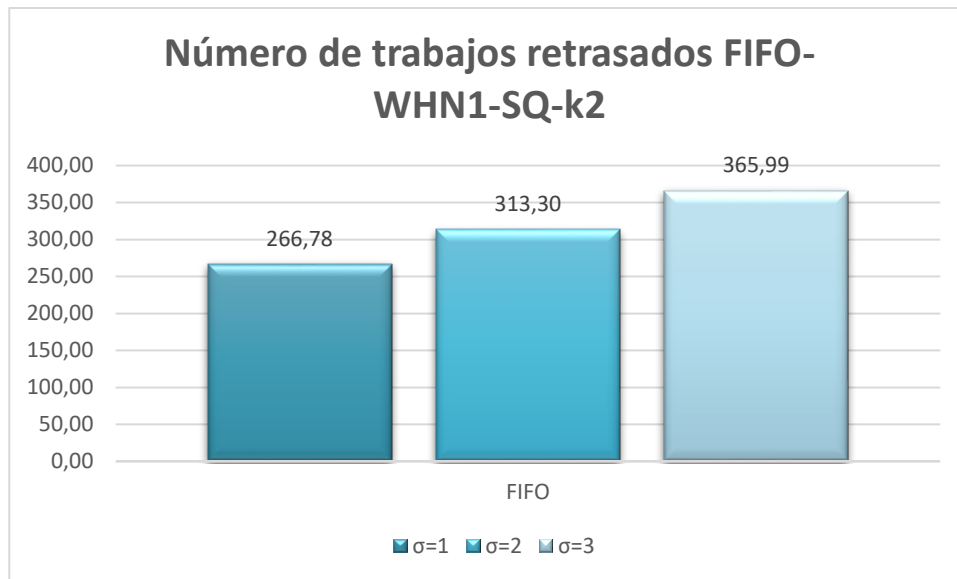
Utilización operadores zona 1	38%
Utilización operadores zona 2	43%
Utilización operadores zona 3	83%

Puede comprobarse que nuestro cuello de botella es la zona de trabajo número 3, pues los operarios tienen un factor de utilización bastante elevado.

A continuación, vamos a comprobar el funcionamiento de las reglas anteriores en el caso de que todos los procesadores tengan la misma variabilidad. Como hemos visto antes, cada procesador tenía una media y una desviación típica "aleatoria". Ahora mantendremos las medias intactas, pero variaremos las desviaciones de todos los procesadores, de modo que valgan 1,2 y 3. Esto se hace para comprobar el funcionamiento de las reglas en función de la variabilidad del proceso. De este modo, podremos comprobar si la Tabla 27 y la Tabla 28 seguirían conduciendo a las mismas conclusiones.

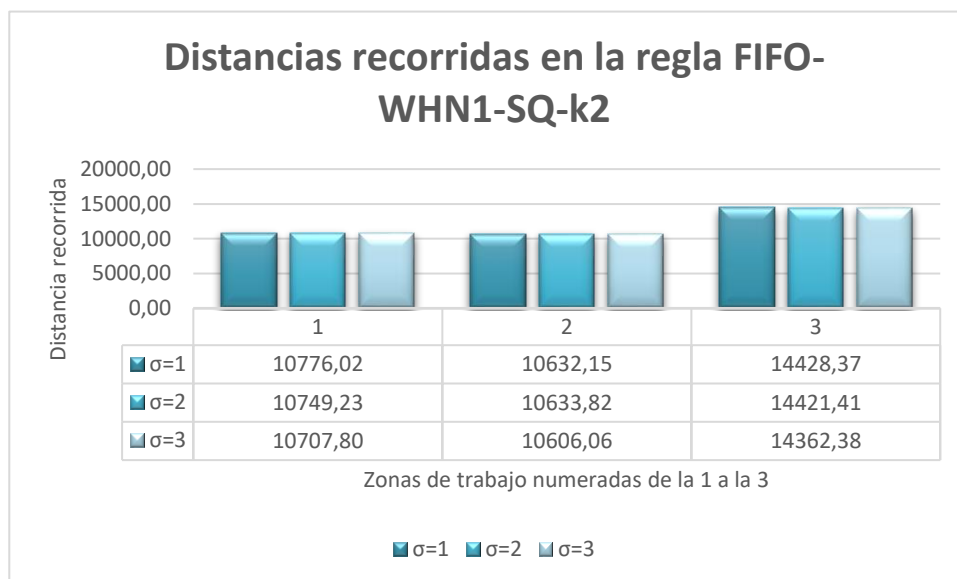
Como aclaración, añadiremos que las fechas de vencimiento y los valores de las constantes de rigidez no han sido modificados con respecto a lo simulado previamente.

Antes de nada, podemos concluir, y como era obvio, que el aumento de la desviación típica proporciona peores resultados en todas las medidas evaluadas (número de trabajos retrasados, tardanza, tiempo de flujo...). En la siguiente figura podemos apreciar el número de trabajos retrasados en función de los valores de la desviación típica. Podemos apreciar una curva ascendente a modo que el valor de dicha desviación aumenta. Esto se debe a la variabilidad del modelo, cuanto mayor es ésta, los tiempos de procesamiento de las máquinas abarcarán un rango más amplio de posibilidades.



**Figura 45: Número de trabajos retrasados en función de la desviación típica en la regla FIFO-WHN1-SQ-k2**

Por el contrario, la distancia que recorren los operarios es menor cuando mayor es la variabilidad. Para comprobar este fenómeno, podremos ver una figura donde se representan las distancias recorridas para las diferentes zonas en función de la desviación típica.



**Figura 46: Distancias recorridas por los operarios en función de las zonas de trabajo y de la desviación típica en la regla FIFO-WHN1-SQ-k2**

Dado que en la gráfica no se puede apreciar detalladamente, debajo cuenta con una tabla donde podemos ver las distancias en metros. En ella, podemos apreciar que cuando  $\sigma = 3$ , la distancia siempre es menor.

A continuación, se adjuntarán seis tablas resumen con los resultados recopilados tras las simulaciones. En estas tablas podremos ver que regla (regla de despacho + asignación laboral) ha sido la mejor y cuál ha sido la peor en base a la consecución de cada uno de los nueve objetivos marcados según su desviación típica y su factor de rigidez.

**Tabla 31: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 2$  y  $\sigma = 1$**

Factor de rigidez $k = 2$ y $\sigma = 1$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	EDD-WHN1-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Número de trabajos retrasados	EDD-WHN1-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN4-LNGQ-k2	FIFO-WHN2-SQ-k2
Tiempo de flujo máximo	EDD-WHN1-SQ-k2	SPT-WHN4-SQ-k2
Tardanza media	EDD-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza máxima	EDD-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	RC-WHN2-SQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	FIFO-WHN2-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	SPT-WHN2-LNGQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2

**Tabla 32: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 3$  y  $\sigma = 1$**

Factor de rigidez $k = 3$ y $\sigma = 1$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	FIFO-WHN2-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Número de trabajos retrasados	MS-WHN1-LNGQ-k3 MS-WHN2-SQ-k3 MS-WHN2-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN1-LNGQ-k3 EDD-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN2-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza media	MS-WHN2-SQ-k3 MS-WHN2-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza máxima	MS-WHN2-SQ-k3 MS-WHN2-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3

**Tabla 33: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 2$  y  $\sigma = 2$**

Factor de rigidez $k = 2$ y $\sigma = 2$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	EDD-WHN4-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Número de trabajos retrasados	EDD-WHN4-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN1-LNGQ-k2	FIFO-WHN2-SQ-k2
Tiempo de flujo máximo	EDD-WHN1-SQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza media	EDD-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza máxima	EDD-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	FIFO-WHN2-SQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	FIFO-WHN2-SQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	SPT-WHN2-SQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2

**Tabla 34: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 3$  y  $\sigma = 2$**

Factor de rigidez $k = 3$ y $\sigma = 2$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Número de trabajos retrasados	EDD-WHN2-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN1-LNGQ-k3	ATC-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza media	MS-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza máxima	MS-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3

**Tabla 35: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 2$  y  $\sigma = 3$**

Factor de rigidez $k = 2$ y $\sigma = 3$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	SPT-WHN1-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Número de trabajos retrasados	SPT-WHN2-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN1-LNGQ-k2	FIFO-WHN2-SQ-k2
Tiempo de flujo máximo	EDD-WHN1-SQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza media	EDD-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza máxima	MS-WHN4-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	FIFO-WHN4-LNGQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	FIFO-WHN2-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	FIFO-WHN2-SQ-k2	ATC-WHN1-SQ-k2

**Tabla 36: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado con un factor de rigidez  $k = 3$  y  $\sigma = 3$**

Factor de rigidez $k = 3$ y $\sigma = 3$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	MS-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Número de trabajos retrasados	MS-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo medio	EDD-WHN4-LNGQ-k3	ATC-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN1-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza media	MS-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza máxima	MS-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3

Con lo analizado en las seis tablas anteriores, podemos darnos cuenta de que la variabilidad sí que ha afectado al comportamiento de las reglas, pues al aumentar la desviación típica, las reglas que proporcionan los mejores resultados han ido variando. Sin ir más lejos, podemos comprobar este fenómeno observando cualquier parámetro

de los nueve analizados entre las seis tablas. A continuación, se adjunta una tabla con la regla que ha minimizado el número de trabajos retrasados en los seis casos analizados.

**Tabla 37: Regla que consigue minimizar el número de trabajos retrasados en función del factor de rigidez  $k$  y la desviación típica  $\sigma$**

Mínimo número de trabajos retrasados	
Factor de rigidez y desviación típica	Regla aplicada
$k = 2$ y $\sigma = 1$	EDD-WHN1-LNGQ-k2
$k = 3$ y $\sigma = 1$	FIFO-WHN2-LNGQ-k3
$k = 2$ y $\sigma = 2$	EDD-WHN4-LNGQ-k2
$k = 3$ y $\sigma = 2$	FIFO-WHN4-LNGQ-k3
$k = 2$ y $\sigma = 3$	SPT-WHN1-LNGQ-k2
$k = 3$ y $\sigma = 3$	MS-WHN4-LNGQ-k3

Como podemos ver, no hay ninguna regla que se repita al completo. Es por esto que los análisis personalizados por planta son necesarios, y por eso se lleva a cabo este Trabajo Final de Grado. No se puede escoger una única regla como óptima para cualquier planta, pues la elección de una regla u otra depende de muchos factores y es importante llevar a cabo análisis adecuados continuamente, pues pueden introducirse cambios en los procesos que puedan afectar en mayor o menor medida a conseguir mejores o peores resultados.

De todas formas, si observamos las 6 tablas adjuntadas previamente, se puede comprobar el predominio de las reglas EDD y MS y el mal comportamiento de la regla SPT por norma general.

Destacaremos también que, al aumentar la variabilidad, hasta un valor de  $\sigma = 3$ , la regla SPT ha conseguido minimizar el número de trabajos retrasados por delante de sus competidoras, a pesar de comportarse como la peor regla en casi todas las modalidades.

Tras todo esto, se sigue recomendando el empleo de la regla EDD, pues aun no siendo la mejor en todos los parámetros analizados, nunca se aleja demasiado del estado "óptimo". También se sigue recomendando que los trabajadores acudan a la cola que tenga una mayor cantidad de pedidos en espera, pues generalmente, la lógica *LNGQ* está consiguiendo mejores resultados que la lógica *SQ*. En cuanto a las reglas del tipo "*WHN*", la decisión es más complicada, pues como hemos podido visualizar, no hay una predominancia clara. Es por esto, que una empresa que cuente con una planta de estas características deberá prestar atención a aquellos parámetros que le interese optimizar por encima del resto, y en base a esto, poder escoger y aplicar una lógica determinada.

## 5.2 Parte II: Dependencia de los tiempos de cambio

A continuación, se analizarán dos casos más, pero esta vez teniendo en cuenta los tiempos de cambio que necesitarán los trabajadores y la maquinaria para poder pasar de procesar un tipo de trabajo a otro diferente. Este caso representa a aquellas empresas en que deben considerarse los tiempos de cambio. Por ello, además de analizar las reglas anteriormente utilizadas, añadiremos cinco reglas nuevas explicadas en el capítulo 3.

Este análisis conlleva un aumento de dificultad, pues además de analizar un taller de la forma que hemos hecho en la Parte I de este capítulo, se añaden nuevos criterios y restricciones a la hora de asignar prioridades a los pedidos que entran en el taller. Este aumento en el análisis provoca que el modelo represente plantas de mayor complejidad y, por tanto, un análisis como el que se va a llevar a cabo, será de gran ayuda al responsable de la planta en cuestión.

### 5.2.1 Caso 3

En este apartado se analizará un *flow shop* híbrido formado por diez máquinas capaces de procesar cinco tipos de trabajos diferentes. La planta estará dividida en tres zonas.

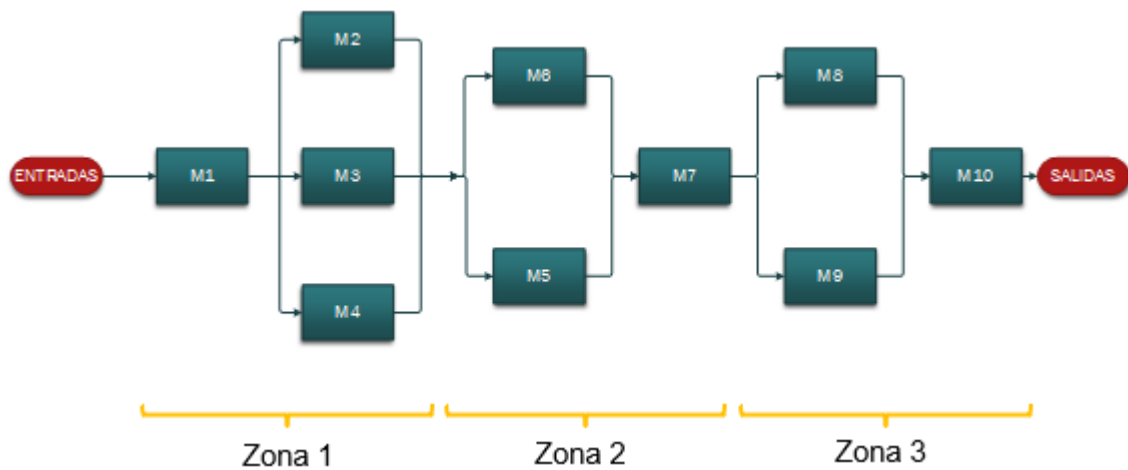


Figura 47: Layout del proceso del Caso 3

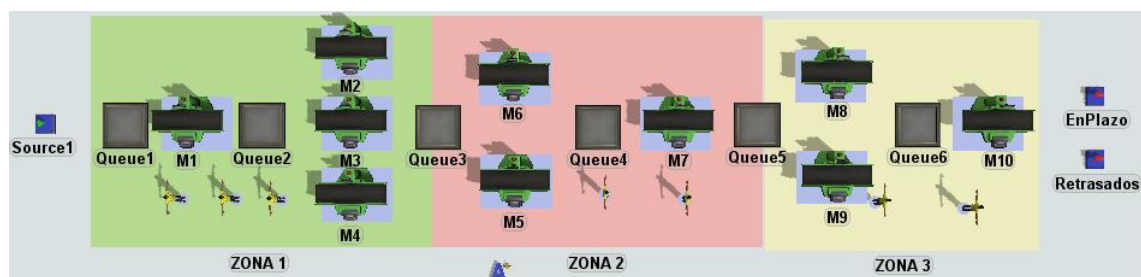


Figura 48: Layout del proceso del Caso 3 en FlexSim sin conexiones

Las hipótesis y restricciones aplicadas al modelo son:

- Cada máquina puede procesar un único trabajo al mismo tiempo.
- La máquina necesita un operario para poder procesar un trabajo.
- Un trabajo no puede abandonar una máquina hasta que su procesamiento haya terminado.

- Los tiempos de procesamiento seguirán una distribución logarítmica normal.
- Los tiempos de cambio seguirán una distribución logarítmica normal.
- Los tiempos de cambio serán iguales en cada máquina, pero dependerán de la secuencia de trabajos siguiendo la siguiente tabla:

**Tabla 38: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de cambio en el caso 3**

	Tiempos de cambio				
	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 4	Trabajo 5
Trabajo 1	0	$\mu = 1,5; \sigma = 1,5$	$\mu = 2,5; \sigma = 1,2$	$\mu = 3; \sigma = 1,1$	$\mu = 1; \sigma = 1$
Trabajo 2	$\mu = 2; \sigma = 1$	0	$\mu=3; \sigma=2$	$\mu = 3; \sigma = 1,7$	$\mu = 1; \sigma = 1$
Trabajo 3	$\mu = 1,5; \sigma = 3$	$\mu = 2; \sigma = 2$	0	$\mu = 2; \sigma = 2$	$\mu = 2; \sigma = 3$
Trabajo 4	$\mu = 3; \sigma = 1,5$	$\mu = 3; \sigma = 0,5$	$\mu = 1,3; \sigma = 1,3$	0	$\mu = 3; \sigma = 2$
Trabajo 5	$\mu = 1,2; \sigma = 2$	$\mu = 1,6; \sigma = 1$	$\mu = 1; \sigma = 4$	$\mu = 3,5; \sigma = 3$	0

- Cada tipo de trabajo tiene que cumplir con un tiempo máximo de finalización.
- El número de operarios variará para encontrar el estado óptimo.
- Un operario puede escoger una máquina disponible dentro de su zona de aplicación, pero no puede ir a otra zona. De este modo impedimos que un operario recorra largas distancias empeorando los resultados de la simulación.
- La llegada de trabajos al taller sigue una distribución exponencial de media 20 segundos.
- La llegada de los distintos tipos de trabajos es equiprobable.
- Se llevarán a cabo cien simulaciones con un intervalo de confianza del 90% para cada regla para aumentar la veracidad de los resultados.
- Se simulará un intervalo de tiempo de 28800 segundos, correspondientes a ocho horas, como en un turno de trabajo.
- Se analizarán las siguientes reglas de despacho:
  - FIFO
  - SPT
  - EDD
  - RC
  - MS
  - ATC
  - SIMSET (SST)
  - SSPT
  - JSPT
  - JEDD
  - JCR
- Se analizarán las siguientes reglas de asignación laboral:
  - En cuanto a 'cuándo moverse':
    - WHN 1: centralización.
    - WHN 2: descentralización.
    - WHN 4: regla del seguidor.
  - En cuanto a 'dónde moverse':
    - SQ: *Shortest Queue*.
    - LNGQ: *Longest Queue*.
- Para nombrar las reglas y que no haya equivocaciones se seguirá un patrón:

*Regla de despacho – Regla ‘cuándo moverse’ – Regla ‘dónde moverse’  
 – Factor estanqueidad*

En primer lugar, analizaremos nuestro modelo con las medias y desviaciones típicas dependientes de la máquina y tipo de trabajo. A continuación, se adjunta una tabla con las medias y desviaciones empleadas para calcular los tiempos de procesamiento en las diferentes etapas del proceso.

**Tabla 39: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de procesamiento dependientes de la máquina y del tipo de trabajo**

	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 4	Trabajo 5
M1	$\mu = 5; \sigma = 3$	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 6; \sigma = 2$	$\mu = 2; \sigma = 0.5$	$\mu = 8; \sigma = 2$
M2	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 8; \sigma = 3$	$\mu = 6; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 8; \sigma = 2$
M3	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu=8; \sigma=3$	$\mu = 6; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 8; \sigma = 2$
M4	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 8; \sigma = 3$	$\mu = 6; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 8; \sigma = 2$
M5	$\mu = 4; \sigma = 1$	$\mu=3; \sigma=2$	$\mu = 2; \sigma = 3$	$\mu = 1; \sigma = 0.5$	$\mu = 4; \sigma = 1$
M6	$\mu = 4; \sigma = 1$	$\mu=3; \sigma=2$	$\mu=2; \sigma=3$	$\mu = 1; \sigma = 0.5$	$\mu = 4; \sigma = 1$
M7	0	$\mu = 6; \sigma = 2$	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 2; \sigma = 2$	0
M8	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$
M9	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$
M10	$\mu = 6; \sigma = 1$	$\mu = 8; \sigma = 3$	$\mu = 5; \sigma = 2$	$\mu = 4; \sigma = 1$	$\mu = 9; \sigma = 3$

Para poder estimar la fecha de entrega, necesitamos el tiempo de procesamiento total. Si realizásemos numerosas simulaciones e hiciésemos un promedio, el tiempo de procesamiento total sería igual a la suma de las medias de la tabla anterior.

**Tabla 40: Tiempos de procesamiento totales caso 3**

Tiempos de procesamiento total	
Trabajo 1	60
Trabajo 2	71
Trabajo 3	60
Trabajo 4	50
Trabajo 5	69

Actualmente contamos con tiempos de cambio, por lo que hay que tenerlos en cuenta a la hora de calcular una fecha de entrega.

$$d_i = a_i + k(p_i + n_i \cdot \mu_s)$$

Siendo:

- $d_i$  fecha de entrega del trabajo  $i$
- $a_i$  tiempo de llegada del trabajo  $i$
- $k$  factor de rigidez de la fecha de vencimiento
- $p_i$  tiempo total de procesamiento del trabajo  $i$
- $n_i$  número de operaciones del trabajo  $i$



$\mu_s$  tiempo de cambio medio

Aplicando la fórmula anterior obtenemos la siguiente tabla con los tiempos máximos de finalización, que no son lo mismo que las fechas de entrega. Recordaremos que la tabla anterior sólo muestra el segundo sumando de la ecuación, pues las fechas de llegada se tendrán en cuenta en la simulación, pero por el momento son desconocidas.

**Tabla 41: Tiempos máximos de finalización en el caso 3**

	Tiempo máximo de finalización	
	$k = 2$	$k = 3$
Trabajo 1	223	334
Trabajo 2	270	405
Trabajo 3	228	342
Trabajo 4	202	303
Trabajo 5	256	384

En este caso no hemos aplicado el factor 1.2 empleado en el modelo anterior, pues ahora contamos con tiempos de cambio. La ecuación empleada para estimar las fechas de entrega tiene en cuenta estos cambios, por el contrario, en el Caso 2 no teníamos tiempos de cambio, y por tanto la fecha de entrega era más restrictiva.

A continuación, procederemos a determinar el número de operarios mediante la regla FIFO-WHN1-SQ-K2. Luego mantendremos el mismo número de trabajadores para el resto de los casos. Para llevar esto a cabo, se han simulado doce escenarios diferentes siempre y cuando los operarios fuesen un recurso limitado. A la vista de los resultados, y como era de esperar, el escenario que consigue el menor número de trabajos retrasados es el menos restrictivo, ya que tiene tres operarios en la zona 1, y dos operarios en el resto de las zonas.

**Tabla 42: Número de trabajos retrasados en función del número de operarios por zona**

Escenario	Zona	Nº Operarios	Trabajos retrasados
1	1	1	970
	2	1	
	3	1	
2	1	2	899
	2	1	
	3	1	
3	1	3	877
	2	1	
	3	1	
4	1	1	965
	2	2	
	3	1	
5	1	2	896
	2	2	
	3	1	

Escenario	Zona	Nº Operarios	Trabajos retrasados
6	1	3	934
	2	2	
	3	1	
7	1	1	1057
	2	1	
	3	2	
8	1	2	426
	2	1	
	3	2	
9	1	3	495
	2	1	
	3	2	
10	1	1	1070
	2	2	
	3	2	
11	1	2	110
	2	2	
	3	2	
12	1	3	79
	2	2	
	3	2	

### 5.2.1.1 Cálculo de la constante $K$

Ahora ya podemos determinar los valores de la constante para la regla ATC en sus diferentes modalidades.

- Regla  $ATC - WHN1 - SQ - k2$

El *software* nos proporciona tres valores que ha considerado como óptimos:  $K = 1$ ,  $K = 25.5$  y  $K = 50$ . Podemos comprobar las tres soluciones anteriores mediante puntos azules rodeados por una circunferencia de color malva en la siguiente imagen.

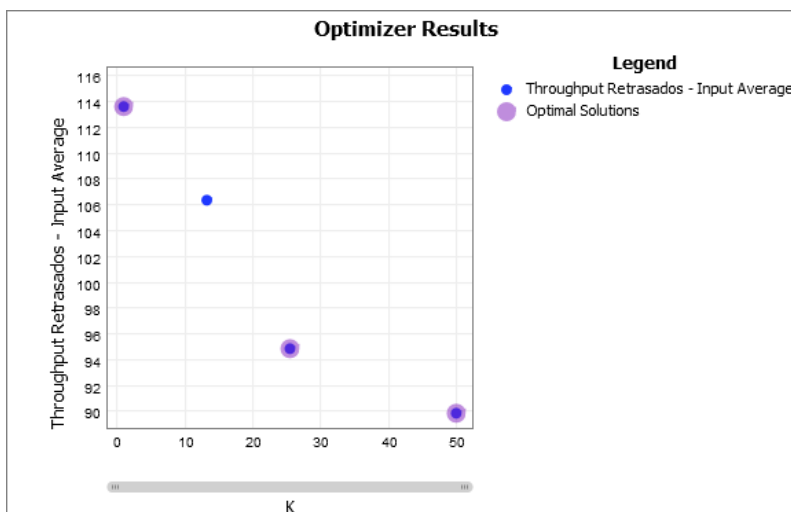


Figura 49: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajo retrasados en la regla ATC-WHN1-SQ-k2

Por lo tanto, para escoger una u otra opción, recurrimos a la simulación y tras 25 réplicas obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 43: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN1-SQ-k2

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,0$	136,9	44,9
$K = 25,5$	111,3	176,9
$K = 50,0$	89,9	36,2

Como podemos comprobar en la tabla anterior, el mejor valor sin lugar a dudas es  $K = 50$  pues consigue mejores resultados tanto minimizando el número de pedidos entregados fuera de plazo como la tardanza media.

- Regla *ATC – WHN1 – LNGQ – k2*

Con esta variante se ha encontrado las mismas tres opciones que en la variante anterior, y por eso volveremos a optar por la simulación para encontrar un veredicto.

Tabla 44: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k2

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,00$	66,80	27,82
$K = 25,50$	49,90	28,32
$K = 50,00$	50,05	28,10

Emplearemos la tercera opción, puesto que, si multiplicamos el número de trabajos retrasados por la tardanza media, podríamos decir que tenemos la tardanza media total. De este modo, el menor valor se obtiene con  $K = 50$ .

- Regla  $ATC - WHN1 - SQ - k3$

El *software* vuelve a proporcionarnos más de un valor, esta vez  $K = 25.5$  y  $K = 50$ . Realizaremos 25 simulaciones para tener unos resultados más contrastados y poder comparar ambos valores.

**Tabla 45: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN1-SQ-k3**

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 25,5$	39,3	48,2
$K = 50,0$	22,7	56,6

Como se puede comprobar, mientras un valor de  $K$  reduce la tardanza media, el otro reduce el número de trabajos entregados con retraso. Al llegar a un punto como este, debería tenerse en cuenta el coste por unidad de trabajo retrasada y por segundo de retraso. De esta manera, tomar una decisión sería más sencillo y más eficaz. Nosotros no contamos con esta información, por lo que nos decantaremos por un valor de  $K = 50$ . Hemos optado por esta opción porque si multiplicamos el número de trabajos entregados fuera de plazo por la tardanza media, tendríamos el tiempo de retraso total medio. Este valor es más pequeño en la segunda opción, y por tanto emplearemos la segunda opción.

- Regla  $ATC - WHN1 - LNGQ - k3$

La herramienta *Optimizer* nos proporciona de nuevo 3 valores, que tras las pertinentes simulaciones obtenemos los siguientes datos:

**Tabla 46: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k3**

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,0$	14,1	35,9
$K = 25,5$	10,3	39,6
$K = 50,0$	10,9	37,5

De nuevo nos encontramos con valores muy similares, donde debería tenerse en cuenta el coste por unidad de tiempo de retraso y por unidad de trabajo retrasada. De esta manera, obtener una conclusión sería más sencillo.

Nos quedaremos con la última opción por el mismo motivo que en el caso anterior.

- Regla  $ATC - WHN2 - SQ - k2$

En este caso, el *software* nos ha proporcionado dos valores,  $K = 13.25$  y  $K = 25.50$ . Como hemos hecho previamente, se adjunta a continuación una tabla con los resultados tras las simulaciones para determinar la mejor opción.

**Tabla 47: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN2-SQ-k2**

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 13,25$	69,20	20,45
$K = 25,50$	59,30	21,69

En base a los resultados mostrados por la tabla anterior, determinamos que la mejor opción es emplear un valor de  $K = 25.50$  porque el segundo de retraso que tiene por encima de la primera opción se compensa con los casi diez trabajos retrasados menos que consigue.

- Regla *ATC – WHN2 – LNGQ – k2*

A continuación, se nos ofrecen las dos mismas posibilidades que cuando se aplicó la lógica "SQ", y, por lo tanto, el método para establecer cuál es la mejor opción es el mismo.

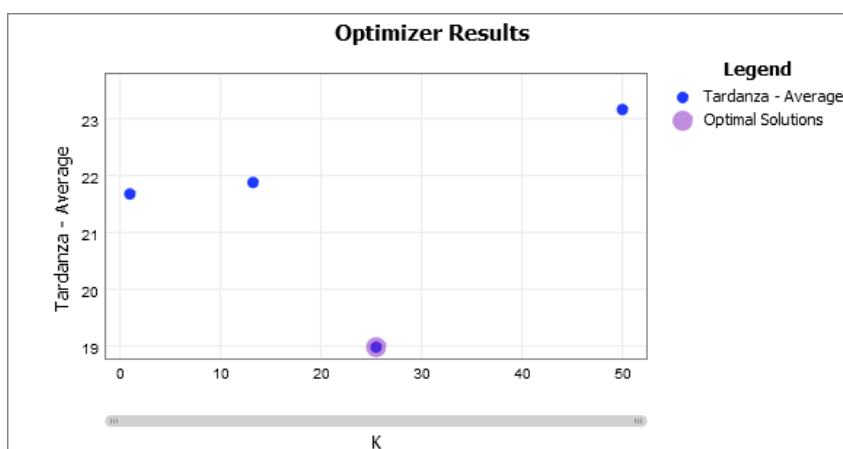
**Tabla 48: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k2**

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 13,25$	69,20	20,45
$K = 25,50$	59,30	21,69

Como se puede observar, los resultados son los mismos que cuando los trabajadores se dirigen a la cola con una menor cantidad de ítems. Al suceder esto, la elección es la misma que antes,  $K = 25.50$ .

- Regla *ATC – WHN2 – SQ – k3*

En esta ocasión, el optimizador ha encontrado un único valor que sea capaz de minimizar ambos parámetros perseguidos. Este valor es 25.5 y podemos verlo en la siguiente figura mediante un punto azul rodeado por un círculo de color malva.



**Figura 50: Valor de  $K$  que minimiza la tardanza media en la regla ATC-WHN2-SQ-k3**

- Regla  $ATC - WHN2 - LNGQ - k3$

Igual que pasaba en el caso anterior, el mejor valor de la constante ha sido 25.50. En la siguiente figura podemos ver como destaca estando por debajo del resto en cuanto al número de trabajos retrasados.

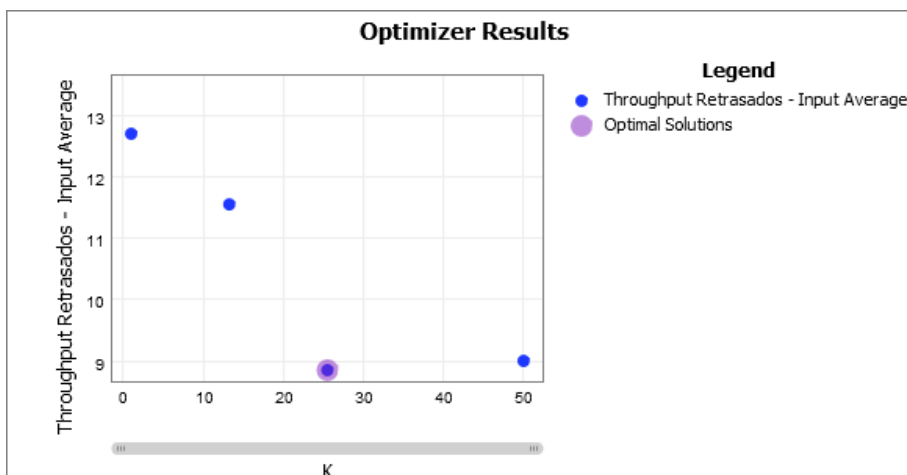


Figura 51: Valor de  $K$  que minimiza el número de trabajos retrasados en la regla  $ATC-WHN2-LNGQ-k3$

Puede parecer que el valor de  $K = 50$  es muy parejo, por lo que mostraremos también la tardanza media para que se vislumbren mejor las diferencias.

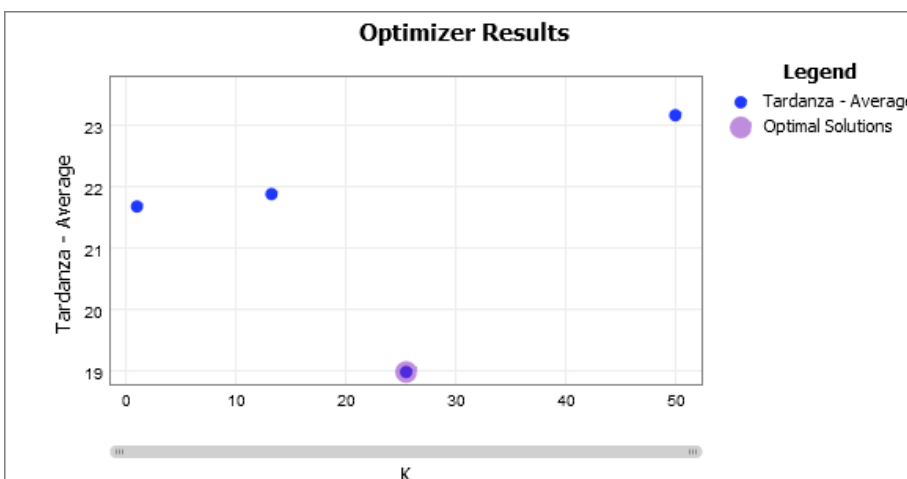


Figura 52: Valor de  $K$  que minimiza la tardanza media en la regla  $ATC-WHN2-LNGQ-k3$

- Regla  $ATC - WHN4 - SQ - k2$

Al modificar la variante "WHN" hemos vuelto obtener tres valores posibles para la constante  $K$ .

Tabla 49: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla  $ATC-WHN4-SQ-k2$

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 1,00$	98,72	34,74
$K = 25,50$	84,40	44,46
$K = 50,00$	75,12	31,51

Tras observar la tabla anterior, resulta evidente que los mejores resultados se obtienen con  $K = 50$ , pues obtiene una menor tardanza media y una menor cantidad de pedidos entregados fuera de plazo que sus otras dos competidoras.

- Regla  $ATC - WHN4 - LNGQ - k2$

A continuación, el optimizador de *FlexSim* ha determinado que los dos mejores valores posibles de esta constante son  $K = 13.25$  y  $K = 25.50$ .

**Tabla 50: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla AT-WHN4-LNGQ-k2**

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 13,25$	81,70	19,51
$K = 25,50$	74,05	21,06

La opción escogida es  $K = 25.50$  puesto que creemos que la diferencia entre las tardanzas medias se compensa con los siete trabajos retrasados menos. Si empleamos el cálculo de el tiempo de retraso medio total la elección es la misma.

- Regla  $ATC - WHN4 - SQ - k3$

Con esta variante, se nos ofrecen dos posibilidades, una menos que cuando el factor de rigidez era igual a dos. Dichas posibilidades son  $K = 25.50$  y  $K = 50.00$ .

**Tabla 51: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN4-SQ-k3**

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 25,50$	15,25	19,07
$K = 50,00$	14,30	21,04

En esta variante no está claro que opción debemos emplear. Como se ha dicho previamente, deberían conocerse los costes por unidad de tiempo de retraso y por unidad de trabajo retrasada. Al desconocer estos dos costes, escogeremos una opción u otra en función del menor valor de la multiplicación entre ambos parámetros. Si multiplicamos el número de trabajos retrasados por la tardanza media que tiene cada trabajo podemos tener el tiempo medio total de retraso que tiene nuestra planta.

Aplicando esto, la elección es  $K = 25.50$ .

- Regla  $ATC - WHN4 - LNGQ - k3$

Aunque hayamos modificado la lógica "*WHR*", las dos opciones siguen siendo las mismas:  $K = 25.50$  y  $K = 50.00$ .

**Tabla 52: Valores de  $K$  que minimizan el número de trabajos retrasados y la tardanza media en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3**

	Nº de trabajos retrasados	Tardanza media (s)
$K = 25,50$	10,30	23,22
$K = 50,00$	10,45	19,39

Seleccionamos la segunda opción ( $K = 50$ ), puesto que consigue 4 segundos menos de tardanza mientras que el número de trabajos retrasados es prácticamente el mismo. Teniendo en cuenta que dicho número tendría que ser un número entero, a lo sumo, la diferencia sería de un trabajo.

A continuación, adjuntaremos una tabla resumen con los diferentes valores que tomará la constante  $K$  en función de la variante de la regla ATC empleada.

**Tabla 53: Tabla resumen con los valores de la constante  $K$  en función de la variante de la regla ATC aplicada**

Regla	Valor de $K$
ATC-WHN1-SQ-k2	50,00
ATC-WHN1-LNGQ-k2	50,00
ATC-WHN1-SQ-k3	50,00
ATC-WHN1-LNGQ-k3	50,00
ATC-WHN2-SQ-k2	25,50
ATC-WHN2-LNGQ-k2	25,50
ATC-WHN2-SQ-k3	25,50
ATC-WHN2-LNGQ-k3	25,50
ATC-WHN4-SQ-k2	50,00
ATC-WHN4-LNGQ-k2	25,50
ATC-WHN4-SQ-k3	25,50
ATC-WHN4-LNGQ-k3	50,00

### 5.2.1.2 Simulación del modelo

Una vez realizados todos los cálculos y preparativos necesarios, se realizan las 132 simulaciones pertinentes correspondientes a cada una de las variantes posibles de las once reglas iniciales de las que partimos en este Caso 3. Para ello, se realizan cien réplicas de cada una de las variantes anteriores para que los resultados sean más contrastados y resulten representativos.

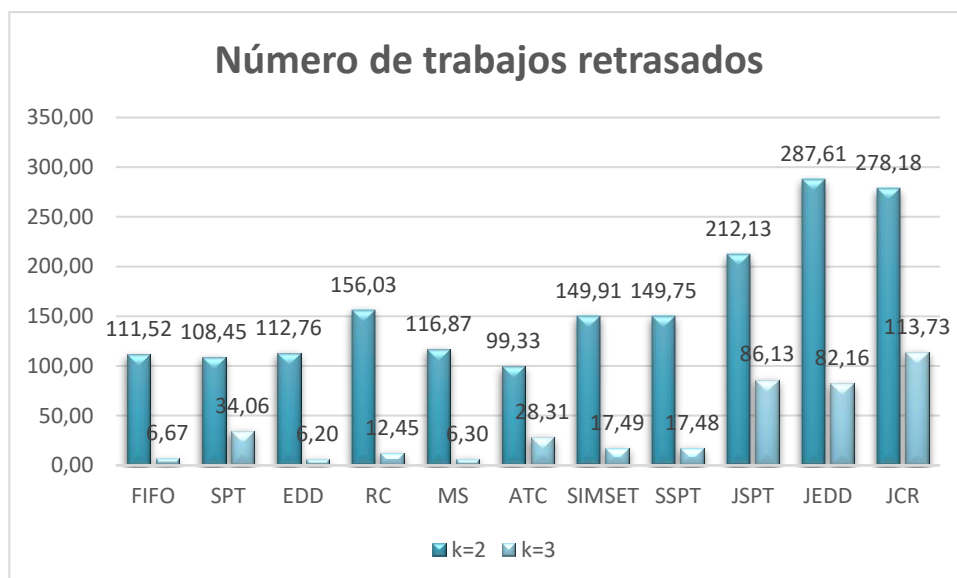
Igual que hemos hecho en el caso anterior, primero analizaremos las diferencias encontradas entre las reglas de asignación laboral y las diferencias aportadas por el factor de rigidez. Una vez hecho esto, se analizarán las reglas de asignación de prioridades para intentar determinar que elección es la más adecuada para un *Flow Shop* como el que se está analizando.

- Reglas de asignación laboral y factor de rigidez.

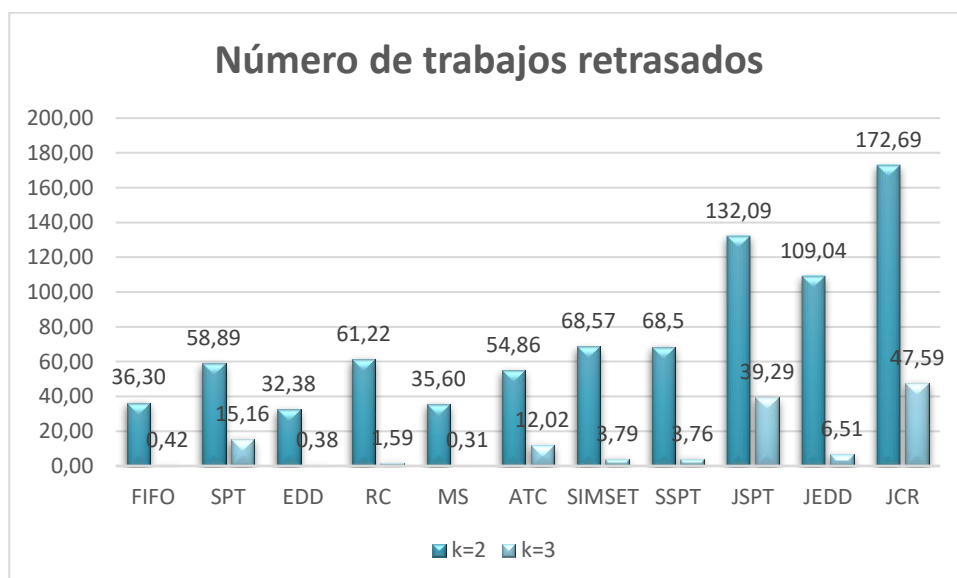
Comenzaremos comentando que el número de trabajos retrasados disminuye considerablemente al aumentar el factor de rigidez. Esto resulta obvio, y se dará en todos los casos analizados, debido a que, al aumentar la holgura con respecto a la fecha



de vencimiento, menor será la cantidad de pedidos que se entreguen fuera de los plazos establecidos. Para ilustrar este efecto, se adjuntan dos figuras en las que podemos ver el número de trabajos retrasados en cada regla en las variantes *WHN1 – SQ* – y *WHN1 – LNGQ* con los diferentes valores del factor de rigidez.



**Figura 53: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-SQ**



**Figura 54: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-LNGQ**

A continuación, nos centraremos en las reglas de asignación laboral. Si atendemos a las reglas "*WHR*", que definen la lógica de hacia dónde debe moverse el trabajador, la lógica "*LNGQ*" sigue consiguiendo mejores resultados en todos los parámetros establecidos que la lógica "*SQ*". Este fenómeno sólo ocurre cuando aplicamos las variantes "*WHN1*" y "*WHN4*", mientras que, si aplicamos la descentralización, las diferencias entre acudir a la cola más corta, o a aquella que tiene una mayor cantidad de ítems, es casi inapreciable.

En la Figura 55 y en la Figura 56 puede apreciarse lo explicado anteriormente. Si la lógica que dicta cuándo debe moverse un trabajador es la lógica de centralización, o la

regla del seguidor ("*WHN1*" y "*WHN4*" respectivamente), las diferencia entre acudir a la cola con una mayor cantidad de pedidos en espera, o acudir a la cola con una menor cantidad de dichos pedidos, resulta bastante representativa, siendo la lógica "*LNGQ*" siempre mejor. Por el contrario, en la Figura 57, podemos apreciar como al aplicar la descentralización, las diferencias entre acudir a una cola u otra en función de la cantidad de elementos que contenga, son mínimas. Para ilustrar aún más la semejanza de valores, la Figura 57 contiene una tabla para poder comparar los resultados más cómodamente.

El hecho de que en la variante "*WHN2*" no influya considerablemente la elección de una alternativa "*WHR*" u otra, puede resultar ventajoso porque el operario podría acudir a la cola que le resultase más cómoda, disminuyendo de esa manera la distancia que éste podría llegar a recorrer.

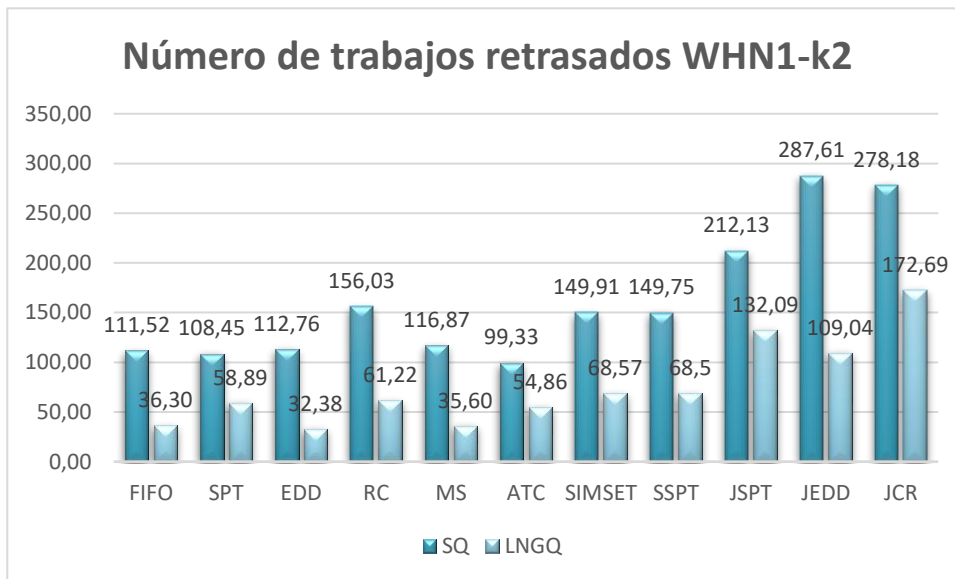


Figura 55: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-k2 para las diferentes variantes "WHR"

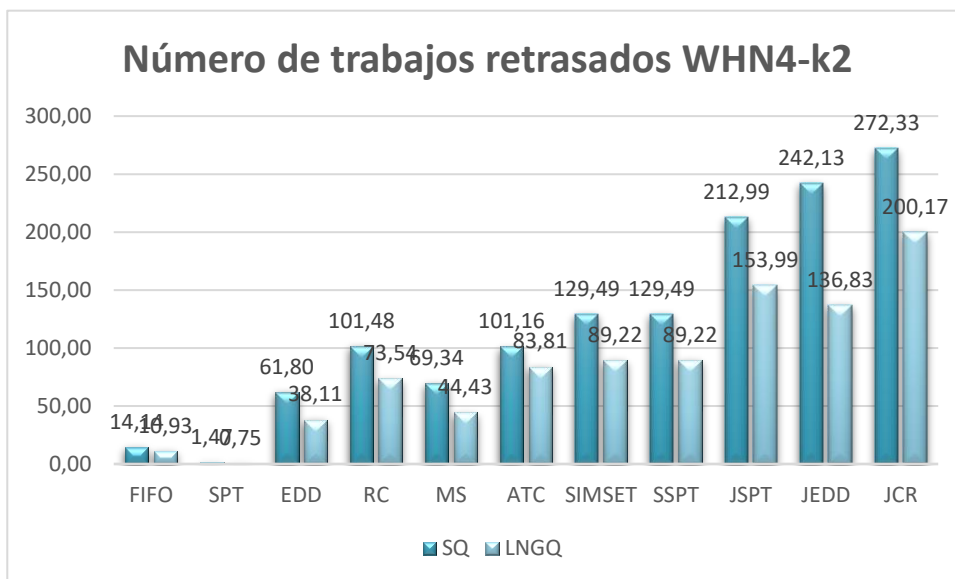
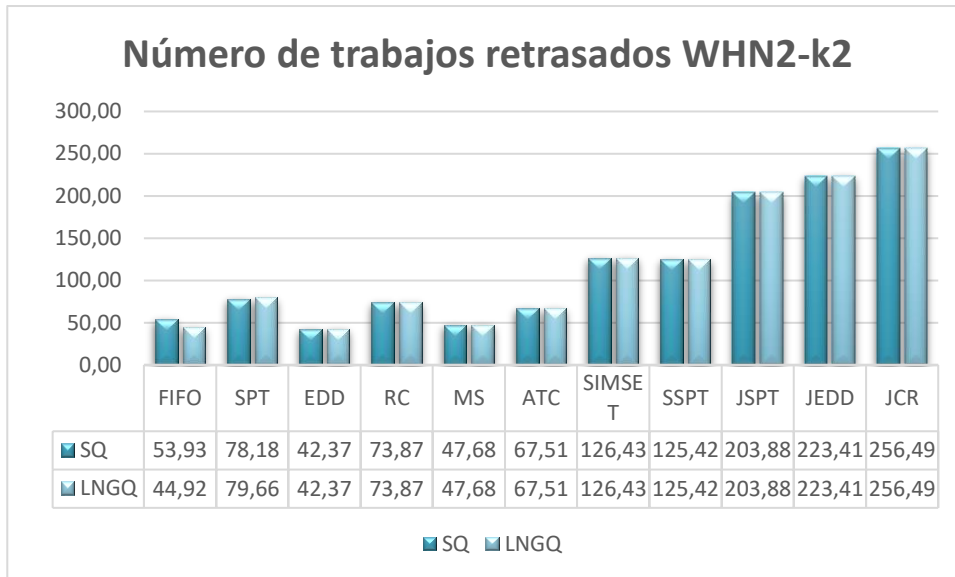
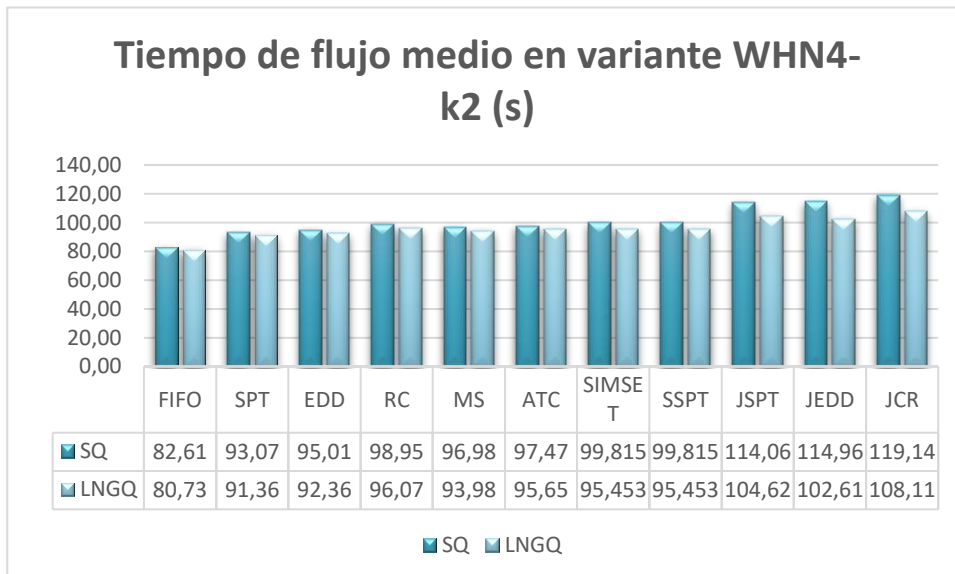


Figura 56: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes variantes "WHR"



**Figura 57: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN2-k2 para las diferentes variantes "WHR"**

De momento sólo se ha mostrado el efecto explicado previamente en el número de trabajos retrasados, pero esto también ocurre con los tiempos de flujo, las tardanzas y las distancias recorridas. Mostraremos a continuación una figura donde puede apreciarse la diferencia en el tiempo de flujo medio en la variante *WHN4 – k2*. El tiempo de flujo es quizá, el aspecto que menos varíe, pero, aun así, puede discernirse la mejoría al acudir a la estación de trabajo con una mayor carga de trabajo pendiente. Las diferencias oscilan entre los dos segundos y los doce.

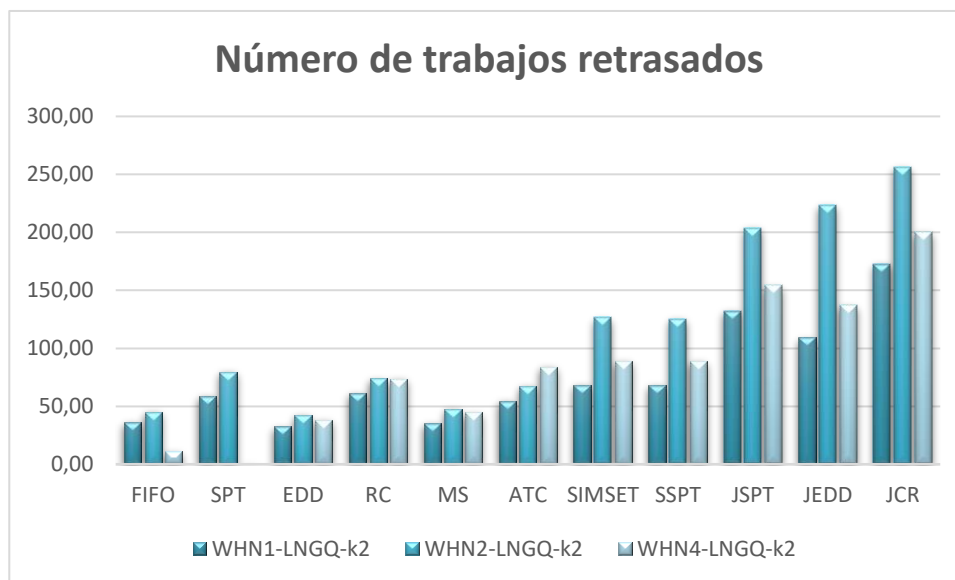


**Figura 58: Tiempo de flujo medio en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes reglas "WHR"**

Una vez hemos determinado que entre las alternativas del tipo "WHR", la mejor elección es acudir a la cola más larga, debemos determinar que variante del tipo "WHN" proporciona mejores resultados. Para llegar a esta conclusión, se analizarán los diferentes factores evaluados (número de trabajos retrasados, tiempos de flujo, tardanzas y distancias recorridas por los trabajadores) siempre bajo la influencia de la variante "LNGQ", puesto que hemos determinado que es la mejor opción. Además, también aplicaremos para este análisis el factor de rigidez igual a dos, puesto que, de

este modo, como los resultados son más desfavorables, pueden apreciarse mejor las diferencias.

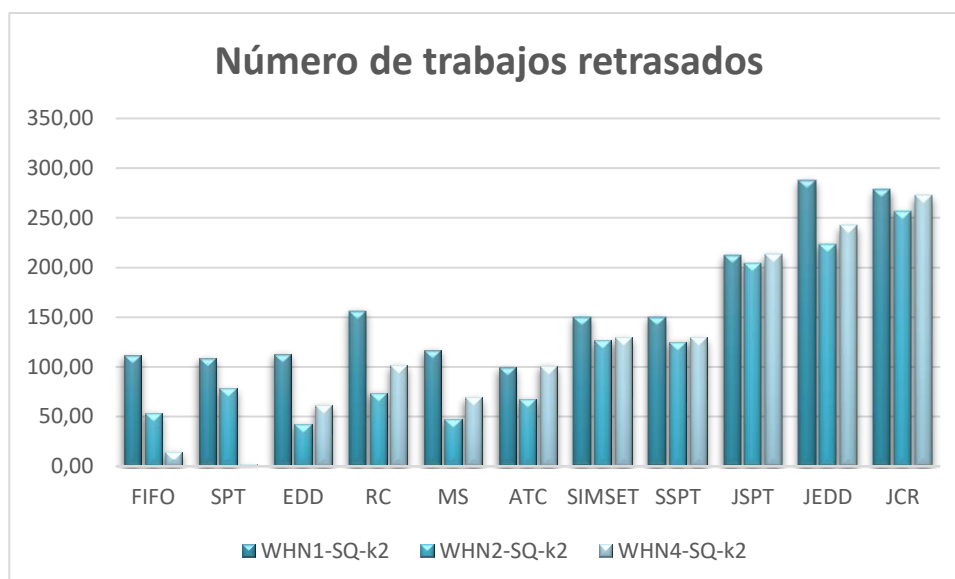
Comenzaremos primero por el número de trabajos retrasados. En este caso, y a diferencia de lo que ocurría en el Caso 2, sí que existe una predominancia clara acerca de que variante es la mejor. De las once reglas analizadas, en nueve de ellas, la centralización ha conseguido mejores resultados que sus dos competidoras. En las dos reglas restantes, FIFO y SPT, ha sido la regla del seguidor quien ha conseguido minimizar el número de trabajos retrasados.



**Figura 59: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes lógicas "WHN"**

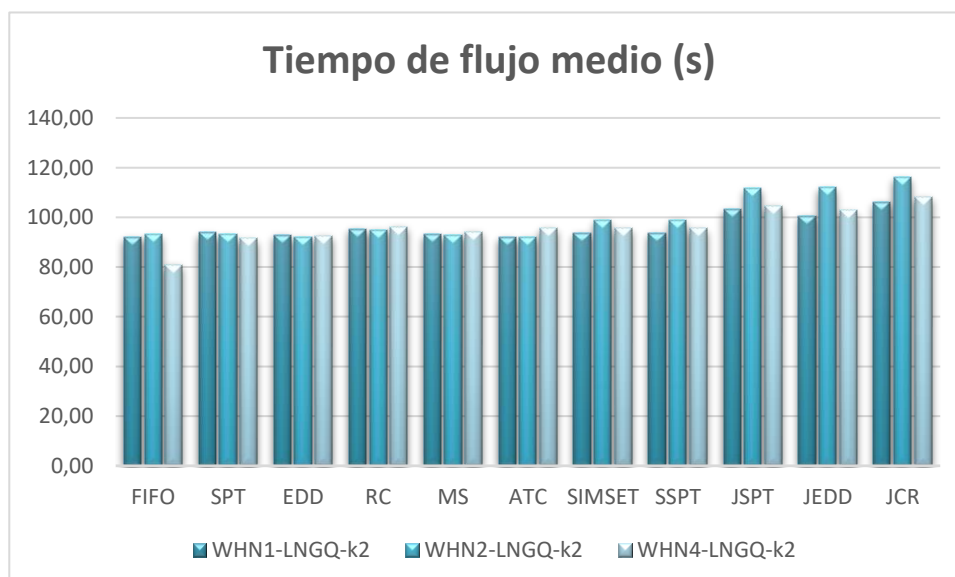
A pesar de que la variante "WHN1" ha sido la que ha conseguido mejores resultados en la mayor parte de las reglas de despacho analizadas, debemos destacar que en aquellas en las que ha destacado la variante "WHN4", la diferencia con respecto a las otras dos competidoras ha sido aplastante. En las opciones *FIFO – WHN4 – LNGQ – k2* y *SPT – WHN4 – LNGQ – k2* apenas se han encontrado trabajos entregados fuera del tiempo establecido.

Por otro lado, la descentralización no ha conseguido superar a sus competidoras en ninguna de las reglas analizadas. Esto se debe principalmente a lo que se comentaba antes de que no existen diferencias apreciables entre la aplicación de la lógica "LNGQ" o "SQ". Si nos fijamos en la siguiente figura, podemos apreciar que, si tuviésemos que llevar a cabo la lógica *Shortest Queue*, tendríamos que emplear indudablemente la descentralización, salvo en las reglas FIFO y SPT, igual que pasa cuando se acude al centro de trabajo con mayor cantidad de pedidos.



**Figura 60: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante SQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

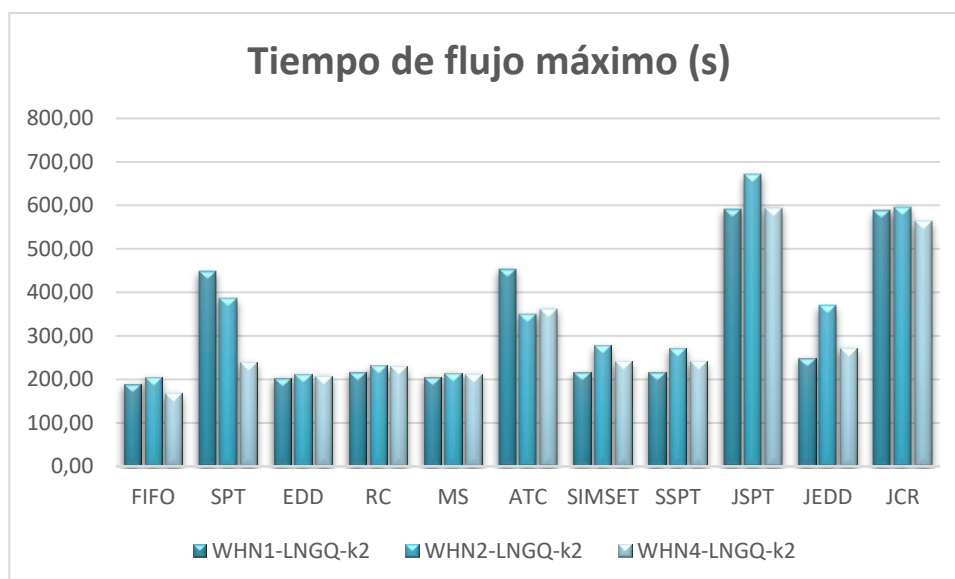
A continuación, prestaremos atención al tiempo de flujo medio. Con este parámetro la situación no es la misma. Ahora la descentralización ya consigue resultados más parejos con respecto a las otras competidoras, incluso consiguiendo los mejores resultados en las reglas EDD, RC, MS y ATC. La lógica "WHN4" destaca de nuevo en las reglas FIFO y SPT y la centralización en las 5 reglas restantes, que curiosamente son aquellas que tienen en cuenta los tiempos de cambio (SIMSET, SSPT, JSPT, JEDD y JCR).



**Figura 61: Tiempo de flujo medio en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

Como hemos podido observar, en cuanto al tiempo de flujo medio, las opciones de elección entre una lógica u otra están muy repartidas, y habría que tener en cuenta entonces que regla de despacho nos interesaría más en función de cuáles son los parámetros que más nos inquieta minimizar.

Prestemos atención ahora al tiempo de flujo máximo. Aunque se pudiese pensar que los resultados llevarían a las mismas conclusiones que con el tiempo de flujo medio, esto no ha sido así.

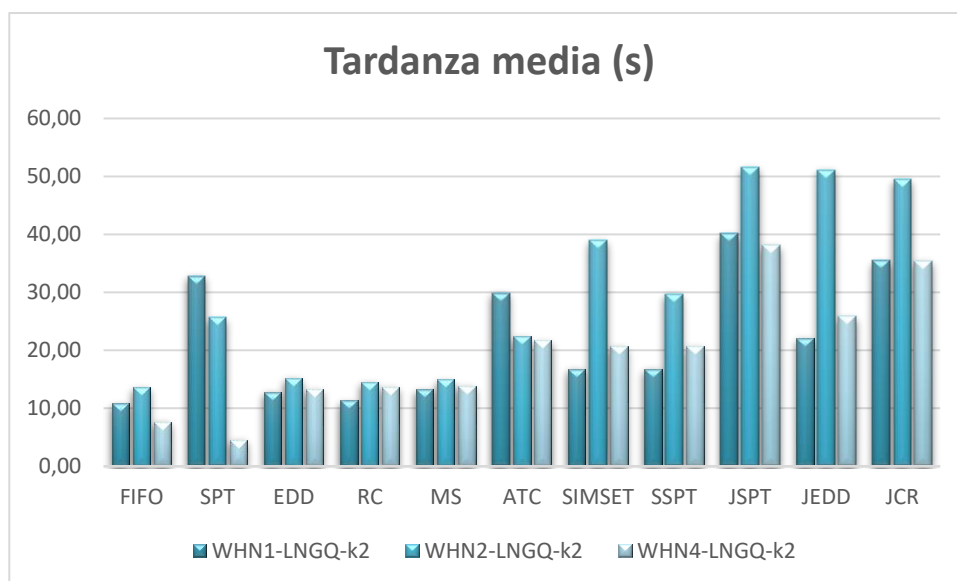


**Figura 62: Tiempo de flujo máximo en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

En la Figura 62, se representan los tiempos de flujo máximos de las distintas reglas de despacho. Con este parámetro en cuestión, la descentralización vuelve a ser la peor regla, pues sólo consigue minimizar el tiempo de flujo máximo en la regla ATC. En cuanto a la centralización, destacaremos su presencia en las reglas EDD, RC, MS, SIMSET, SSPT, JSPT y JEDD. La denominada regla del seguidor destaca en las reglas FIFO, SPT y JCR.

De nuevo es la centralización la que consigue una mejor actividad en la mayoría de las reglas analizadas. De momento, podemos decir que es una gran candidata debido a sus buenos resultados, pero todo dependerá de la regla de despacho que más nos interese. Esta predominancia hasta el momento de la centralización en los tiempos de flujo puede deberse a que un operario es elegible nada más acabar el trabajo que estaba realizando, y por tanto no tiene por qué quedarse demasiado tiempo en una máquina, impidiendo así que se almacene una gran cantidad de ítems en otra estación de trabajo.

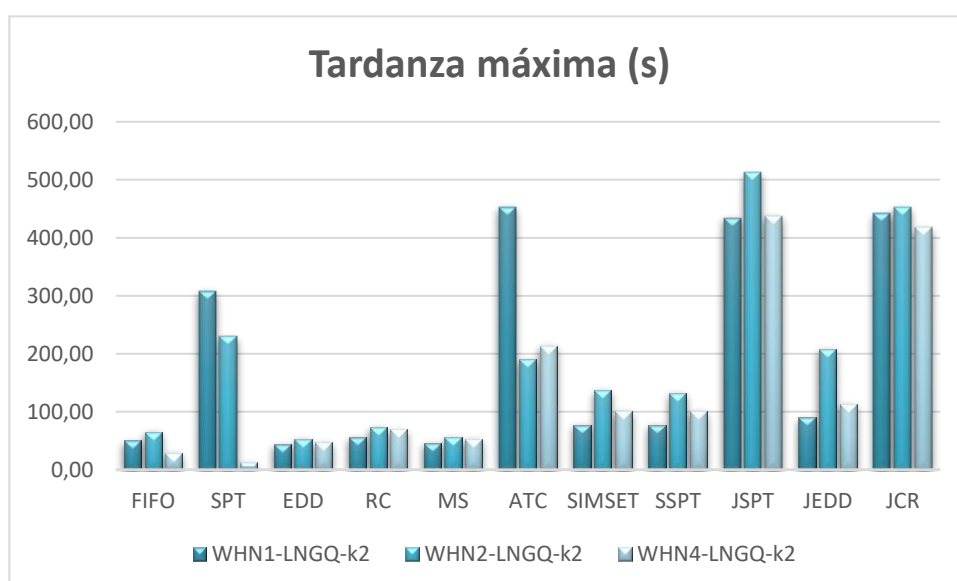
Muy cercanas a los tiempos de flujo son las tardanzas, pues son dependientes de éstos. Si tenemos tiempos de flujo elevados, mayores son las probabilidades de que nos pasemos de la fecha de entrega prevista e incurramos en penalizaciones por pedidos entregados fuera de plazo. A pesar de esto, no estamos queriendo decir que los resultados sean los mismos que en los tiempos de flujo.



**Figura 63: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

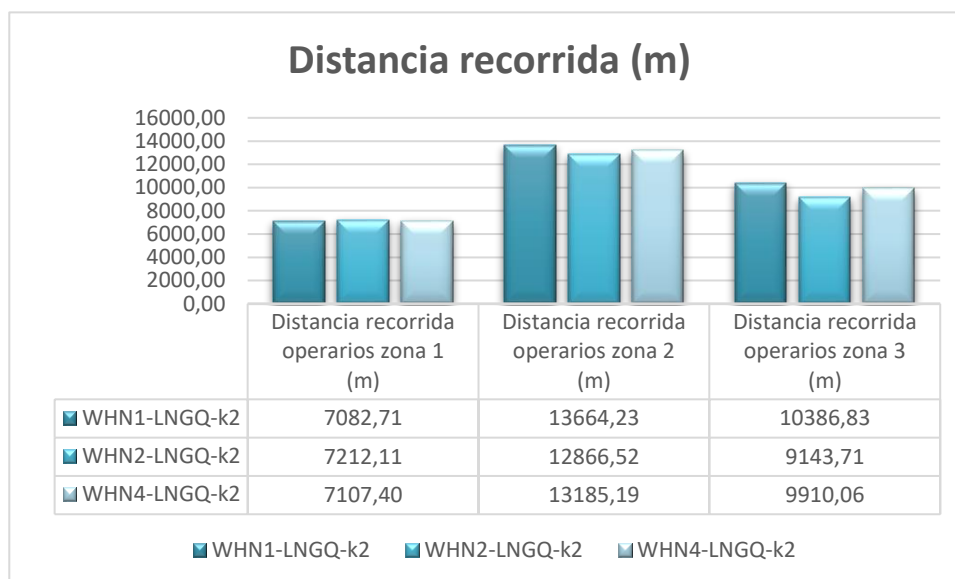
Como podemos apreciar en la Figura 63, la descentralización, vuelve a no destacar en ninguna de las reglas, más que por su mala actuación en aquellas reglas que tienen en cuenta los tiempos de cambio. De este modo, vuelve a existir un reparto entre la centralización y la regla del seguidor. Destacaremos la actuación de la variante "WHN1" en las reglas EDD, RC, MS, SIMSET, SPT, y JEDD, mientras que la regla del seguidor destaca en las cinco restantes.

Por el contrario, la descentralización vuelve a aparecer en la regla ATC cuando hablamos de tardanzas máximas, consiguiendo 26 segundos menos que la regla del seguidor e incluso 263 segundos por debajo que la centralización, la cual destaca gravemente en esta regla por su mal comportamiento. Podemos concluir con esto, y con lo visto en las anteriores figuras, que la regla ATC no es compatible con la centralización, pues aflojan siempre malos resultados en comparación con las otras dos variantes "WHN" analizadas.



**Figura 64: Tardanza máxima en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

Para finalizar el análisis de las reglas de asignación laboral, observaremos ahora el comportamiento en cuanto a la distancia recorrida por los operarios. Para ello, haremos una media de entre todas las reglas de despacho, y así poder analizar el comportamiento global de las variantes "WHN" independientemente de la regla de despacho aplicada.



**Figura 65: Distancia recorrida por operario en metros en las diferentes zonas de trabajo en función de las diferentes variantes "WHN"**

En la Figura 65 puede verse como la centralización resulta la mejor opción en la zona 1, donde tenemos más operarios, mientras que la descentralización mejora en aquellas zonas con un menor número de trabajadores.

Tras observar todos estos datos, y tras lo comentado previamente, resulta verdaderamente complejo dictaminar sentencia sobre cuál de las opciones "WHN" es la más adecuada. Además, es preciso conocer que regla de despacho se va a emplear, y la elección de dicha regla puede venir influenciada también por la elección de una u otra variante "WHN". Es por esto por lo que se llevan a cabo análisis de este estilo.

De todas formas, lo que podemos afirmar es que en una planta como la que se ha simulado en este caso, la elección de la descentralización es probablemente la peor elección, pues entre todos los parámetros analizados, y todas las reglas de despacho implicadas, pocas han sido las veces en las que ha destacado favorablemente. En el caso de que no pudiese aplicarse la lógica "LNGQ", entonces sí deberíamos plantearnos el empleo de la descentralización; pero teniendo en cuenta la primera conclusión, que afirmaba que la mejor opción era acudir a la cola más larga, entonces tenemos que pensar en aplicar la centralización o la regla del seguidor. Ambas opciones son buenas, y habría que ver que regla de despacho aplicaríamos, pues como hemos visto, en la regla ATC, por ejemplo, la centralización no funciona adecuadamente. De todos modos, con lo visto en las gráficas anteriores, los menores valores solían estar en las reglas FIFO y EDD, que siempre estaban bajo la influencia de la regla del seguidor. Esto puede darnos una pista de que probablemente, sean estas dos reglas, sean buenas candidatas para emplearse en una plana de estas características.



- Reglas de despacho.

A continuación, se hará un análisis igual al que se ha hecho en el Caso 2, mediante tablas resumen que nos den una visión global de cuál puede ser la mejor elección para nuestra planta sin tener la necesidad de ir regla a regla, variante a variante. Teniendo en cuenta que en este Caso 3 existen 132 variantes diferentes, creemos que la mejor manera de explicar los resultados es mediante las tablas siguientes. En estas tablas podrá verse que regla (regla de despacho + asignación laboral) ha sido la mejor y cuál ha sido la peor en base a la consecución de los objetivos marcados.

Para el caso de que nos interesase un análisis más regla a regla, variante a variante, podrán verse todos los resultados de las simulaciones en el Anejo I.

**Tabla 54: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 3 con un factor de rigidez  $k=2$**

Factor de rigidez $k=2$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	SPT-WHN4-LNGQ-k2	JCR-WHN4-SQ-k2
Número de trabajos retrasados	SPT-WHN4-LNGQ-k2	JEDD-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo medio	FIFO-WHN4-LNGQ-k2	JCR-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN4-LNGQ-k2	JSPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza media	SPT-WHN4-LNGQ-k2	JSPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza máxima	SPT-WHN4-LNGQ-k2	JSPT-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	JEDD-WHN2-SQ-k2	JCR-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	FIFO-WHN4-SQ-k2	EDD-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	FIFO-WHN4-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2

**Tabla 55: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 3 con un factor de rigidez  $k=3$**

Factor de rigidez $k=3$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	JCR-WHN1-SQ-k3
Número de trabajos retrasados	SPT-WHN4-SQ-k3 SPT-WHN4-LNGQ-k3	JCR-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo medio	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	JCR-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	JSPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza media	SPT-WHN4-SQ-k3	JSPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza máxima	SPT-WHN4-SQ-k3	JCR-WHN1-SQ-k3

Con un factor de rigidez igual a 2, podemos observar la predominancia de las reglas *SPT – WHN4 – LNGQ – k2* y *FIFO – WHN4 – LNGQ – k2*. Una de ellas siempre ocupa la primera posición salvo en la distancia recorrida por operario en la zona 1. A la hora de llegar a una decisión debe tenerse en cuenta el aspecto que más nos interese minimizar. Si preferes minimizar el número de trabajos entregados fuera de plazo y las tardanzas, deberá emplearse la regla *SPT – WHN4 – LNGQ – k2*, mientras que si nos interesa más reducir los tiempos de flujo y las distancias recorridas por los operarios, nos basta con aplicar la regla *FIFO – WHN4 – LNGQ – k2*, con la ventaja adicional de que es una regla más sencilla que la variante que ordena los pedidos en función de su

tiempo de procesamiento. Lo que podemos concluir también es el empleo de la regla del seguidor, pues en todos los parámetros analizados, se emplea la variante "WHN4". Además, como hemos concluido previamente, la lógica "LNGQ" funciona mejor que acudir a la estación de trabajo con menor carga de pedidos.

Por otra parte, debemos destacar los malos resultados aportados por las reglas de despacho *JCR* y *JSPT*, que, tras lo leído en la revisión bibliográfica, se esperaba que obtuviesen mejores resultados. Podemos decir que el hecho de que busquemos coger un producto que sea del mismo tipo que el anterior, reduciendo de esta manera las pérdidas de tiempo dedicadas al *setup time*, no implica mejores resultados. Pues al intentar coger siempre productos del mismo tipo, puede que descuidemos ciertos productos que lleven mucho tiempo esperando, produciendo grandes retrasos e incurriendo en mayores penalizaciones.

Si contamos con una mayor holgura con respecto a los plazos de vencimiento, en nuestro caso, con el factor de rigidez  $k = 3$ , los resultados siguen siendo prácticamente los mismos. El dominio de las reglas de despacho *SPT* y *FIFO* es claro, por lo que se recomienda su uso, igual que en con un factor de rigidez más restrictivo. Del mismo modo que ocurre con un factor de rigidez  $k = 2$ , las reglas *JCR* y *JSPT* se comportan como las peores.

Antes de finalizar, mencionaremos también, que de entre las reglas que tienen en cuenta los tiempos de cambio, las mejores han sido siempre las reglas *SIMSET* y *SSPT*. Por el contrario, aquellas reglas que pretenden seleccionar un pedido que sea del mismo tipo que el anterior, y de lo contrario aplicar alguna de las reglas básicas, no funcionan bien en una planta como esta, y no se recomienda su uso si se busca conseguir buenos resultados en alguno de los nueve parámetros analizados en este caso.

Por último, mencionaremos los factores de utilización de nuestra planta.

**Tabla 56: Factores de utilización de las diferentes máquinas empleadas en el Caso 3**

Ocupación M1	32-37%
Ocupación M2	14-16%
Ocupación M3	14-16%
Ocupación M4	14-16%
Ocupación M5	10-11%
Ocupación M6	10-11%
Ocupación M7	24%
Ocupación M8	28-30%
Ocupación M9	27-30%
Ocupación M10	40%

Como puede verse en la tabla anterior, los porcentajes de utilización están dentro de un intervalo. Esto se debe a la aleatoriedad de los pedidos que pueden llegar dependiendo de las simulaciones, y por las diferencias encontradas con las reglas que tienen en cuenta los tiempos de cambio, que escogen una máquina u otra en función del tipo de trabajo anterior que se ha procesado en una máquina. De todas formas, podemos comprobar que los porcentajes de utilización son muy pequeños, y esto se debe a que el operario es un recurso limitado. Esto implica que, si todos los operadores de una zona están trabajando, hay una máquina que está parada, disminuyendo de esta forma su factor de utilización. Si tuviésemos el mismo número de operarios que de

máquinas, los factores de utilización serían más elevados, pero tener el mismo número de trabajadores que de estaciones de trabajo no tendría sentido en un análisis como este, pues entonces las reglas de asignación laboral no tendrían cabida ya que los empleados estarían siempre en la misma estación.

En cuanto a los factores de utilización de los operarios, también se encuentran un intervalo por la aleatoriedad empleada en los tiempos de procesamiento y en los tiempos de cambio.

**Tabla 57: Factores de utilización de las zonas de trabajo en el caso 3**

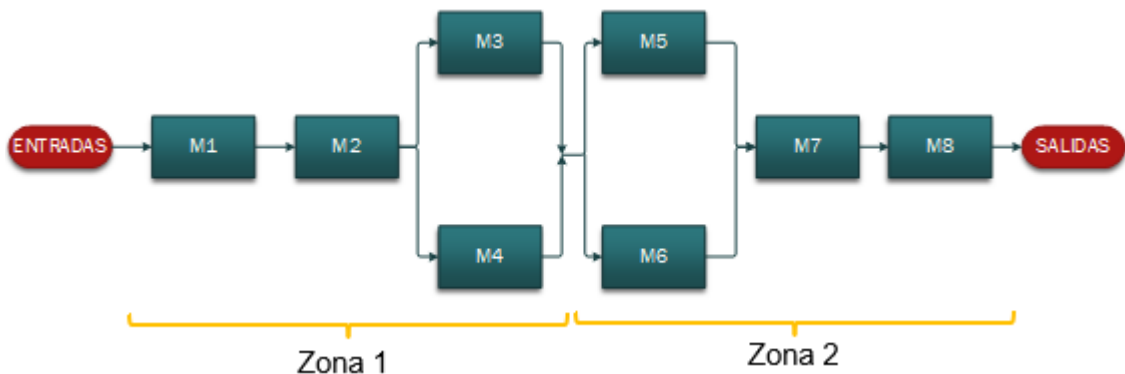
Utilización operadores zona 1	41-44%
Utilización operadores zona 2	43-46%
Utilización operadores zona 3	64-66%

Como podemos comprobar, los factores de utilización no son excesivamente altos, si no que aproximadamente se encuentran trabajando la mitad del tiempo. Este porcentaje podría aumentarse si disminuimos el tiempo entre llegadas, pero si sucede esto, se aumentarían los trabajos retrasados.

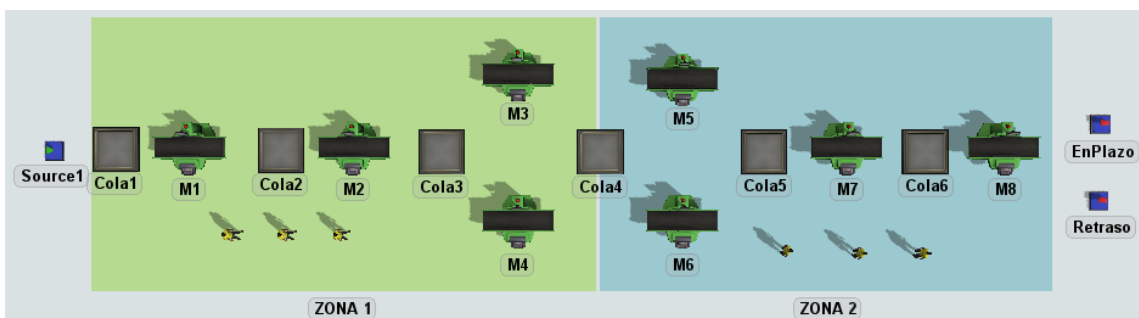
### 5.2.2 Caso 4

Para finalizar la experimentación de este Trabajo Final de Grado, se modelará un *Job Shop Flexible* con el objetivo de tener un trabajo más variado y poder analizar diferentes tipos de producción.

La planta contará con ocho máquinas repartidas en dos zonas de trabajo, tal y como se ve en la siguiente imagen:



**Figura 66: Layout del proceso del Caso 4**



**Figura 67: Layout del Caso 4 en FlexSim sin conexiones**

Las hipótesis y restricciones aplicadas al modelo son:

- Cada máquina puede procesar un único trabajo al mismo tiempo.
- La máquina necesita un operario para poder procesar un trabajo.
- Un trabajo no puede abandonar una máquina hasta que su procesamiento haya terminado.
- Los tiempos de procesamiento seguirán una distribución logarítmica normal.
- Los tiempos de cambio seguirán una distribución logarítmica normal.
- Los tiempos de cambio serán iguales en cada máquina, pero dependerán de la secuencia de trabajos siguiendo la siguiente tabla:

**Tabla 58: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de cambio en el caso 3**

	Tiempos de cambio				
	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 4	Trabajo 5
Trabajo 1	0	$\mu=1,5; \sigma=1,5$	$\mu=2,5; \sigma=1,2$	$\mu=3; \sigma=1,1$	$\mu=1; \sigma=1$
Trabajo 2	$\mu=2; \sigma=1$	0	$\mu=3; \sigma=2$	$\mu=3; \sigma=1,7$	$\mu=1; \sigma=1$
Trabajo 3	$\mu=1,5; \sigma=3$	$\mu=2; \sigma=2$	0	$\mu=2; \sigma=2$	$\mu=2; \sigma=3$
Trabajo 4	$\mu=3; \sigma=1,5$	$\mu=3; \sigma=0,5$	$\mu=1,3; \sigma=1,3$	0	$\mu=3; \sigma=2$
Trabajo 5	$\mu=1,2; \sigma=2$	$\mu=1,6; \sigma=1$	$\mu=1; \sigma=4$	$\mu=3,5; \sigma=3$	0

- Cada tipo de trabajo tiene que cumplir con un tiempo máximo de finalización.
- El número de operarios variará para encontrar el estado óptimo.
- Un operario puede escoger una máquina disponible dentro de su zona de aplicación, pero no puede ir a otra zona. De este modo impedimos que un operario recorra largas distancias empeorando los resultados de la simulación.
- La llegada de trabajos al taller sigue una distribución exponencial de media veinte segundos.
- La llegada de los distintos tipos de trabajos es equiprobable.
- Se llevarán a cabo cien simulaciones con un intervalo de confianza del 90% para cada regla para aumentar la veracidad de los resultados.
- Se simulará un intervalo de tiempo de 28800 segundos, correspondientes a ocho horas, como en un turno de trabajo.
- Se analizarán las siguientes reglas de despacho:
  - FIFO
  - SPT
  - EDD
  - RC
  - MS
  - ATC
  - SIMSET (SST)
  - SSPT
  - JSPT
  - JEDD
  - JCR

- Se analizarán las siguientes reglas de asignación laboral:
  - En cuanto a 'cuándo moverse':
    - WHN 1
    - WHN 2
    - WHN 4
  - En cuanto a 'dónde moverse':
    - SQ
    - LNGQ
- Para nombrar las reglas y que no haya equivocaciones se seguirá un patrón:

*Regla de despacho – Regla 'cuándo moverse' – Regla 'dónde moverse'  
 – Factor estanqueidad*

A continuación, se adjunta una tabla con las medias y desviaciones empleadas para calcular los tiempos de procesamiento en las diferentes etapas del proceso.

**Tabla 59: Medias y desviaciones típicas de los tiempos de procesamiento dependientes de la máquina y del tipo de trabajo en el Caso 4**

	M1	M2	M3M4	M5M6	M7	M8
Trabajo 1	$\mu = 5; \sigma = 3$	-	$\mu = 7; \sigma = 1$	-	$\mu = 6; \sigma = 3$	$\mu = 10; \sigma = 3$
Trabajo 2	-	$\mu = 8; \sigma = 3$	$\mu = 8; \sigma = 3$	$\mu = 3; \sigma = 2$	-	$\mu = 10; \sigma = 3$
Trabajo 3	$\mu = 6; \sigma = 2$	$\mu = 6; \sigma = 3$	$\mu = 6; \sigma = 3$	-	$\mu = 7; \sigma = 1$	$\mu = 10; \sigma = 3$
Trabajo 4	-	-	$\mu = 10; \sigma = 3$	$\mu = 1; \sigma = 0.5$	$\mu = 2; \sigma = 2$	$\mu = 10; \sigma = 3$
Trabajo 5	$\mu = 8; \sigma = 2$	$\mu = 8; \sigma = 2$	$\mu = 6; \sigma = 3$	$\mu=4; \sigma=1$	-	$\mu = 10; \sigma = 3$

Para poder estimar la fecha de entrega, necesitamos el tiempo de procesamiento total. Si realizásemos numerosas simulaciones e hiciésemos un promedio, el tiempo de procesamiento total sería igual a la suma de las medias de la tabla anterior.

Gracias la experimentación, hemos tenido que determinar que debe aplicarse un factor de 1.5 al tiempo de procesamiento total para que la planta pueda cumplir un poco mejor con los plazos. De no aplicar este factor, habría más trabajos retrasados que entregados a tiempo. Tras aplicar esto, se adjuntan las tablas de los tiempos de procesamiento totales modificados y los tiempos de finalización.

**Tabla 60: Tiempos de procesamiento total modificados en el Caso 4**

Tiempo de procesamiento total	
Trabajo 1	42
Trabajo 2	44
Trabajo 3	53
Trabajo 4	35
Trabajo 5	54

**Tabla 61: Tiempos máximos de finalización en el Caso 4**

	Tiempo máximo de finalización	
	$k = 2$	$k = 3$
Trabajo 1	100	150
Trabajo 2	105	158
Trabajo 3	124	186
Trabajo 4	90	134
Trabajo 5	126	189

A continuación, calcularemos el número de operarios necesarios mediante la regla *FIFO – WHN1 – SQ – k2* y mantendremos el número de trabajadores resultante para el resto de las reglas y variantes. Simularemos nueve escenarios modificando el número de operarios en cada zona, siendo el mínimo número de trabajadores igual a 1 y el máximo igual a 3. De este modo, los empleados siempre serán un recurso limitado.

**Tabla 62: Número de trabajos retrasados en función del número de operarios por zona de trabajo**

Escenario	Zona	Nº Operarios	Trabajos retrasados
1	1	1	708,5
	2	1	
2	1	1	717,3
	2	2	
3	1	1	716,7
	2	3	
4	1	2	738,3
	2	1	
5	1	2	458,2
	2	2	
6	1	2	429,7
	2	3	
7	1	3	739,6
	2	1	
8	1	3	387,0
	2	2	
9	1	3	350,2
	2	3	

De nuevo, y como resulta evidente, el escenario que minimiza el número de trabajos retrasados es el que tiene un mayor número de operarios. Por lo tanto, emplearemos el escenario número nueve con tres trabajadores en cada zona.

### 5.2.2.1 Cálculo de la constante $K$

A continuación, ya podemos calcular los diferentes valores que puede tomar la constante  $K$  en cada una de las doce variantes empleadas para la regla  $ATC$ .

- $ATC - WHN1 - SQ - k2$

Tras emplear el optimizador del *software* se nos proporcionaron 4 posibles valores para la constante,  $K = 1, K = 13.25, K = 25.5$  y  $K = 50$ . Para poder escoger entre un valor u otro, de nuevo, recurrimos a la simulación.

**Tabla 63: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante  $K$  en la regla  $ATC-WHN1-SQ-k2$**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	373,15	40,4700
K=13,25	365,60	39,3665
K=25,50	364,85	40,0195
K=50,00	367,35	39,5215

Tras ver y analizar los resultados de la tabla anterior, nos quedamos con la segunda opción ( $K = 13.25$ ) ya que consigue la menor tardanza media, mientras que, en el número de trabajos retrasados, no consigue ni un trabajo más que la siguiente opción con menor número de trabajos entregados fuera de plazo.

- $ATC - WHN1 - LNGQ - k2$

Como los datos proporcionados por *FlexSim* son los mismos, volvemos a aplicar la simulación para obtener un veredicto.

**Tabla 64: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante  $K$  en la regla  $ATC-WHN1-LNGQ-k2$**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	236,80	21,7725
K=13,25	241,65	21,6540
K=25,50	242,00	21,5680
K=50,00	239,85	21,8185

Tras ver la tabla anterior, nos quedamos con la primera opción ( $K = 1.00$ ) puesto que, el número de trabajos retrasados compensa las décimas que pueda tener por encima en cuanto a tardanza.

- $ATC - WHN1 - SQ - k3$

De nuevo, el *Optimizer* nos devuelve los mismos cuatro valores que cuando el factor de rigidez era igual a dos. En la siguiente figura pueden verse las cuatro soluciones mostradas por el *software*.

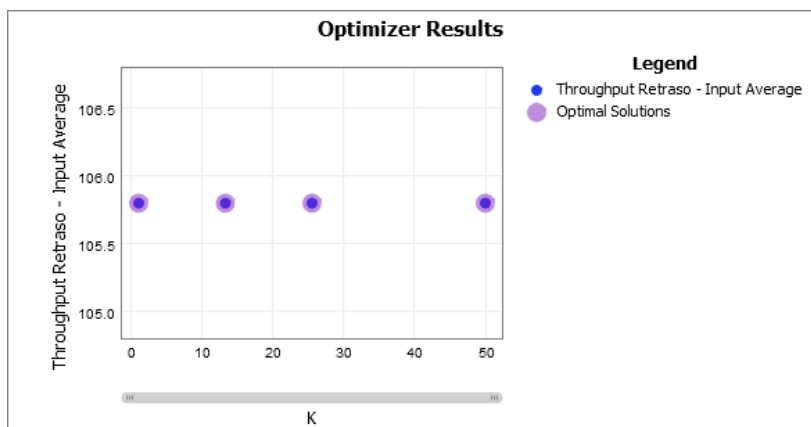


Figura 68: Valores de K que minimizan el número de trabajos retrasados en la regla ATC-WHN1-SQ-k3

Como podemos ver en la figura anterior, parece que los cuatro valores de  $K$  proporcionan el mismo número de trabajos retrasados, pero si empleamos la simulación y aumentamos el número de réplicas podremos comprobar que esto no es así.

Tabla 65: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN1-SQ-k3

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	105,75	36,7390
K=13,25	102,15	36,2150
K=25,50	102,80	35,8565
K=50,00	101,30	35,2695

La elección escogida es claramente la última opción, pues con  $K = 50$  se consiguen minimizar ambos parámetros.

- $ATC - WHN1 - LNGQ - k3$

A continuación, aunque hayamos modificado la lógica "WHR", las opciones proporcionadas siguen siendo las mismas.

Tabla 66: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN1-LNGQ-k3

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	23,80	16,4830
K=13,25	21,65	17,6450
K=25,50	21,30	17,5550
K=50,00	21,40	17,8085

Esta vez, nos quedaremos con la tercera opción ( $K = 25.50$ ), pues si multiplicamos el número de trabajos retrasados por la tardanza media, el menor valor obtenido se obtiene con esta opción.



- $ATC - WHN2 - SQ - k2$

De entre los cuatro valores proporcionados, escogemos la primera opción porque la “tardanza media total” es menor con  $K = 1.00$ .

**Tabla 67: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN2-SQ-k2**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	223,75	21,877
K=13,25	225,90	21,928
K=25,50	223,55	21,940
K=50,00	224,60	21,967

- $ATC - WHN2 - LNGQ - k2$

De nuevo el mejor valor es la primera opción, pues a pesar de tener cinco centésimas más en la tardanza media, es capaz de obtener casi 3 trabajos retrasados menos.

**Tabla 68: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k2**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	223,55	21,6835
K=13,25	226,40	21,6335
K=25,50	225,20	22,1785
K=50,00	223,50	21,4660

- $ATC - WHN2 - SQ - k3$

Del mismo modo que pasaba con un factor de rigidez más restrictivo, el valor escogido es  $K = 1.00$ , ya que consigue minimizar tanto la tardanza como la cantidad de pedidos entregados con retraso.

**Tabla 69: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN2-SQ-k3**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	21,30	17,3065
K=13,25	22,55	18,2905
K=25,50	21,85	17,6540
K=50,00	21,55	17,8445

- $ATC - WHN2 - LNGQ - k3$

En esta variante, seguimos con el dominio de  $K = 1.00$ , pues a pesar de tener el mismo número de trabajos retrasados que la segunda opción, consigue dos segundos menos de tardanza media. Otra posible opción sería  $K = 25.50$ , pues consigue unas décimas menos en cuanto a los pedidos retrasados, pero la tardanza es mayor.

**Tabla 70: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN2-LNGQ-k3**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media
K=1,00	21,9	17,2455
K=13,25	21,9	19,2855
K=25,50	21,6	18,074
K=50,00	22,15	18,2675

- $ATC - WHN4 - SQ - k2$

Aunque hayamos cambiado la variante "WHN", el optimizador sigue mostrando los mismos cuatro resultados. Esta vez, en la tabla podremos ver una columna más con valores en verde que representan el concepto definido en el caso anterior de "tardanza media total".

**Tabla 71: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN4-SQ-k2**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media	
K=1,00	279,90	24,91	6972,03
K=13,25	279,65	24,82	6940,07
K=25,50	282,65	24,55	6938,49
K=50,00	279,15	24,91	6953,07

Gracias a esa nueva columna, podemos determinar que la mejor opción es  $K = 25.50$ .

- $ATC - WHN4 - LNGQ - k2$

En esta ocasión, y sirviéndonos de la columna añadida, el valor de la constante empleado es  $K = 50.00$ .

**Tabla 72: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k2**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media	
K=1,00	234,55	21,45	5030,63
K=13,25	233,15	21,65	5047,93
K=25,50	235,10	21,24	4994,46
K=50,00	234,20	21,26	4978,62

- $ATC - WHN4 - SQ - k3$

Nos servimos de nuevo de la “tardanza media total” para determinar cuál es la mejor elección. Gracias a esto, podemos escoger el valor de  $K = 13.25$ .

**Tabla 73: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN4-SQ-k3**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media	
K=1,00	35,55	19,96	709,70
K=13,25	34,15	20,20	689,98
K=25,50	34,40	20,69	711,82
K=50,00	33,50	21,34	714,99

- $ATC - WHN4 - LNGQ - k3$

Como podemos comprobar, la columna adicional nos sirve para poder tomar una decisión más adecuada en situaciones como estas, en las que las diferencias entre la primera y la segunda opción son muy difíciles de apreciar, puesto que mientras una es capaz de disminuir el número de trabajos retrasados, la otra opción disminuye la tardanza. Gracias a la nueva columna podemos determinar que el valor empleado será  $K = 1$ , aunque aclararemos que las diferencias entre emplear un valor u otro serían casi inapreciables.

**Tabla 74: Número de trabajos retrasados y tardanza media para distintos valores de la constante K en la regla ATC-WHN4-LNGQ-k3**

	Nº trabajos retrasados	Tardanza media	
K=1,00	22,30	17,54	391,11
K=13,25	21,75	18,02	391,95
K=25,50	21,75	18,31	398,22
K=50,00	22,05	18,19	400,98

A continuación, y a modo resumen, se adjunta una tabla con todos los valores que tomará la constante  $K$  en cada variante de la regla  $ATC$ .

**Tabla 75: Tabla resumen con todos los posibles valores de la constante K en función de la variante ATC escogida en el caso 4**

Regla	Valor de $K$
ATC-WHN1-SQ-k2	13,25
ATC-WHN1-LNGQ-k2	1,00
ATC-WHN1-SQ-k3	50,00
ATC-WHN1-LNGQ-k3	25,50
ATC-WHN2-SQ-k2	1,00
ATC-WHN2-LNGQ-k2	1,00
ATC-WHN2-SQ-k3	1,00
ATC-WHN2-LNGQ-k3	1,00
ATC-WHN4-SQ-k2	25,50
ATC-WHN4-LNGQ-k2	50,00
ATC-WHN4-SQ-k3	13,25
ATC-WHN4-LNGQ-k3	1,00

#### 5.2.2.2 Simulación del modelo

A continuación, se procede a la explicación de los resultados de este último caso analizado mediante el *software FlexSim*.

De nuevo, e igual que en el Caso 3, se han realizado un total de 132 simulaciones y 100 réplicas de cada una. Primero analizaremos las diferencias encontradas entre las reglas de asignación laboral y las diferencias aportadas por el factor de rigidez. Una vez hecho esto, se analizarán las reglas de asignación de prioridades para intentar determinar que elección es la más adecuada para un *Job Shop* como el que se está analizando.

- Reglas de asignación laboral y factor de rigidez

Si aumentamos la holgura con respecto a la fecha de vencimiento, el número de retrasados será menor, pues el intervalo de tiempo disponible para el proceso es mayor. Esto es lo que ocurre al aumentar el factor de rigidez de  $k = 2$  a  $k = 3$ . Si aumentásemos más dicho valor, los resultados en cuanto a trabajos a tiempo, serían mejores.

Para demostrar esto, a continuación, pueden verse dos figuras correspondientes a las variantes *WHN1 – SQ* y *WHN1 – LNGQ* en las que se representan el número de trabajos retrasados para los dos valores del factor de rigidez.

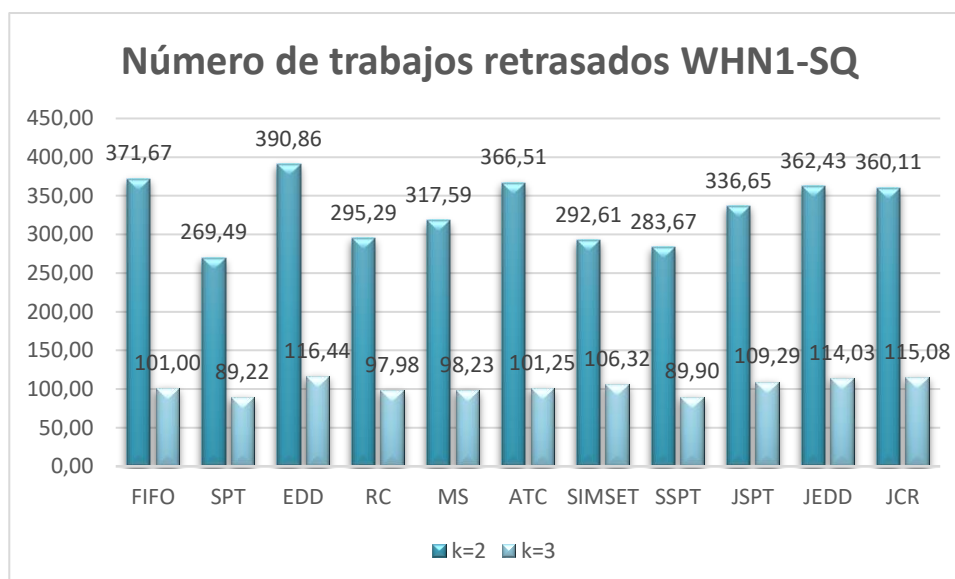


Figura 69: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-SQ modificando los valores del factor de rigidez  $k$

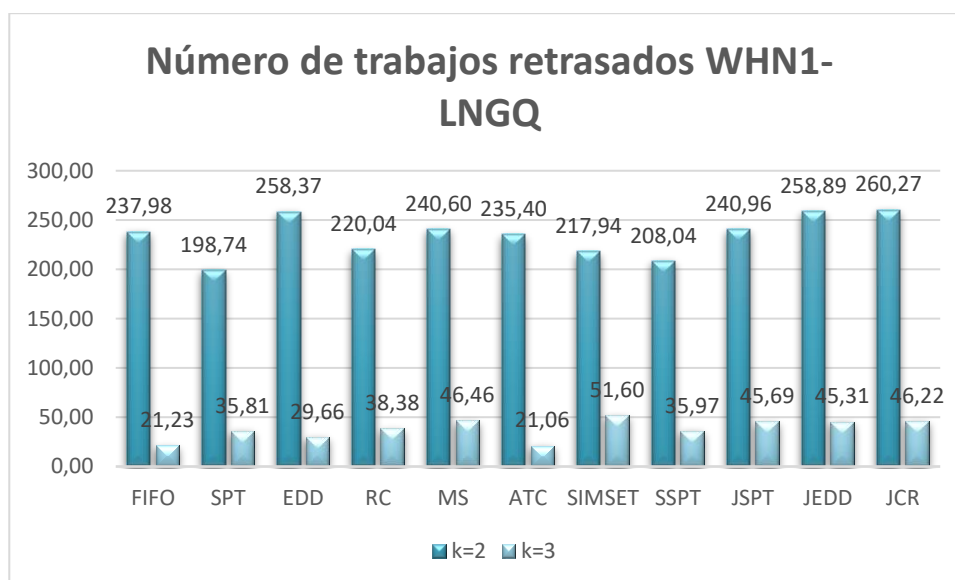
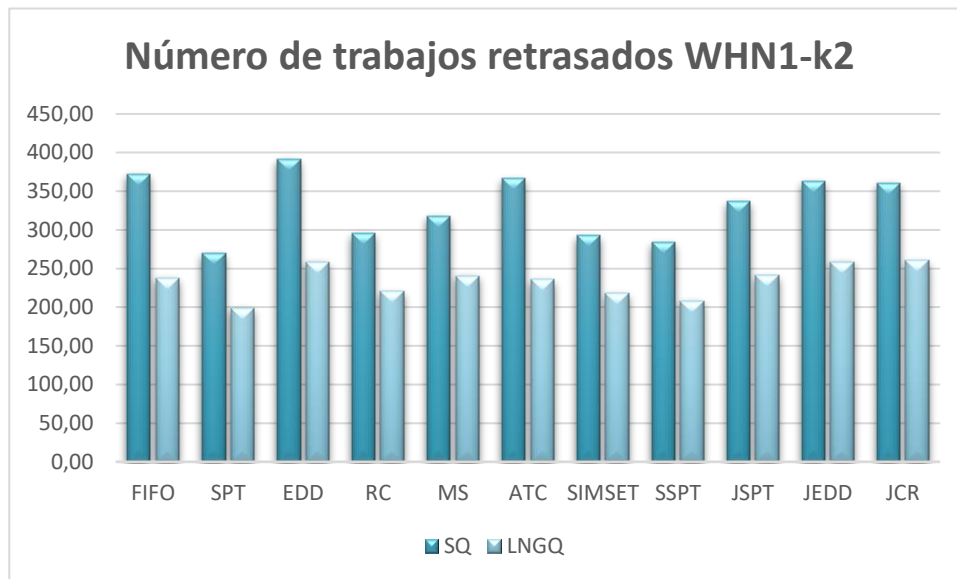


Figura 70: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-LNGQ modificando los valores del factor de rigidez  $k$

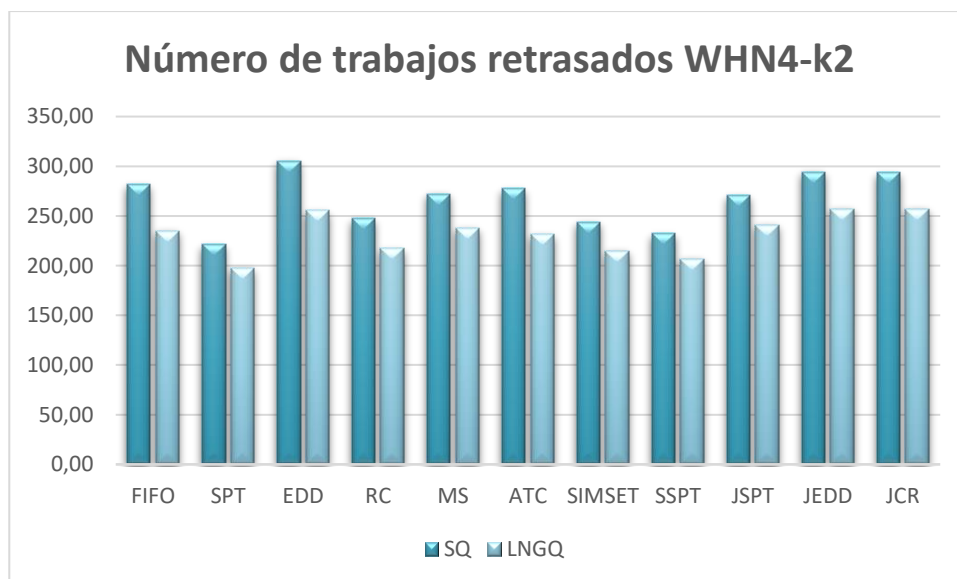
Una vez demostrada la gran importancia de establecer un factor de rigidez adecuado, nos centraremos en las reglas de asignación laboral. Primero observaremos el comportamiento de las reglas "WHR" y después entraremos más en detalle con las reglas "WHN".

A pesar de que nos centremos en la lógica '*dónde moverse*', debemos tener en cuenta la lógica '*cuándo moverse*', pues van a funcionar en conjunto. Con esto nos referimos a que las reglas "WHR" no funcionan de igual manera con todas las variantes "WHN". La lógica "LNGQ" consigue mejores resultados que su competidora "SQ" en las variantes "WHN1" y "WHN4", como puede verse en la Figura 71 y en la Figura 72. Pero esto no sucede así con la descentralización. En la Figura 73 podemos ver como apenas existen diferencias entre acudir a la cola más corta o acudir a aquella con una mayor cantidad de pedidos. De hecho, con la descentralización, puede darse el caso de que acudir a la cola con menor cantidad de ítems presente mejores resultados que acudiendo a la cola más larga. Para intentar apreciar mejor las diferencias, dicha figura cuenta con una tabla con los resultados.

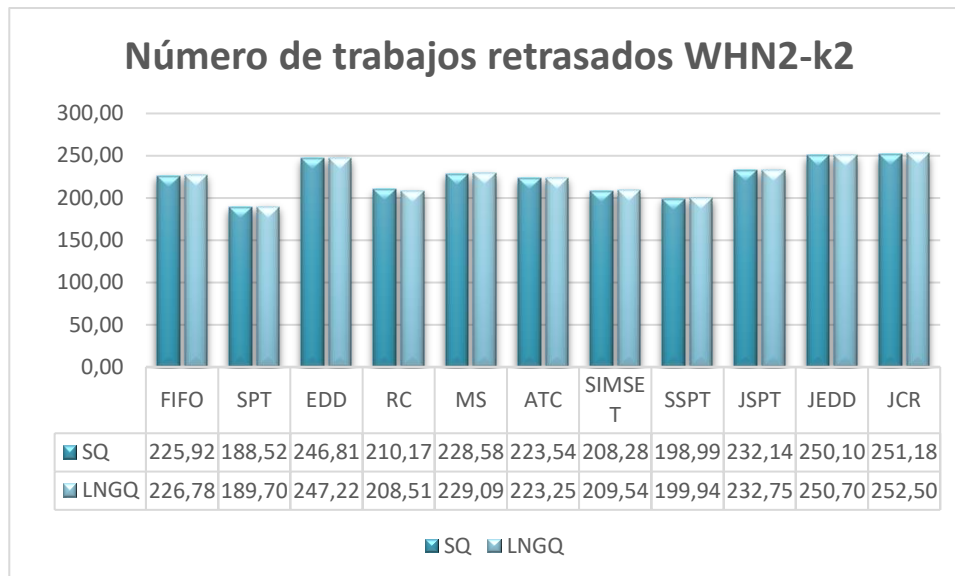
Esta conclusión que acabamos de explicar, es común al resto de casos que hemos analizado en los que se han tenido en cuenta los trabajadores.



**Figura 71: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN1-k2 para las diferentes variantes "WHR"**

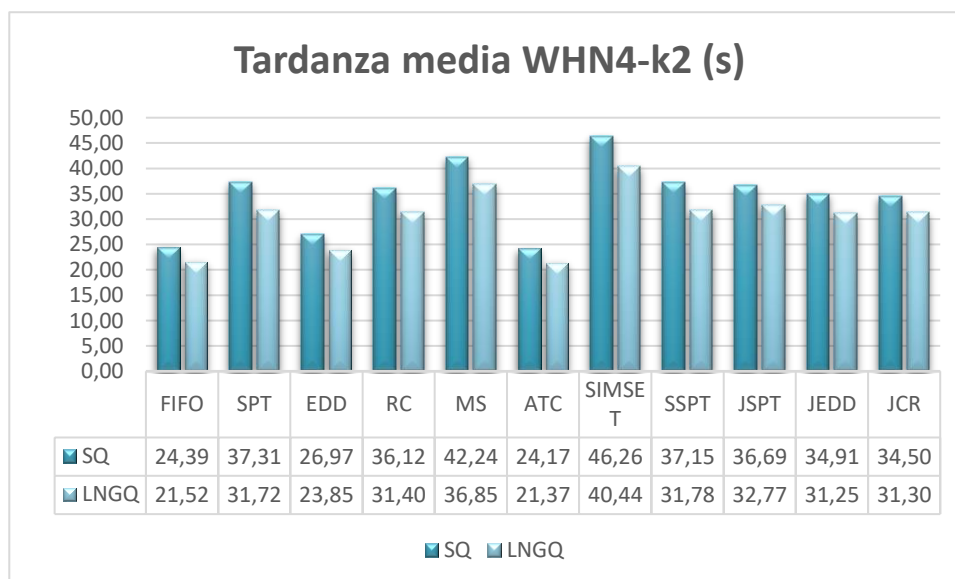


**Figura 72: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes variantes "WHR"**



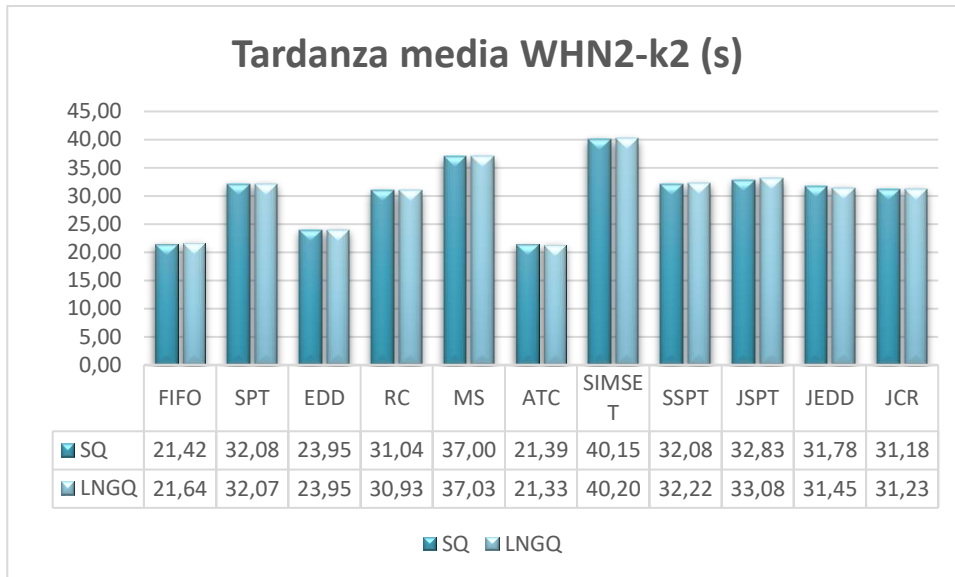
**Figura 73: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN2-k2 para las diferentes variantes "WHR"**

De momento, solo se ha mostrado el efecto positivo de acudir a la cola más larga en cuanto a minimizar trabajos retrasados se refiere, pero este efecto se produce en el resto de parámetros. Prestemos atención a la tardanza media, representada en la variante  $WHN4 - k2$ .



**Figura 74: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN4-k2 para las diferentes variantes "WHR"**

De nuevo, acudir a la cola más larga implica reducir el parámetro a considerar. Las diferencias entre una lógica u otra pueden variar desde los tres hasta los siete segundos. Si queremos volver a comprobar de nuevo, que pasa con la descentralización, tenemos la Figura 75 para observar que las diferencias siguen siendo casi inapreciables.



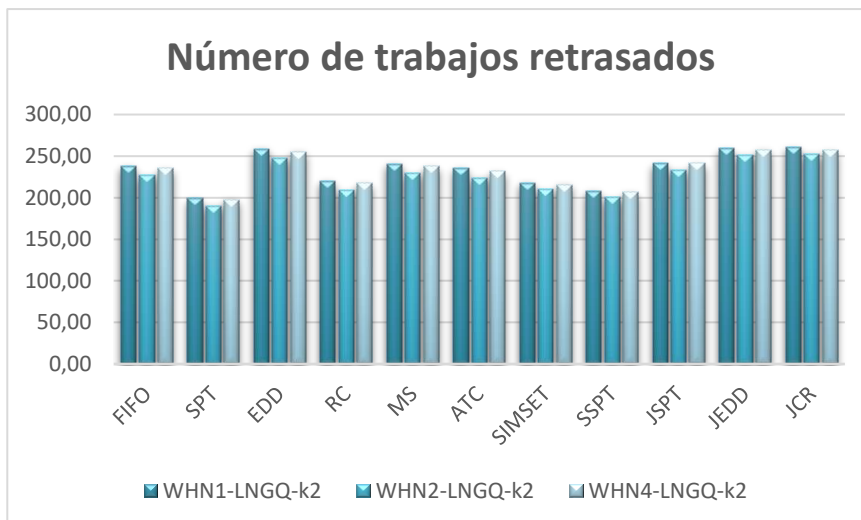
**Figura 75: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante WHN2-k2 para las diferentes variantes "WHR"**

A pesar de que, con la descentralización, acudir a la cola más larga no presenta mejorías significativas respecto a acudir a la cola más corta, emplear la lógica "LNGQ" sigue siendo la mejor opción puesto que sí presenta mejoría con el uso de la centralización y con la regla del seguidor.

Una vez determinada que lógica "WHR" debemos aplicar, debemos determinar que variante del tipo "WHN" se comporta más adecuadamente en base a minimizar los parámetros analizados. Para llegar a esta conclusión, se analizarán los diferentes factores evaluados (número de trabajos retrasados, tiempos de flujo, tardanzas y distancias recorridas por los trabajadores) siempre bajo la influencia de la variante "LNGQ", puesto que hemos determinado que es la mejor opción. Además, también aplicaremos para este análisis el factor de rigidez igual a dos, puesto que, de este modo, como los resultados son más desfavorables, pueden apreciarse mejor las diferencias.

Con el siguiente análisis, lo que vamos a determinar más en profundidad, es como se comportan las diferentes reglas de despacho, con las diferentes reglas "WHN".

En primer lugar, prestaremos atención al número de trabajos retrasados.

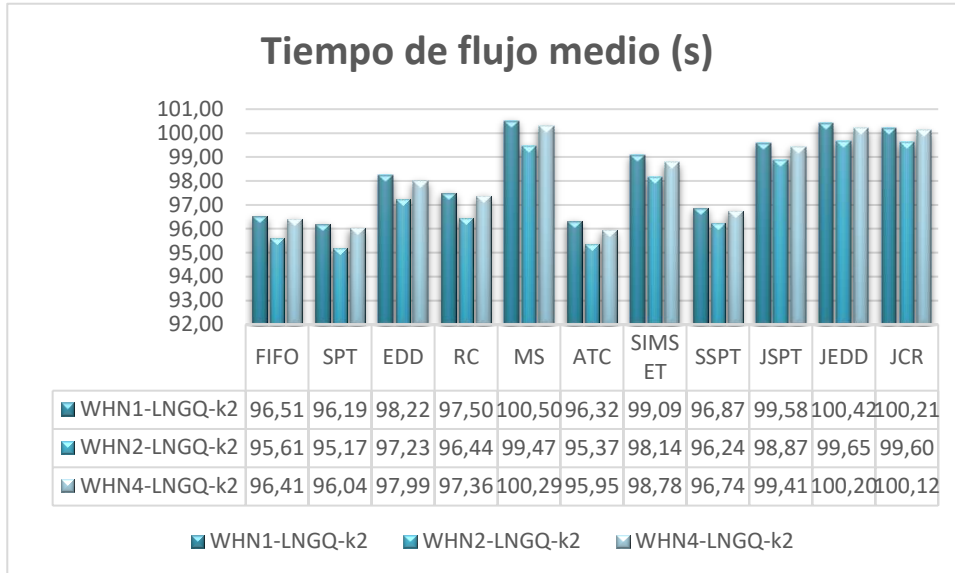


**Figura 76: Número de trabajos retrasados en función de la regla de despacho aplicada con la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**



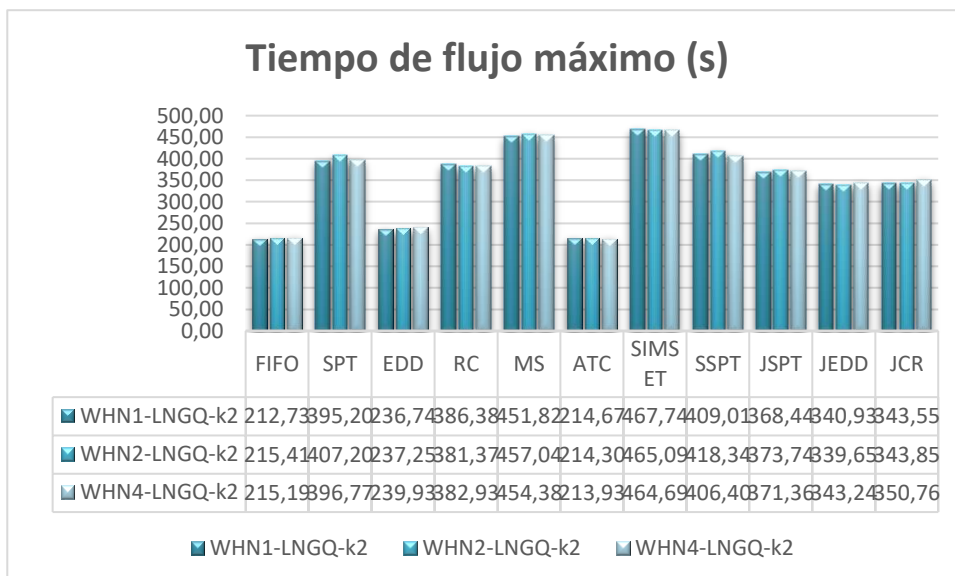
En la figura anterior, podemos observar cómo, en un *Job Shop* como este, si lo que se pretende es reducir el número de trabajos retrasados, debemos aplicar la descentralización, pues es la variante que mejor se comporta en las once reglas de despacho analizadas.

A continuación, nos fijaremos en el tiempo de flujo medio.



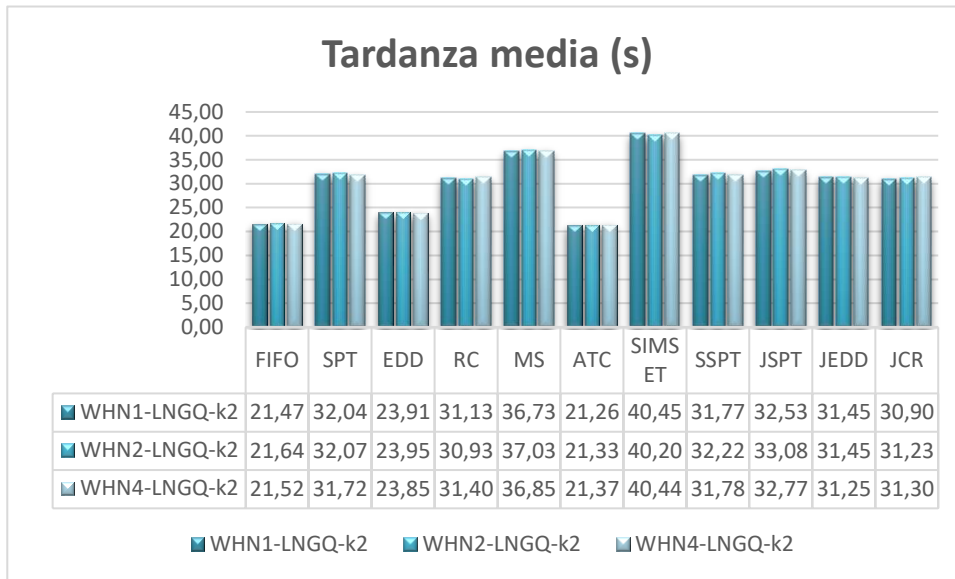
**Figura 77: Tiempo de flujo medio en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

De nuevo, es la descentralización aquella variante dentro de las lógicas "WHN" la que se comporta mejor con las once reglas analizadas. Esta predominancia desaparece si nos fijamos en el tiempo de flujo máximo, donde sólo consigue mejores resultados en tres de las once reglas. A pesar de esto, podemos ver que los resultados son muy similares en las tres variantes, existiendo únicamente algún que otro pico en las reglas SPT y SSPT. Esta vez, la centralización supera sus dos competidoras en seis reglas (FIFO, SPT, EDD, MS, JSPT y JCR).



**Figura 78: Tiempo de flujo máximo en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

Una vez acabado con los tiempos de flujo, es hora de comprobar cómo funcionan las tardanzas.



**Figura 79: Tardanza media en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"**

De nuevo, encontrar diferencias entre las diferentes variantes es complicado, al no destacar ninguna sobre otra. La centralización vuelve a destacar con las reglas FIFO, SPT, EDD, MS, JSPT y JCR. Ahora también con la incorporación de las reglas SSPT y ATC. La descentralización destaca con las reglas RC y SIMSET, y por último la regla del seguidor sólo destaca con la regla JEDD.

Como vemos, las diferencias nunca son de más de un segundo, por lo que el empleo de una regla u otra es complicado, aunque una elección adecuada sí que acabaría influyendo, dependiendo de la cantidad de pedidos.

Las diferencias son más notables si acudimos a la tardanza máxima, con oscilaciones entre variantes de entre uno y doce segundos. La centralización sigue dominando con las reglas de despacho FIFO, SPT, EDD, MS, JSPT y JCR. Por otra parte, la descentralización únicamente consigue el dominio de la regla JEDD, aunque consigue resultados muy buenos con las reglas EDD, RC y SIMSET, muy cerca de la primera posición. La regla del seguidor consigue buenos resultados en las cuatro reglas restantes. Por otro lado, la descentralización no ha compaginado nada bien con la regla SPT, consiguiendo doce segundos más que las variantes "WHN1" y "WHN4". Del mismo modo, con la regla JSPT no iba a ser diferente, superando en cinco segundos a la regla del seguidor, y en ocho segundos a la centralización.

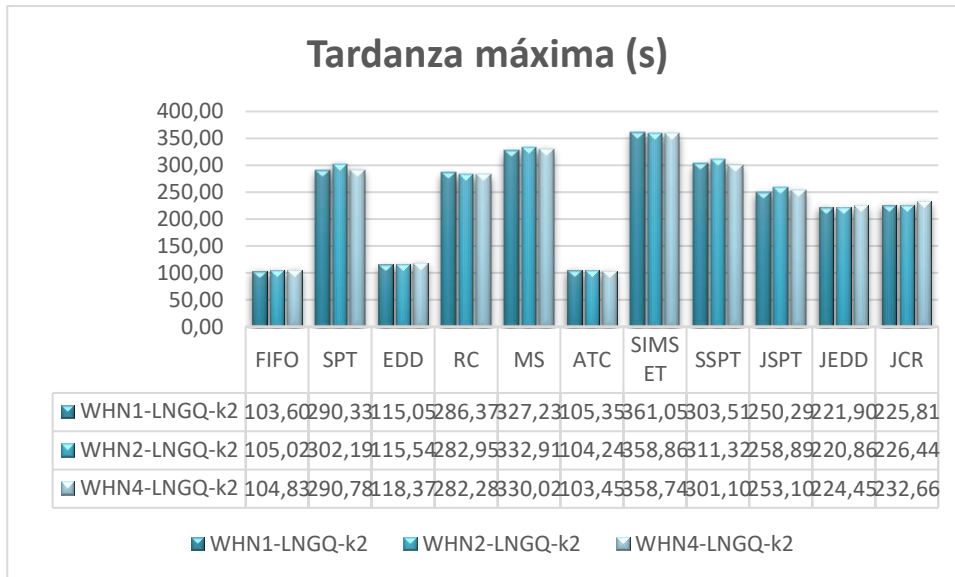


Figura 80: Tardanza máxima en segundos en función de la regla de despacho aplicada en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"

Por último, nos queda analizar las distancias recorridas por los operarios. Para ello, haremos una media de entre todas las reglas de despacho, y así poder analizar el comportamiento global de las variantes "WHN" independientemente de la regla de despacho aplicada.

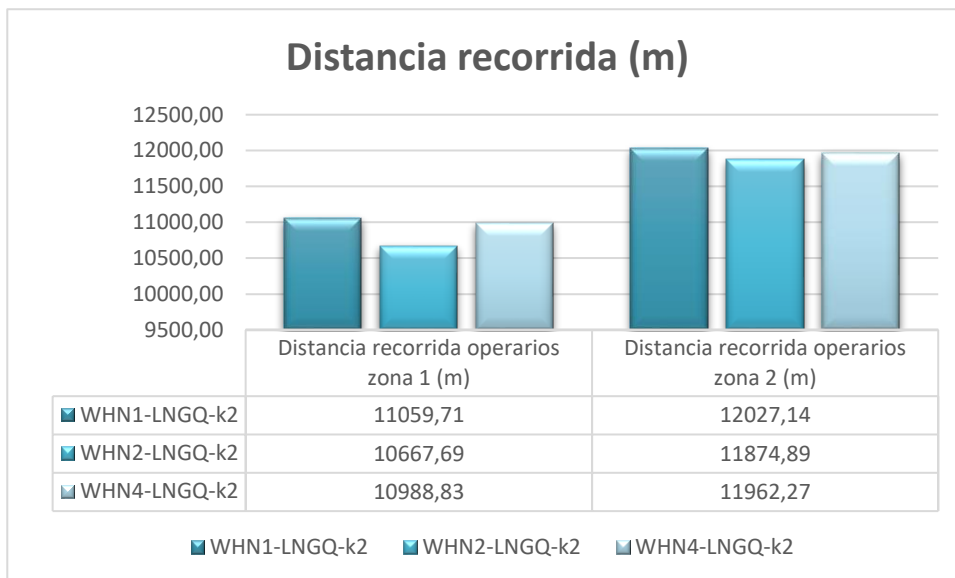


Figura 81: Distancia recorrida en metros por operario en la variante LNGQ-k2 para las diferentes variantes "WHN"

Tras lo visto en la Figura 81, podemos deducir el predominio de la segunda variante en la mayoría de las reglas de despacho, puesto que es la que consigue minimizar la distancia recorrida tanto en la zona 1 como en la zona 2.

Tras observar todos estos datos, y tras lo comentado previamente, resulta verdaderamente complejo dictaminar sentencia sobre cuál de las opciones "WHN" es la más adecuada. Además, es preciso conocer que regla de despacho se va a emplear, y la elección de dicha regla puede venir influenciada también por la elección de una u otra variante "WHN". Es por esto por lo que se llevan a cabo análisis de este estilo.

A pesar de esto sí que se puede concluir que si en una planta como esta, se va a pretender disminuir el número de trabajos retrasados o el tiempo de flujo medio, se va

a aplicar la descentralización, pues ha conseguido el dominio en las once reglas de despacho. Por otra parte, si atendemos a cualquier otro parámetro la cosa cambia, y entonces dependerá más de la regla de despacho analizada. Como hemos visto, la centralización funciona muy bien con reglas como FIFO, SPT, EDD, MS, JSPT y JCR. Todo esto es un factor a tener en cuenta a la hora de tomar decisiones.

Otro factor importante es si se tienen en cuenta varios objetivos al mismo tiempo. Si además de minimizar el número de trabajos retrasados, también te interesa minimizar la tardanza, puede darse el caso de que la descentralización no sea la mejor opción, porque también va a depender de la regla de despacho que apliquemos. Por eso es necesario el análisis que se explicará a continuación y, recalamos, que debido a toda esta “incertidumbre” a la hora de tomar decisiones, es muy importante la simulación en la organización industrial, pues permite valorar muchos aspectos que no podrían ser analizados de otra forma.

- Reglas de despacho

A continuación, se hará un análisis igual al que se ha hecho en el Caso 2 y en el Caso 3, mediante tablas resumen que nos den una visión global de cuál puede ser la mejor elección para nuestra planta sin tener la necesidad de ir regla a regla, variante a variante. En estas tablas podrá verse que regla (regla de despacho + asignación laboral) ha sido la mejor y cuál ha sido la peor en base a la consecución de los objetivos marcados

Para el caso de que nos interesase un análisis más regla a regla, variante a variante, podrán verse todos los resultados de las simulaciones en el Anejo I.

**Tabla 76: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 4 con un factor de rigidez  $k = 2$**

Factor de rigidez $k = 2$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	SPT-WHN2-SQ-k2	EDD-WHN1-SQ-k2
Número de trabajos retrasados	SPT-WHN2-SQ-k2	EDD-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo medio	SPT-WHN2-SQ-k2	MS-WHN1-SQ-k2
Tiempo de flujo máximo	FIFO-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN1-SQ-k2
Tardanza media	ATC-WHN1-LNGQ-k2	SIMSET-WHN1-SQ-k2
Tardanza máxima	ATC-WHN4-LNGQ-k2	RC-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	ATC-WHN4-SQ-k2	SIMSET-WHN1-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	JSPT-WHN2-LNGQ-k2	SSPT-WHN1-SQ-k2

**Tabla 77: Tabla resumen con la mejor y la peor regla en cada parámetro analizado en el Caso 4 con un factor de rigidez  $k = 3$**

Factor de rigidez $k = 3$	Regla aplicada	
	Mejor	Peor
Número de trabajos en plazo	ATC-WHN2-SQ-k3	EDD-WHN1-SQ-k3
Número de trabajos retrasados	ATC-WHN2-SQ-k3	EDD-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo medio	SPT-WHN2-SQ-k3	MS-WHN1-SQ-k3
Tiempo de flujo máximo	ATC-WHN2-LNGQ-k3	SPT-WHN1-SQ-k3
Tardanza media	ATC-WHN2-LNGQ-k3	MS-WHN1-SQ-k3
Tardanza máxima	ATC-WHN2-LNGQ-k3	RC-WHN1-SQ-k3

Con un factor de rigidez  $k = 2$  podemos ver la predominancia de las reglas de despacho SPT y ATC. Únicamente no han sobresalido por encima del resto en cuanto al tiempo de flujo máximo y en cuanto a la distancia recorrida por los operarios en la zona 2. A la hora de tomar decisiones, de nuevo hay que tener en cuenta cual es el parámetro o parámetros que más nos interese analizar, puesto que si se pretenden minimizar el número de trabajos retrasados, maximizando de este modo los trabajos entregados a tiempo, o si interesa disminuir el tiempo medio de flujo, la opción a considerar es  $SPT - WHN2 - SQ - k2$ . Con esto podemos comprobar una conclusión que se ha explicado anteriormente en esta memoria, y es que la lógica "LNGQ" siempre consigue mejores resultados, salvo con la descentralización, que puede llegar a ocurrir lo contrario. Con la regla  $SPT - WHN2 - SQ - k2$  podemos comprobar este fenómeno.

Por otro lado, si nos interesa minimizar las tardanzas, la regla ATC, ha conseguido buenos resultados, alternándose con la centralización y la regla del seguidor.

En el lado opuesto de la tabla, nos encontramos con aquellas opciones que deben descartarse si se quieren obtener buenos resultados en los parámetros indicados. Sorprende la aparición de la regla EDD en cuanto a trabajos retrasados se refiere, pues intenta perseguir todo lo contrario. Se ve que esta regla no es aplicable en un *Job Shop* como este. Destacaremos también la combinación  $WHN1 - SQ$ , quien aparece en absolutamente todos los parámetros analizados. La centralización, a pesar de obtener buen rendimiento, debe combinarse con la lógica "LNGQ", de lo contrario no conduce a buen puerto. La centralización es una variante sencilla, similar a la regla FIFO, dado que no actúan bajo ningún criterio adicional. La centralización simplemente se limita a indicarle a un operario que es elegible en cuanto acabe un trabajo, y eso implica que pueda tener que moverse muchas veces a estaciones de trabajo diferentes. Si esto lo combinas con que la cola va a tener muy poca cantidad de ítems, es muy probable que tras acabar el trabajo, tenga que acudir a otra estación. Por el contrario, si le dices que acuda a una cola con una cantidad de ítems grande, es más probable que el siguiente pedido escogido por la regla de despacho, se encuentre en esa misma cola, disminuyendo de esta manera el número de viajes por operario, y los tiempos muertos.

Si analizamos ahora la Tabla 77, al aumentar la holgura con respecto la fecha de entrega, el predominio es claro. Si tuviésemos que escoger una regla que sirviese para los 6 parámetros indicados en dicha tabla, la elección sería  $ATC - WHN2$ . En cuanto a la variante "WHR", la elección no implicaría grandes diferencias. Anteriormente se comentó que, con la descentralización, las diferencias entre acudir a la cola más corta o a la cola más larga, eran casi inapreciables, pero que de vez en cuando, la lógica "SQ" conseguía incluso mejores resultados. Ese es el motivo por el que apareceré como ganadora en trabajos en plazo, trabajo retrasados y tiempo de flujo medio. A pesar de esto, se recomienda el uso de la regla  $ATC - WHN2 - LNGQ - k3$ .

Por otra parte, la regla EDD sigue comportándose mal ante un *Job Shop* como este, aunque hayamos aumentado la holgura de las fechas de finalización.

Como vemos, las reglas que han escogido como siguiendo pedido uno del mismo tipo que el que se había procesado, y de no poder, aplicarse otro criterio, no han destacado ni para bien ni para mal. Sus resultados no han sido lo suficientemente buenos, ni lo suficientemente malos como para ser representativos.

Por último, mencionaremos los factores de utilización de nuestra planta.

**Tabla 78: Factores de utilización de las diferentes máquinas del Caso 4**

Ocupación M1	15%
Ocupación M2	15%-17%
Ocupación M3	15%-21%
Ocupación M4	7%-21%
Ocupación M5	4%-5%
Ocupación M6	2%-5%
Ocupación M7	13%
Ocupación M8	38%

Como podemos comprobar, los factores de utilización son muy bajos, es decir, la maquinaria esta infrautilizada. Esto se debe a los que procesos de fabricación son relativamente cortos, pero si aumentamos estos tiempos de fabricación, aumentarían más los retrasos debido a la restricción de la fecha de entrega. La oscilación tan elevada en M4 se debe a las reglas como JSPT, JEDD o JCR. En estas reglas, se persigue escoger una máquina en la que el último ítem que se haya procesado sea del mismo tipo que el anterior. En caso de que esto no sea posible, en el software, se ha hecho que se escoja la máquina que esté libre, pero si M3 y M4 están libres, por defecto escogerá M3. De ahí que M4 pueda llegar a ser empleada tan solo un 7% del tiempo. Lo mismo pasa con M6.

Otro aspecto preocupante es la baja ocupación de las máquinas M5 y M6. Esto se debe a que por ellas solo pasan tres de los cinco tipos de trabajos que pueden procesarse, y esos tres trabajos tienen unos tiempos de fabricación muy bajos, y por ello, su utilización es mucho menor que el resto.

Si prestamos atención a los factores de utilización de los operarios, no son excesivamente altos. Este porcentaje podría aumentarse si disminuimos el tiempo entre llegadas, pero si sucede esto, se aumentarían los trabajos retrasados.

**Tabla 79: Porcentaje de ocupación de los operarios en el Caso 4**

Ocupación operarios zona 1	40%-42%
Ocupación operarios zona 2	39%-40%

## 6 CONCLUSIONES

Con la realización de este estudio se han podido extraer diversas conclusiones que serán expuestas a continuación de manera resumida.

Como se ha podido comprobar, es realmente complejo encontrar una solución que sea capaz de satisfacer todos los parámetros que se quieran minimizar. Lo más probable es que haya que conformarse con minimizar uno o varios parámetros teniendo que sacrificar algún que otro parámetro. A día de hoy, siguen siendo diversas las investigaciones que tratan de encontrar una solución óptima, debido a la gran importancia de una respuesta como esta en el mundo de la organización de la producción. Lo que sí ha quedado claro, es que la simulación de procesos resulta ser una herramienta primordial a la hora de poder decidir qué regla de despacho es la más recomendable.

Debido a la diferencia entre los casos analizados, las conclusiones que podemos aportar tienen que ser teniendo en cuenta las características del caso en particular, y por tanto explicaremos las conclusiones individuales, ya que estas no pueden generalizarse, haciendo aún más evidente lo complicado que puede ser la elección de una regla u otra, pues siempre dependerá del taller analizado.

A pesar de esto, sí que se puede hacer hincapié en la importancia del factor de rigidez, pues la elección de un factor adecuado ayudará considerablemente a disminuir la demora de los pedidos, pudiendo centrarse más en otros aspectos clave. Además, aunque simplemente se modifique la holgura con respecto a los plazos de entrega, el comportamiento de las reglas cambia, pues la holgura puede afectar a que donde una regla sobresalía, ahora tenga resultados no tan buenos.

En cuanto al primer *Flow Shop* automatizado, la elección de una regla u otra no es sencilla, pues a pesar de que las reglas ATC y SPT han sido las que consiguieron una menor cantidad de pedidos entregados fuera del tiempo estipulado, aquellos pedidos que sí lo hicieron, tuvieron una tardanza media y máxima superior que con el resto de reglas. De nuevo, ambas reglas consiguieron mejores resultados en cuanto al tiempo de flujo medio, pero volvieron a excederse con el tiempo de flujo máximo. De todas formas, los tiempos de flujo medio fueron casi idénticos que con el resto de reglas. Como conclusión final ante un taller como el analizado en el Caso 1, se recomienda el empleo de las reglas SPT y ATC si se quiere disminuir la cantidad de pedidos con demora, pero si lo que se pretende es disminuir la tardanza, o el tiempo de flujo, la balanza se inclina más hacia reglas como RC o MS, que tienen en cuenta las fechas de entrega y el tiempo actual que lleva el pedido en el proceso.

Si se cuenta con una célula en U, entonces debemos prestar atención al Caso 2, donde se analizó el comportamiento de un taller formado por once máquinas en serie, divididas en tres zonas de trabajo. En este caso ya se han tenido en cuenta los trabajadores, y por tanto se han implementado las reglas de asignación laboral, siendo éstas muy influyentes en los resultados de la planta. Además, se le ha añadido aleatoriedad al proceso, con los tiempos de procesamiento variables. De esta manera, se representa la variación que puede existir en los operarios a la hora de realizar un mismo trabajo en intervalos de tiempo diferentes. En este caso, se pone de manifiesto la importancia de acudir a la cola con una mayor cantidad de ítems, imponiéndose por encima de la lógica "SQ". En este análisis, también salió a la palestra el buen funcionamiento de una regla clásica como es la regla EDD, concretamente, mediante la combinación  $EDD - WHN1 - LNGQ - k2$ , aportando los mejores resultados en casi todos los parámetros que se han analizado. Por el lado contrario, debe descartarse el



empleo de la regla  $SPT - WHN1 - SQ - k2$ , pues consigue muy malos resultados en una planta como esta, dado que como se selecciona siempre el trabajo que tenga un tiempo de procesamiento corto en la máquina siguiente. Como haya un trabajo con un tiempo de procesamiento elevado, el intervalo de tiempo que puede estar esperando, puede ser muy grande, incrementando de este modo las tardanzas y los tiempos de flujo. Este fenómeno se pone de manifiesto cuando tenemos un proceso en serie, pues entonces sólo existe una máquina para cada cola. En cambio, si tuviésemos varias máquinas en paralelo, sería posible sacar varios ítems de la cola al mismo tiempo, haciendo más probable que se pudiese escoger antes ese trabajo que tiene un tiempo de procesamiento tan elevado.

Finalmente, si la célula en U cuenta con fechas de entrega menos restrictivas, la centralización puede sustituirse por el empleo de la regla del seguidor.

En este caso, también se analizó la influencia de la variabilidad del tiempo de procesado de los operarios, mediante la modificación de las desviaciones típicas. Tras haber estudiado este fenómeno, pudo comprobarse que las reglas se comportan de diferente manera al aumentar la variabilidad del proceso. A pesar de esto, se sigue recomendando el empleo de la regla EDD, pues aun no siendo la mejor en todos los parámetros que se pudieron analizar, nunca se alejó demasiado del estado "óptimo".

Si se tienen en cuenta los tiempos de cambio, las conclusiones cambian. En los dos casos siguientes se añadieron cinco reglas más que tenían en cuenta dichos tiempos de cambio, además, éstos también eran variables, pues eran llevados a cabo por los trabajadores.

En el Caso 3 se analizó un *Flow Shop* híbrido formado por diez máquinas capaces de procesar hasta cinco tipos de trabajos diferentes. De nuevo, la planta estaba dividida en tres zonas de trabajo. En un taller como este, se descarta la elección de la descentralización, pues esta sólo destaca si se combina con la lógica "SQ", pero de nuevo se determinó que la mejor elección es acudir a la cola con una mayor cantidad de pedidos en espera. De este modo, se recomienda el empleo de la regla del seguidor, aunque siempre dependiente de los parámetros que se quieran minimizar. Esta vez, la regla SPT sí ha conseguido buenos resultados, siendo al mejor tanto para maximizar los trabajos entregados a tiempo y minimizando el tiempo de retraso. De entre las reglas que tienen en cuenta los tiempos de cambio, se destaca el funcionamiento de las reglas SIMSET y SSPT, no alejándose demasiado de los valores considerados como "óptimos". De todas formas, si se cuenta con una planta como esta, se recomienda emplear la combinación " $SPT - WHN4 - LNGQ - k2$ ", siendo de las mejores reglas empleadas.

Por último, quiso analizarse un *Job Shop Flexible*, con rutas dependientes del tipo de trabajo a considerar. Esta vez, a pesar de recomendarse el empleo de la lógica "LNGQ", se advierte que, si se aplica la descentralización, puede que acudir a la cola más larga no sea siempre la mejor opción. De todas formas, si lo que se busca es reducir el tiempo de flujo medio o el número de trabajos retrasados, se recomienda el empleo de la descentralización. Por otra parte, si lo que se pretende es atender a otros parámetros, la cosa cambia. Con este análisis se puso de manifiesto que unas reglas de despacho combinan mejor con ciertas reglas "WHN" que otras. Por ejemplo, la centralización funciona muy bien con reglas clásicas como FIFO, SPT, EDD, MS y con reglas basadas en estas reglas clásicas como JSPT y JCR. De este modo, deberá buscarse la combinación más efectiva. Con un *Job Shop* de estas características, si se busca minimizar el número de trabajos retrasados o el tiempo medio de flujo, la opción a considerar es  $SPT - WHN2 - SQ - k2$ , mientras que, si se quiere reducir la tardanza media y la tardanza máxima, debe combinarse la regla ATC con la centralización o con la regla del seguidor.



En el lado opuesto, descartamos el empleo de la regla EDD en un *Job Shop*, dado que no ha conseguido minimizar ningún parámetro. Este suceso puede deberse a que no todos los trabajos tienen el mismo número de procesos, y pues entonces, aunque la fecha de entrega parece más restrictiva que otras, puede que en realidad no lo sea ya que a lo mejor otro producto debe pasar por más máquinas y entonces su tiempo en el proceso es más largo. Si el *Job Shop* cuenta con plazos de entrega holgados, entonces sale a la palestra el dominio de la combinación *ATC – WHN2*, con independencia de la lógica "*WHR*", pues las diferencias de esta lógica combinada con la descentralización son mínimas.

Finalmente se descarta por completo en cualquier tipo de planta el empleo de la combinación *WHN1 – SQ*. La centralización, a pesar de obtener buen rendimiento, debe combinarse con la lógica "*LNGQ*", de lo contrario no conduce a buen puerto. La centralización simplemente se limita a indicarle a un operario que es elegible en cuanto acabe un trabajo, y eso implica que pueda tener que moverse muchas veces a estaciones de trabajo diferentes. Si esto se combina con que la cola va a tener muy poca cantidad de ítems, es muy probable que, tras acabar el trabajo, tenga que acudir a otra estación. Por el contrario, si se le dice que acuda a una cola con una cantidad de ítems grande, es más probable que el siguiente pedido escogido por la regla de despacho, se encuentre en esa misma cola, disminuyendo de esta manera el número de viajes por operario, y los tiempos muertos.

Por último, hay que destacar que a pesar de que existen reglas que tienen en cuenta los tiempos de cambio, estas no tienen por qué funcionar del todo bien. Al fin y al cabo, han sido las reglas clásicas, junto con la incorporación de una regla compuesta, como ha sido la regla *ATC* las que han conseguido los mejores resultados en los cuatro casos analizados.

Se realza de nuevo la importancia de emplear simulaciones y análisis personalizados a los diferentes tipos de plantas que pueden darse, pues un buen análisis puede influir mucho en el buen funcionamiento de una planta.

A continuación, se adjuntan dos tablas a modo de resumen en las que podemos ver las reglas que deberían aplicarse en función de la distribución que tenga nuestra planta.

**Tabla 80: Tabla resumen con la regla que debe aplicarse en cada tipo de distribución en función del parámetro deseado con un factor de rigidez  $k = 2$**

Factor de rigidez $k = 2$	Regla aplicada			
	Caso 1 ( <i>FlowShop</i> automatizado)	Caso 2 (Célula U)	Caso 3 ( <i>FlowShop</i> híbrido)	Caso 4 ( <i>JobShop</i> Flexible)
Número de trabajos en plazo	ATC-k2	EDD-WHN1-LNGQ-k2	SPT-WHN4-LNGQ-k2	SPT-WHN2-SQ-k2
Número de trabajos retrasados	ATC-k2	EDD-WHN1-LNGK-k2	SPT-WHN4-LNGQ-k2	SPT-WHN2-SQ-k2
Tiempo de flujo medio	SPT-k2	EDD-WHN1-LNGK-k2	FIFO-WHN4-LNGQ-k2	SPT-WHN2-SQ-k2
Tiempo de flujo máximo	SPT-k2	FIFO-WHN1-LNGQ-k2	FIFO-WHN4-LNGQ-k2	FIFO-WHN1-LNGQ-k2
Tardanza media	RC-k2	EDD-WHN1-LNGK-k2	SPT-WHN4-LNGQ-k2	ATC-WHN1-LNGQ-k2
Tardanza máxima	EDD-k2	EDD-WHN1-LNGK-k2	SPT-WHN4-LNGQ-k2	ATC-WHN4-LNGQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	-	RC-WHN2-LNGQ-k2	JEDD-WHN2-SQ-k2	ATC-WHN4-SQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	-	FIFO-WHN2-LNGQ-k2	FIFO-WHN4-SQ-k2	JSPT-WHN2-LNGQ-k2
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	-	FIFO-WHN2-LNGQ-k2	FIFO-WHN4-LNGQ-k2	-

**Tabla 81: Tabla resumen con la regla que debe aplicarse en cada tipo de distribución en función del parámetro deseado con un factor de rigidez  $k = 3$**

Factor de rigidez $k = 3$	Regla aplicada			
	Caso 1 ( <i>FlowShop</i> automatizado)	Caso 2 (Célula U)	Caso 3 ( <i>FlowShop</i> híbrido)	Caso 4 ( <i>JobShop</i> Flexible)
Número de trabajos en plazo	EDD-k3	EDD-WHN4-LNGQ-k3	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	ATC-WHN2-SQ-k3
Número de trabajos retrasados	EDD-k3	EDD-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN4-LNGQ-k3	ATC-WHN2-SQ-k3
Tiempo de flujo medio	SPT-k3	EDD-WHN1-LNGQ-k3	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	SPT-WHN2-SQ-k3
Tiempo de flujo máximo	SPT-k3	FIFO-WHN1-LNGQ-k3	FIFO-WHN4-LNGQ-k3	ATC-WHN2-LNGQ-k3
Tardanza media	FIFO-k3	EDD-WHN2-SQ-k3	SPT-WHN4-SQ-k3	ATC-WHN2-LNGQ-k3
Tardanza máxima	MS-k3	FIFO-WHN1-LNGQ-k3	SPT-WHN4-SQ-k3	ATC-WHN2-LNGQ-k3

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Vollman, T., Lee, W. & Whybark, Clay. (1991). Sistemas de planificación y control de la fabricación. Volumen 1.

Cuatrecasas, LL. (2009). Diseño avanzado de procesos y plantas de producción flexible: Técnicas de diseño y herramientas gráficas con soporte informático.

Cuatrecasas, LL. (2017). Ingeniería de procesos y de planta: Ingeniería Lean.

Basco, A.I., Beliz, G., Coatz, D. & Garnero, P. (2018). Industria 4.0: Fabricando el futuro.

Ynzunza, C.B., Izar, J.M. & Bocarando, Y.G. (2017). El entorno de la industria 4.0: Implicaciones y perspectivas futuras.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., & Waldner, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting.

Suñé, A., Gil, F. & Arcusa, I. (2004). Manual práctico de diseño de sistemas productivos.

Pinedo, M.L. (2016). Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Fifth Edition.

Jayamohan, M. S., & Rajendran, C. (2000). New dispatching rules for shop scheduling: A step forward. *International Journal of Production Research*, 38(October 2014), 563–586. doi:10.1080/002075400189301

Dominguez, J.A., García, S., Domínguez, M.A., Ruíz, A. & Álvarez, M.J. (1995). Dirección de operaciones: Aspectos técnicos y operativos en la producción y los servicios. ISBN 84-481-1803-0.

González, E.M., Montoya, J.R & Caballero, J.P. (2018). A comparison of dispatching rules hybridised with Monte Carlo Simulation in stochastic permutation flow shop problem, *Journal of Simulation*, DOI: 10.1080/17477778.2018.1473908

Ortiz, D., & Montoya, J. (2012). Production Scheduling in a Collaborative Dyadic Supply Chain. *Ingeniería Y Universidad*, 16(2), 315. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu16-2.pscd>

Öner-Közen, M. & Minner, S. (2017). Impact of priority sequencing decisions on on-time probability and expected tardiness of orders in make-to-order production systems with external due-dates. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.042>

Sharma, P., Jain, A. Analysis of dispatching rules in a stochastic dynamic job shop manufacturing system with sequence-dependent setup times. *Front. Mech. Eng.* 9, 380–389 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11465-014-0315-9>

Trevelen, M.D. & Elvers, D.A. (1985). An investigation of Labor Assignment Rules in a Dual-Constrained Job Shop. *Journal of Operations Management* 1985.

James K. Weeks, John S. Fryer, (1976) A Simulation Study of Operating Policies in a Hypothetical Dual-Constrained Job Shop.

*Management Science* 22(12):1362-1371. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.22.12.1362>

Bovrowski, P.M. & Park, P. (1993). An evaluation of labor assignment rules when workers are not perfectly interchangeable. *Journal of Operations Management*

Park, P (1990). A study os Labor Assignment Rules with Bottlenecks. OMEGA, 18(3), 247-257

Sánchez, J. (2019). Minimización de Makespan en Sistema Flow Show Flexible con Máquinas Paralelas no Relacionadas de Diferente Capacidad.

García, A (1984). Programación de la producción para centros de fabricación en serie.

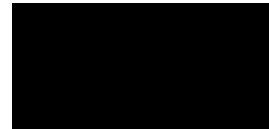
Vinod, V., & Sridharan, R. (2008). Dynamic job-shop scheduling with sequence-dependent setup times: Simulation modeling and analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 355–372. doi:10.1007/s00170-006-0836-4

Himmelblau, D.M. & Bischoff, K.B. (2004). Análisis y simulación de procesos.

Guasch, A., Piera, M.A., Casanovas, J & Figueras, J. (2002). Modelado y simulación: Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. EDICIONS UPC

Shingo, S. (1985). A Revolution in Manufacturing: The SMED System.

En Ferrol a Julio de 2020.



Fdo.: Óscar Manuel Castro Martínez.





UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO/MÁSTER  
CURSO 2019/20**

---

*SIMULACIÓN DE TALLERES HÍBRIDOS CON  
LIMITACIÓN DE RECURSOS PARA OBTENCIÓN DE  
PLANIFICACIONES OPTIMIZADAS UTILIZANDO  
REGLAS DE DESPACHO*

---

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**Anejo I**

**TABLAS DE RESULTADOS**

## ÍNDICE

1 Resultados Caso 1 .....	4
2 Resultados Caso 2.....	7
2.1 Resultados Caso 2 con desviaciones típicas aleatorias .....	7
2.2 Resultados Caso 2 modificando las desviaciones típicas.....	11
3 Resultados Caso 3.....	24
4 Resultados Caso 4.....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados obtenidos en el Caso 1 con un factor de rigidez $k = 2$ .....	6
Tabla 2: Resultados obtenidos en el Caso 1 con un factor de rigidez $k = 3$ .....	6
Tabla 3: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k2 .....	7
Tabla 4: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k3 .....	7
Tabla 5: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k2 .....	8
Tabla 6: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k3 .....	8
Tabla 7: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k2 .....	8
Tabla 8: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k3 .....	9
Tabla 9: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k2 .....	9
Tabla 10: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k3 .....	9
Tabla 11: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-SQ-k2 .....	10
Tabla 12: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k2 .....	10
Tabla 13: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k3 .....	10
Tabla 14: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k2 modificando las desviaciones típicas .....	12
Tabla 15: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k2 modificando las desviaciones típicas .....	13
Tabla 16: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k3 modificando las desviaciones típicas .....	14
Tabla 17: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k3 modificando las desviaciones típicas .....	15
Tabla 18: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k2 modificando las desviaciones típicas .....	16
Tabla 19: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k3 modificando las desviaciones típicas .....	17
Tabla 20: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k2 modificando las desviaciones típicas .....	18
Tabla 21: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k3 modificando las desviaciones típicas .....	19
Tabla 22: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-SQ-k2 modificando las desviaciones típicas .....	20
Tabla 23: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-SQ-k3 modificando las desviaciones típicas .....	21
Tabla 24: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k2 modificando las desviaciones típicas .....	22
Tabla 25: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k3 modificando las desviaciones típicas .....	23



Tabla 26: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-SQ-k2 .....	25
Tabla 27: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-SQ-k3 .....	25
Tabla 28: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-LNGQ-k2 .....	26
Tabla 29: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-LNGQ-k3 .....	26
Tabla 30: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-SQ-k2 .....	27
Tabla 31: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-SQ-k3 .....	27
Tabla 32: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-LNGQ-k2 .....	28
Tabla 33: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-LNGQ-k3 .....	28
Tabla 34: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-SQ-k2 .....	29
Tabla 35: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-SQ-k3 .....	29
Tabla 36: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-LNGQ-k2 .....	30
Tabla 37: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-LNGQ-k3 .....	30
Tabla 38: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-SQ-k2 .....	32
Tabla 39: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-SQ-k3 .....	32
Tabla 40: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-LNGQ-k2 .....	33
Tabla 41: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-LNGQ-k3 .....	33
Tabla 42: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN2-SQ-k2 .....	34
Tabla 43: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN2-SQ-k3 .....	34
Tabla 44: Tabla de resultados en el Caso 3 con la variante WHN2-LNGQ-k2 .....	35
Tabla 45: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN2-LNGQ-k3 .....	35
Tabla 46: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-SQ-k2 .....	36
Tabla 47: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-SQ-k3 .....	36
Tabla 48: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-LNGQ-k2 .....	37
Tabla 49: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-LNGQ-k3 .....	37

## 1 RESULTADOS CASO 1

A continuación, se adjuntarán las tablas con los resultados obtenidos en el primero caso de los cuatro casos simulados mediante *FlexSim*.

**Tabla 1: Resultados obtenidos en el Caso 1 con un factor de rigidez  $k = 2$**

$k = 2$	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número trabajos en plazo	3124,93	3320,23	3200,52	3130,07	3152,77	3332,97
Número trabajos retrasados	472,25	277,06	396,71	467,12	444,43	264,31
Tiempo de flujo medio (s)	26,56	25,48	26,27	26,55	26,47	25,66
Tiempo de flujo máximo (s)	77,15	74,75	75,45	77,25	76,84	149,78
Tardanza media (s)	7,13	8,85	7,42	7,10	7,19	10,37
Tardanza máxima (s)	47,97	112,40	43,52	46,40	45,55	204,36

**Tabla 2: Resultados obtenidos en el Caso 1 con un factor de rigidez  $k = 3$**

$k = 3$	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número trabajos en plazo	3521,13	3528,67	3545,18	3525,98	3534,30	3531,53
Número trabajos retrasados	76,05	68,62	52,06	71,22	62,91	65,75
Tiempo de flujo medio (s)	26,56	25,48	26,19	26,55	26,43	25,65
Tiempo de flujo máximo (s)	77,15	74,75	74,79	77,70	76,60	106,98
Tardanza media (s)	6,19	11,88	6,69	6,23	6,40	14,67
Tardanza máxima (s)	31,40	90,40	87,53	30,04	26,99	143,63

## 2 RESULTADOS CASO 2

En este capítulo, podrán verse las tablas correspondientes al segundo modelo simulado, haciendo distinción entre desviaciones típicas aleatorias y el modelo modificando los valores de las desviaciones.

### 2.1 Resultados Caso 2 con desviaciones típicas aleatorias

**Tabla 3: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k2**

WHN1-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	649,10	668,81	650,71	641,72	645,74	657,23
Número de trabajos retrasados	310,56	290,81	308,90	317,85	313,90	302,37
Tiempo de flujo medio (s)	131,70	132,56	131,74	132,14	131,91	132,46
Tiempo de flujo máximo (s)	230,99	424,10	243,04	250,20	241,92	366,07
Tardanza media (s)	19,22	25,04	18,73	19,83	19,00	22,67
Tardanza máxima (s)	97,29	288,69	95,25	103,09	95,85	219,93
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	10732,31	10786,06	10755,70	10770,40	10763,23	10865,66
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	10583,12	10780,12	10620,72	10648,12	10618,50	10731,56
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	14366,75	14359,48	14377,90	14371,63	14373,62	14445,46

**Tabla 4: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k3**

WHN1-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	948,88	936,43	950,54	946,00	951,35	939,06
Número de trabajos retrasados	10,78	23,19	9,10	13,61	8,28	20,47
Tiempo de flujo medio (s)	131,70	132,56	131,66	132,31	131,86	132,48
Tiempo de flujo máximo (s)	230,99	424,10	251,80	248,74	246,64	339,82
Tardanza media (s)	14,65	54,23	13,04	13,92	13,50	33,43
Tardanza máxima (s)	34,32	221,72	29,05	33,91	27,83	129,35

**Tabla 5: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k2**

WHN1-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	719,91	728,84	729,37	711,80	721,77	720,48
Número de trabajos retrasados	239,90	230,91	230,39	248,03	238,01	239,30
Tiempo de flujo medio (s)	127,06	127,13	126,94	127,34	127,11	127,34
Tiempo de flujo máximo (s)	186,72	236,39	196,85	197,80	196,25	216,51
Tardanza media (s)	11,58	14,29	10,75	11,79	11,06	12,93
Tardanza máxima (s)	53,72	98,32	50,04	55,27	52,18	78,39
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	9937,22	9949,05	9992,70	9947,56	9954,56	9966,64
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	9467,01	9560,58	9488,69	9525,21	9507,71	9571,07
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	14036,47	14032,17	14059,70	14044,30	14055,13	14116,47

**Tabla 6: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k3**

WHN1-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	959,38	956,29	959,57	959,07	959,45	957,87
Número de trabajos retrasados	0,43	3,46	0,18	0,77	0,27	1,94
Tiempo de flujo medio (s)	127,06	127,13	126,88	127,55	127,00	127,53
Tiempo de flujo máximo (s)	186,72	236,39	202,74	201,03	200,71	214,44
Tardanza media (s)	1,07	17,06	0,42	1,59	0,64	7,11
Tardanza máxima (s)	1,61	32,75	0,51	2,41	1,13	12,08

**Tabla 7: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k2**

WHN2-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	719,83	727,10	726,49	710,68	721,21	720,22
Número de trabajos retrasados	239,94	232,60	233,27	249,08	238,58	239,51
Tiempo de flujo medio (s)	127,15	127,22	126,97	127,46	127,27	127,44
Tiempo de flujo máximo (s)	188,09	232,52	197,83	199,87	199,71	215,76
Tardanza media (s)	11,68	14,62	10,90	11,94	11,40	13,12
Tardanza máxima (s)	55,85	95,63	52,12	55,96	54,61	78,72
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	9918,01	9913,58	9951,20	9907,03	9925,65	9949,22
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	9419,29	9507,17	9462,77	9494,77	9467,34	9535,86
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	13974,82	13975,94	13997,16	13991,29	13986,64	14054,48

**Tabla 8: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k3**

WHN2-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	959,28	956,07	959,52	959,17	959,48	957,83
Número de trabajos retrasados	0,49	3,63	0,23	0,57	0,27	1,99
Tiempo de flujo medio (s)	127,15	127,22	126,98	127,60	127,14	127,52
Tiempo de flujo máximo (s)	188,09	232,52	203,47	201,93	203,67	214,26
Tardanza media (s)	1,80	17,49	0,40	2,13	0,76	7,58
Tardanza máxima (s)	2,28	30,59	0,66	2,86	1,07	12,52

**Tabla 9: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k2**

WHN2-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	719,87	727,51	726,88	710,33	721,44	720,05
Número de trabajos retrasados	239,88	232,20	232,86	249,43	238,35	239,67
Tiempo de flujo medio (s)	127,14	127,18	126,94	127,45	127,26	127,44
Tiempo de flujo máximo (s)	187,70	231,22	197,95	200,47	199,64	215,80
Tardanza media (s)	11,69	14,56	10,86	11,93	11,42	13,14
Tardanza máxima (s)	55,23	93,99	52,29	55,77	54,97	78,59
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	9917,56	9911,26	9956,23	9906,71	9927,90	9947,30
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	9417,09	9505,83	9458,94	9499,40	9472,19	9537,69
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	13973,06	13981,64	14002,26	13984,57	13989,27	14056,62

**Tabla 10: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k3**

WHN2-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	959,27	956,27	959,47	959,21	959,48	957,77
Número de trabajos retrasados	0,48	3,44	0,24	0,54	0,28	2,05
Tiempo de flujo medio (s)	127,14	127,18	127,02	127,59	127,17	127,50
Tiempo de flujo máximo (s)	187,70	231,22	203,75	202,17	203,70	215,15
Tardanza media (s)	1,67	16,86	0,42	1,86	0,77	7,83
Tardanza máxima (s)	2,23	29,03	0,68	2,40	1,08	13,61

**Tabla 11: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-SQ-k2**

WHN4-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	684,51	697,75	687,13	675,93	680,01	683,23
Número de trabajos retrasados	275,22	261,89	272,61	283,78	279,73	276,49
Tiempo de flujo medio (s)	128,93	129,14	128,78	129,29	129,08	129,27
Tiempo de flujo máximo (s)	199,28	255,46	208,81	209,46	208,53	231,55
Tardanza media (s)	14,26	17,81	13,34	14,27	13,71	15,51
Tardanza máxima (s)	66,66	118,52	61,53	65,50	64,73	90,57
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	10328,35	10372,22	10398,62	10359,76	10369,21	10384,41
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	9958,26	10056,64	10017,41	10021,93	10004,09	10058,85
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	14208,22	14201,21	14232,88	14211,32	14212,88	14264,97

**Tabla 12: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k2**

WHN4-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	722,47	727,91	726,06	714,15	723,44	719,54
Número de trabajos retrasados	237,34	231,82	233,77	245,62	236,35	240,23
Tiempo de flujo medio (s)	127,02	127,18	126,99	127,35	127,18	127,30
Tiempo de flujo máximo (s)	188,25	229,39	198,59	197,96	196,84	215,11
Tardanza media (s)	11,59	14,26	10,75	11,83	11,28	12,85
Tardanza máxima (s)	56,13	91,53	52,33	54,74	53,77	76,40
Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	9930,30	9934,67	9974,15	9925,19	9950,85	9972,43
Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	9448,28	9530,54	9481,22	9512,30	9505,29	9559,35
Distancia recorrida operarios zona 3 (m)	14011,43	14014,70	14036,05	14020,54	14036,66	14092,11

**Tabla 13: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k3**

WHN4-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC
Número de trabajos en plazo	959,25	956,54	959,65	959,15	959,55	957,96
Número de trabajos retrasados	0,56	3,19	0,14	0,65	0,23	1,83
Tiempo de flujo medio (s)	127,02	127,18	126,97	127,61	127,06	127,49
Tiempo de flujo máximo (s)	188,25	229,39	202,17	200,25	201,65	213,88
Tardanza media (s)	1,95	13,67	0,56	2,34	0,57	8,82
Tardanza máxima (s)	2,56	26,59	0,81	2,91	0,87	13,81

## **2.2 Resultados Caso 2 modificando las desviaciones típicas**

A continuación, se adjuntan las tablas correspondientes a los resultados obtenidos modificando las desviaciones típicas.

**Tabla 14: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k2 modificando las desviaciones típicas**

	WHN1-SQ-k2	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)	Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	Distancia recorrida operarios zona 3 (m)
FIFO	$\sigma = 1$	692,90	266,78	130,16	228,08	18,30	95,00	10726,89	10544,46	14407,37
	$\sigma = 2$	646,31	313,30	131,57	228,83	18,54	95,08	10761,01	10554,72	14416,72
	$\sigma = 3$	593,48	365,99	134,00	238,05	20,70	105,74	10660,69	10511,25	14354,06
SPT	$\sigma = 1$	711,06	245,18	130,60	399,34	23,47	263,82	10764,96	10723,39	14406,90
	$\sigma = 2$	672,90	283,18	132,06	426,00	24,44	286,31	10713,28	10737,38	14409,60
	$\sigma = 3$	614,84	341,18	134,42	387,62	24,98	248,38	10702,16	10711,90	14357,00
EDD	$\sigma = 1$	691,28	264,96	129,94	129,94	17,15	86,83	10788,54	10596,36	14418,71
	$\sigma = 2$	652,16	304,04	131,26	131,26	18,00	90,94	10753,58	10596,36	14423,87
	$\sigma = 3$	589,52	366,36	133,74	133,74	19,74	98,12	10699,01	10594,67	14362,68
RC	$\sigma = 1$	683,72	272,34	130,42	242,40	18,51	96,59	10777,67	10640,74	14429,73
	$\sigma = 2$	641,98	314,12	131,84	247,32	19,05	100,70	10718,00	10639,19	14400,95
	$\sigma = 3$	584,66	371,38	134,20	250,66	20,65	105,68	10715,29	10592,05	14349,60
MS	$\sigma = 1$	692,94	263,30	130,14	236,18	18,11	90,67	10777,46	10596,77	14429,32
	$\sigma = 2$	646,40	309,66	131,64	237,44	18,40	93,70	10732,24	10614,07	14409,18
	$\sigma = 3$	586,98	369,00	134,00	242,14	20,14	99,09	10689,33	10587,77	14344,19
ATC	$\sigma = 1$	702,86	253,28	130,50	362,64	21,35	218,72	10820,57	10691,20	14478,20
	$\sigma = 2$	659,30	296,90	131,72	333,46	21,18	187,47	10817,27	10661,19	14468,16
	$\sigma = 3$	600,98	354,98	134,46	345,56	23,13	201,77	10780,32	10638,71	14406,76



**Tabla 15: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k2 modificando las desviaciones típicas**

	WHN1-LNGQ-k2	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)	Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	Distancia recorrida operarios zona 3 (m)
FIFO	$\sigma = 1$	770,56	185,90	125,58	176,46	9,64	45,28	9930,50	9479,93	14122,96
	$\sigma = 2$	722,80	233,48	126,90	184,00	11,23	52,53	9917,76	9484,04	14081,70
	$\sigma = 3$	655,90	300,32	129,30	198,56	13,93	67,27	9918,28	9461,68	13976,74
SPT	$\sigma = 1$	773,82	182,40	125,50	218,22	12,11	82,66	9958,05	9583,11	14120,95
	$\sigma = 2$	727,04	229,30	127,08	228,52	13,91	93,90	9949,88	9570,45	14066,21
	$\sigma = 3$	667,32	288,86	129,32	240,92	16,30	105,07	9936,85	9555,64	13990,84
EDD	$\sigma = 1$	778,86	177,52	125,50	187,30	8,75	39,99	9991,84	9518,37	14143,02
	$\sigma = 2$	728,72	227,60	126,70	194,34	10,31	48,18	9985,35	9535,68	14106,55
	$\sigma = 3$	663,78	292,38	129,16	207,00	13,21	63,73	9956,72	9469,85	13972,88
RC	$\sigma = 1$	758,56	197,78	125,88	187,18	9,64	44,38	9943,93	9537,61	14114,17
	$\sigma = 2$	710,72	245,60	127,14	193,82	11,26	51,67	9957,20	9551,96	14090,24
	$\sigma = 3$	646,78	309,34	129,54	206,18	13,96	65,18	9910,69	9508,72	13989,84
MS	$\sigma = 1$	773,40	182,90	125,58	185,84	9,04	42,24	9986,97	9535,60	14135,82
	$\sigma = 2$	720,36	235,84	127,02	192,98	10,62	49,48	9953,40	9550,02	14092,21
	$\sigma = 3$	653,52	302,54	129,42	204,76	13,47	63,20	9935,90	9503,23	14002,98
ATC	$\sigma = 1$	767,98	188,36	125,90	207,00	11,02	68,42	10007,18	9597,47	14189,64
	$\sigma = 2$	719,42	236,90	127,30	213,84	12,61	74,67	10026,59	9615,20	14164,58
	$\sigma = 3$	654,76	301,54	129,70	219,40	15,19	80,94	9984,31	9556,55	14043,82

**Tabla 16: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-SQ-k3 modificando las desviaciones típicas**

	WHN1-SQ-k3	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)
FIFO	$\sigma = 1$	947,88	8,18	129,96	227,06	14,39	30,98
	$\sigma = 2$	947,94	8,20	131,22	225,80	13,47	30,01
	$\sigma = 3$	942,16	13,72	133,66	235,60	15,12	40,55
SPT	$\sigma = 1$	938,38	17,86	130,60	399,34	52,30	197,08
	$\sigma = 2$	934,84	21,24	132,06	426,00	55,91	217,62
	$\sigma = 3$	930,40	25,62	134,42	387,62	45,51	180,74
EDD	$\sigma = 1$	949,98	6,18	129,98	243,68	10,50	21,53
	$\sigma = 2$	948,54	7,60	131,22	245,82	11,00	24,13
	$\sigma = 3$	944,10	12,02	133,92	254,12	13,15	29,85
RC	$\sigma = 1$	946,00	10,04	130,58	243,50	12,29	29,99
	$\sigma = 2$	943,94	12,18	131,90	246,82	12,95	32,31
	$\sigma = 3$	938,78	17,34	134,68	250,58	13,70	36,98
MS	$\sigma = 1$	949,46	6,70	129,92	242,82	11,43	23,91
	$\sigma = 2$	948,56	7,66	131,64	245,48	12,57	26,65
	$\sigma = 3$	944,24	11,82	133,98	248,12	12,62	30,47
ATC	$\sigma = 1$	940,04	16,10	130,54	345,06	35,29	128,27
	$\sigma = 2$	937,76	18,44	132,18	335,06	32,57	122,24
	$\sigma = 3$	932,50	23,60	134,80	331,66	30,19	116,51

**Tabla 17: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN1-LNGQ-k3 modificando las desviaciones típicas**

	WHN1-LNGQ-k3	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)
FIFO	$\sigma = 1$	956,22	0,24	125,58	176,46	0,45	0,70
	$\sigma = 2$	955,90	0,38	126,90	184,00	0,89	1,19
	$\sigma = 3$	954,70	1,52	129,30	198,56	5,04	6,97
SPT	$\sigma = 1$	954,62	1,60	125,50	218,22	13,45	20,01
	$\sigma = 2$	953,36	2,98	127,08	228,52	15,02	30,38
	$\sigma = 3$	950,86	5,32	129,32	240,92	18,21	39,13
EDD	$\sigma = 1$	956,24	0,12	125,40	194,38	0,11	0,41
	$\sigma = 2$	956,08	0,24	126,70	199,78	0,55	0,71
	$\sigma = 3$	955,12	1,00	129,20	212,64	2,32	3,20
RC	$\sigma = 1$	956,12	0,24	126,00	190,66	0,71	0,95
	$\sigma = 2$	955,78	0,52	127,32	195,28	1,78	2,24
	$\sigma = 3$	954,10	2,06	129,78	212,70	6,08	9,09
MS	$\sigma = 1$	956,14	0,08	125,52	191,54	0,17	0,38
	$\sigma = 2$	955,98	0,24	126,96	196,06	0,36	0,59
	$\sigma = 3$	955,24	0,84	129,42	210,18	2,70	3,70
ATC	$\sigma = 1$	955,40	0,98	125,92	204,28	4,48	7,60
	$\sigma = 2$	954,94	1,26	127,40	211,90	7,98	11,10
	$\sigma = 3$	952,62	3,58	129,80	225,12	10,54	21,53

**Tabla 18: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k2 modificando las desviaciones típicas**

	WHN2-SQ-k2	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)	Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	Distancia recorrida operarios zona 3 (m)
FIFO	$\sigma = 1$	767,98	188,32	188,32	176,06	9,75	44,57	9952,68	9464,96	14077,88
	$\sigma = 2$	721,64	234,54	234,54	185,06	11,34	53,49	9901,57	9447,61	14023,50
	$\sigma = 3$	654,60	301,70	301,70	199,48	14,21	68,55	9882,35	9421,89	13902,06
SPT	$\sigma = 1$	769,40	186,84	125,72	216,70	12,50	81,83	9940,26	9533,68	14070,00
	$\sigma = 2$	723,10	233,10	127,08	220,76	13,72	86,48	9932,96	9527,15	14019,69
	$\sigma = 3$	666,80	289,30	129,42	246,44	16,84	111,32	9886,07	9490,14	13914,28
EDD	$\sigma = 1$	777,88	178,42	125,46	188,08	8,92	42,47	9959,16	9492,82	14083,01
	$\sigma = 2$	725,46	230,84	126,90	195,84	10,53	50,17	9961,70	9485,99	14032,79
	$\sigma = 3$	660,46	295,76	129,20	207,10	13,24	64,57	9929,39	9442,39	13920,94
RC	$\sigma = 1$	759,06	197,28	125,82	188,16	9,90	45,67	9913,18	9511,62	14085,60
	$\sigma = 2$	708,58	247,64	127,24	195,36	11,52	52,32	9927,80	9528,17	14037,08
	$\sigma = 3$	645,98	310,14	129,70	208,32	14,29	66,46	9897,39	9467,05	13927,89
MS	$\sigma = 1$	769,54	186,74	125,74	188,20	9,26	45,17	9969,97	9512,52	14085,27
	$\sigma = 2$	719,66	236,66	127,18	194,18	10,92	50,93	9942,11	9524,41	14030,89
	$\sigma = 3$	651,54	304,52	129,56	206,44	13,59	63,82	9894,99	9467,58	13927,27
ATC	$\sigma = 1$	763,32	193,02	125,96	204,62	11,23	65,66	9991,86	9558,83	14149,73
	$\sigma = 2$	715,20	241,04	127,42	212,64	12,58	72,45	9970,38	9564,28	14089,34
	$\sigma = 3$	653,12	303,10	129,68	223,30	15,16	84,75	9928,18	9531,45	13975,92

**Tabla 19: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-SQ-k3 modificando las desviaciones típicas**

	WHN2-SQ-k3	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)
FIFO	$\sigma = 1$	956,20	0,10	125,54	176,06	0,29	0,42
	$\sigma = 2$	955,94	0,24	126,90	185,06	0,85	0,94
	$\sigma = 3$	954,70	1,60	129,48	199,48	5,22	8,45
SPT	$\sigma = 1$	954,26	1,98	125,72	216,70	11,07	19,14
	$\sigma = 2$	953,90	2,30	127,08	220,76	14,13	23,49
	$\sigma = 3$	949,54	6,56	129,42	246,44	19,56	46,65
EDD	$\sigma = 1$	956,10	0,16	125,52	194,06	0,33	0,65
	$\sigma = 2$	956,04	0,22	126,88	201,76	0,67	1,02
	$\sigma = 3$	955,42	0,82	129,26	214,54	3,99	4,93
RC	$\sigma = 1$	956,06	0,26	126,00	190,70	0,78	1,24
	$\sigma = 2$	955,82	0,44	127,50	198,38	1,35	1,79
	$\sigma = 3$	953,92	2,14	129,90	210,80	5,01	7,85
MS	$\sigma = 1$	956,18	0,08	125,62	191,88	0,06	0,15
	$\sigma = 2$	955,88	0,22	127,04	198,42	0,42	0,53
	$\sigma = 3$	955,14	0,94	129,44	212,82	2,82	4,12
ATC	$\sigma = 1$	955,32	0,96	126,04	201,46	5,47	7,10
	$\sigma = 2$	954,98	1,30	127,42	207,90	6,55	9,99
	$\sigma = 3$	952,30	3,82	129,86	223,46	10,26	20,97

**Tabla 20: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k2 modificando las desviaciones típicas**

	WHN2-LNGQ-k2	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)	Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	Distancia recorrida operarios zona 3 (m)
FIFO	$\sigma = 1$	768,14	188,22	125,54	175,92	9,79	44,69	9948,79	9446,05	14075,49
	$\sigma = 2$	720,76	235,46	126,86	185,76	11,33	54,32	9913,05	9467,98	14029,04
	$\sigma = 3$	654,10	302,18	129,48	200,06	14,20	69,13	9870,18	9412,18	13904,18
SPT	$\sigma = 1$	769,96	186,34	125,70	216,52	12,53	82,02	9935,31	9532,53	14065,89
	$\sigma = 2$	722,46	233,76	127,08	220,96	13,75	86,45	9925,51	9524,26	14021,88
	$\sigma = 3$	667,54	288,52	129,36	245,08	16,82	109,08	9878,48	9492,92	13915,98
EDD	$\sigma = 1$	777,64	178,68	125,48	189,12	8,96	42,42	9962,79	9492,20	14085,42
	$\sigma = 2$	727,00	229,26	126,90	195,46	10,51	49,65	9963,93	9482,06	14029,02
	$\sigma = 3$	659,38	296,78	129,26	207,46	13,32	65,01	9938,81	9435,24	13918,90
RC	$\sigma = 1$	759,08	197,24	125,84	187,74	9,91	45,47	9917,76	9513,06	14082,68
	$\sigma = 2$	708,48	247,76	127,30	194,66	11,55	51,47	9918,66	9514,34	14038,98
	$\sigma = 3$	645,66	310,42	129,74	208,68	14,26	66,82	9894,87	9472,91	13919,76
MS	$\sigma = 1$	769,78	186,60	125,70	187,88	9,24	44,39	9961,86	9512,13	14084,07
	$\sigma = 2$	719,88	236,38	127,16	194,70	10,95	51,23	9939,91	9530,12	14034,24
	$\sigma = 3$	652,96	303,18	129,54	206,30	13,70	64,10	9897,62	9462,91	13929,99
ATC	$\sigma = 1$	764,10	192,26	125,92	205,10	11,23	67,03	9985,33	9553,20	14143,50
	$\sigma = 2$	714,18	242,06	127,40	213,64	12,54	72,95	9977,06	9571,84	14093,99
	$\sigma = 3$	655,00	301,18	129,64	223,06	15,13	83,83	9927,48	9536,32	13978,80

**Tabla 21: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN2-LNGQ-k3 modificando las desviaciones típicas**

	WHN2-LNGQ-k3	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)
FIFO	$\sigma = 1$	956,26	0,10	125,54	175,92	0,29	0,42
	$\sigma = 2$	955,92	0,30	126,86	185,76	1,19	1,28
	$\sigma = 3$	954,70	1,58	129,48	200,06	5,58	8,88
SPT	$\sigma = 1$	954,30	2,00	125,70	216,52	11,26	19,51
	$\sigma = 2$	953,90	2,32	127,08	220,96	13,65	23,38
	$\sigma = 3$	949,70	6,36	129,36	245,08	18,44	44,83
EDD	$\sigma = 1$	956,12	0,16	125,50	194,26	0,33	0,65
	$\sigma = 2$	956,08	0,20	126,82	202,04	0,64	0,99
	$\sigma = 3$	955,42	0,80	129,24	214,48	3,68	4,81
RC	$\sigma = 1$	956,00	0,28	125,98	191,30	0,80	0,99
	$\sigma = 2$	955,86	0,44	127,52	198,08	1,51	1,88
	$\sigma = 3$	953,94	2,12	129,94	210,14	5,06	8,15
MS	$\sigma = 1$	956,22	0,08	125,60	191,70	0,06	0,15
	$\sigma = 2$	955,96	0,22	127,06	198,34	0,42	0,53
	$\sigma = 3$	955,26	0,86	129,46	212,38	2,85	4,00
ATC	$\sigma = 1$	955,28	1,02	126,04	202,64	5,83	7,50
	$\sigma = 2$	954,94	1,32	127,38	208,24	6,87	10,42
	$\sigma = 3$	952,56	3,56	129,78	223,98	10,00	20,98

**Tabla 22: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-SQ-k2 modificando las desviaciones típicas**

	WHN4-SQ-k2	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)	Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	Distancia recorrida operarios zona 3 (m)
FIFO	$\sigma = 1$	731,50	224,68	127,30	187,38	12,43	55,88	10308,32	9949,21	14271,19
	$\sigma = 2$	684,32	271,98	128,76	194,54	13,70	62,90	10328,03	9966,86	14253,47
	$\sigma = 3$	619,78	336,38	131,34	210,14	16,27	76,61	10318,77	9969,42	14172,12
SPT	$\sigma = 1$	739,94	216,32	127,52	242,40	16,09	106,40	10355,98	10045,33	14262,39
	$\sigma = 2$	694,60	261,60	129,04	246,12	16,92	109,63	10385,61	10068,53	14248,02
	$\sigma = 3$	638,94	317,16	131,38	268,56	19,46	131,14	10369,26	10054,12	14184,51
EDD	$\sigma = 1$	734,86	221,42	127,18	200,70	11,46	53,97	10397,23	9969,76	14286,80
	$\sigma = 2$	685,32	270,92	128,72	207,10	13,01	60,56	10401,43	10013,18	14264,83
	$\sigma = 3$	621,80	334,20	131,10	218,18	15,51	72,64	10371,94	9994,05	14174,22
RC	$\sigma = 1$	723,18	233,10	127,54	200,92	12,50	56,85	10346,65	9998,00	14263,97
	$\sigma = 2$	674,54	281,66	129,08	206,20	14,08	62,50	10344,14	10038,24	14246,19
	$\sigma = 3$	613,56	342,64	131,60	218,10	16,46	75,95	10334,82	10023,77	14171,01
MS	$\sigma = 1$	731,00	225,16	127,40	195,82	11,75	51,63	10365,26	9981,65	14275,39
	$\sigma = 2$	680,14	276,16	128,80	206,34	13,13	63,00	10357,67	10001,91	14236,93
	$\sigma = 3$	619,04	337,06	131,30	216,26	15,87	74,07	10345,86	9983,81	14182,91
ATC	$\sigma = 1$	735,18	221,02	127,56	218,00	14,15	78,82	10382,25	10045,88	14334,59
	$\sigma = 2$	684,30	271,90	129,04	228,96	15,39	89,52	10420,36	10049,33	14291,36
	$\sigma = 3$	623,56	332,52	131,70	239,74	17,69	99,54	10386,27	10054,08	14234,59



**Tabla 23: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-SQ-k3 modificando las desviaciones típicas**

	WHN4-SQ-k3	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)
FIFO	$\sigma = 1$	955,72	0,46	127,30	187,38	1,27	1,71
	$\sigma = 2$	955,48	0,82	128,76	194,54	3,51	4,98
	$\sigma = 3$	952,60	3,56	131,34	210,14	7,70	13,86
SPT	$\sigma = 1$	950,76	5,50	127,52	242,40	17,33	41,32
	$\sigma = 2$	949,18	7,02	129,04	246,12	19,59	44,12
	$\sigma = 3$	944,20	11,90	131,38	268,56	20,66	64,54
EDD	$\sigma = 1$	956,06	0,14	127,22	204,94	0,15	0,36
	$\sigma = 2$	955,74	0,40	128,64	213,10	1,07	1,44
	$\sigma = 3$	953,82	2,24	131,16	223,30	4,65	7,94
RC	$\sigma = 1$	955,36	0,90	127,74	204,68	3,45	4,67
	$\sigma = 2$	954,52	1,66	129,30	209,32	4,49	6,78
	$\sigma = 3$	951,56	4,54	131,94	220,52	8,11	16,78
MS	$\sigma = 1$	955,72	0,48	127,40	203,34	1,34	2,38
	$\sigma = 2$	955,66	0,50	128,88	209,56	1,16	1,77
	$\sigma = 3$	954,22	1,90	131,50	220,98	4,93	8,24
ATC	$\sigma = 1$	954,10	2,22	127,48	214,00	7,57	12,17
	$\sigma = 2$	952,66	3,62	129,22	222,42	9,17	16,71
	$\sigma = 3$	948,34	7,82	131,80	236,80	13,80	32,89

**Tabla 24: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k2 modificando las desviaciones típicas**

	WHN4-LNGQ-k2	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)	Distancia recorrida operarios zona 1 (m)	Distancia recorrida operarios zona 2 (m)	Distancia recorrida operarios zona 3 (m)
FIFO	$\sigma = 1$	769,84	186,50	125,58	175,96	9,65	43,71	9968,75	9467,94	14095,06
	$\sigma = 2$	721,38	234,96	126,92	183,28	11,32	51,15	9961,74	9483,45	14065,52
	$\sigma = 3$	653,90	302,30	129,38	199,84	14,11	68,30	9856,47	9432,41	13922,59
SPT	$\sigma = 1$	771,14	185,16	125,58	215,34	12,19	81,38	9963,16	9565,01	14102,39
	$\sigma = 2$	724,26	232,08	127,14	222,00	13,77	88,45	9940,58	9543,51	14036,90
	$\sigma = 3$	666,38	289,68	129,44	245,58	16,72	108,65	9903,60	9507,25	13941,00
EDD	$\sigma = 1$	777,18	179,04	125,38	186,94	8,81	41,57	9988,39	9515,64	14125,50
	$\sigma = 2$	731,26	225,02	126,74	194,66	10,36	48,80	9967,79	9497,79	14083,10
	$\sigma = 3$	657,78	298,42	129,26	207,84	13,23	63,38	9947,81	9456,23	13934,69
RC	$\sigma = 1$	759,74	196,52	125,88	187,26	9,83	43,23	9940,24	9535,61	14118,03
	$\sigma = 2$	709,30	246,92	127,32	192,56	11,28	50,72	9945,32	9554,73	14053,04
	$\sigma = 3$	643,60	312,54	129,62	208,28	14,03	64,81	9897,97	9512,73	13967,68
MS	$\sigma = 1$	770,42	185,84	125,66	187,04	9,04	44,88	9982,59	9553,61	14117,49
	$\sigma = 2$	718,78	237,52	127,04	194,56	10,74	49,29	9973,35	9539,69	14066,81
	$\sigma = 3$	651,32	304,74	129,50	207,38	13,57	62,58	9916,17	9514,07	13962,06
ATC	$\sigma = 1$	766,90	189,40	125,82	202,76	11,16	64,70	9979,53	9561,05	14165,35
	$\sigma = 2$	719,54	236,72	127,26	205,66	12,51	68,07	9985,25	9585,41	14139,10
	$\sigma = 3$	654,64	301,62	129,70	220,28	15,15	82,04	9960,07	9558,66	14103,01

**Tabla 25: Resultados obtenidos en el Caso 2 con la variante WHN4-LNGQ-k3 modificando las desviaciones típicas**

	WHN4-LNGQ-k3	Número de trabajos en plazo	Número de trabajos retrasados	Tiempo de flujo medio (s)	Tiempo de flujo máximo (s)	Tardanza media (s)	Tardanza máxima (s)
FIFO	$\sigma = 1$	956,22	0,12	125,58	175,96	0,13	0,25
	$\sigma = 2$	956,12	0,22	126,92	183,28	0,71	0,96
	$\sigma = 3$	954,52	1,68	129,38	199,84	5,27	8,05
SPT	$\sigma = 1$	954,54	1,76	125,58	215,34	13,47	18,35
	$\sigma = 2$	953,56	2,78	127,14	222,00	13,36	24,76
	$\sigma = 3$	949,46	6,60	129,44	245,58	17,38	43,30
EDD	$\sigma = 1$	956,06	0,18	125,40	195,04	0,38	0,76
	$\sigma = 2$	955,86	0,28	126,88	200,20	0,55	1,07
	$\sigma = 3$	955,20	1,00	129,16	211,84	2,44	3,97
RC	$\sigma = 1$	956,04	0,30	125,98	190,22	0,77	1,18
	$\sigma = 2$	955,78	0,42	127,60	197,44	1,07	1,45
	$\sigma = 3$	954,16	1,96	129,98	209,26	5,70	8,76
MS	$\sigma = 1$	955,98	0,20	125,58	192,32	0,46	0,91
	$\sigma = 2$	956,00	0,30	126,98	196,98	0,19	0,40
	$\sigma = 3$	955,50	0,64	129,32	210,42	2,15	2,93
ATC	$\sigma = 1$	955,54	0,74	125,96	201,36	4,87	6,53
	$\sigma = 2$	954,96	1,22	127,38	206,94	6,07	8,44
	$\sigma = 3$	952,36	3,72	129,84	225,76	13,17	24,79

### **3 RESULTADOS CASO 3**

A continuación, podrán verse todos los resultados obtenidos en el tercer caso simulado mediante *FlexSim*, el primero en tener en cuenta los tiempos de cambio.

**Tabla 26: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-SQ-k2**

WHN1-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1320,43	1323,53	1319,29	1275,80	1315,08	1332,78	1282,00	1282,16	1205,14	1143,64	1138,73
Número de trabajos retrasados	111,52	108,45	112,76	156,03	116,87	99,33	149,91	149,75	212,13	287,61	278,18
Tiempo de flujo medio (s)	99,91	101,74	101,33	103,54	101,77	98,75	102,24	102,24	117,23	120,02	122,60
Tiempo de flujo máximo (s)	234,62	682,32	247,86	266,54	246,61	618,94	264,99	264,99	914,76	389,18	878,80
Tardanza media (s)	17,53	43,31	20,87	18,14	20,63	39,20	24,41	24,39	63,03	54,30	61,98
Tardanza máxima (s)	92,48	534,85	89,86	106,97	87,49	457,79	122,97	122,95	757,69	230,07	738,29
Distancia recorrida zona 1 (m)	10078,32	10231,07	6749,24	10201,32	10116,62	10091,48	10097,75	10097,75	10278,31	9572,46	10481,42
Distancia recorrida zona 2 (m)	13020,02	15267,80	15273,98	15230,20	15198,71	15070,00	13099,22	13099,22	14073,89	11872,15	14039,06
Distancia recorrida zona 3 (m)	10122,95	12130,23	12036,29	12011,10	11997,01	12099,45	10090,76	10090,76	9717,42	9442,67	9711,53

**Tabla 27: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-SQ-k3**

WHN1-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1425,28	1397,92	1425,83	1419,31	1425,69	1403,74	1414,42	1414,43	1331,14	1349,22	1293,21
Número de trabajos retrasados	6,67	34,06	6,20	12,45	6,30	28,31	17,49	17,48	86,13	82,16	113,73
Tiempo de flujo medio (s)	99,91	101,74	101,15	104,45	101,60	99,02	102,24	102,24	117,23	118,55	122,64
Tiempo de flujo máximo (s)	234,62	682,32	254,52	262,94	255,21	602,80	264,99	264,99	914,76	385,41	899,51
Tardanza media (s)	8,52	58,10	6,94	8,98	7,57	48,69	17,09	17,08	75,69	49,39	73,87
Tardanza máxima (s)	26,87	461,24	18,35	31,32	19,35	363,01	55,38	55,37	679,56	145,77	690,23

**Tabla 28: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-LNGQ-k2**

WHN1-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1395,96	1373,49	1400,11	1370,98	1396,71	1363,29	1363,65	1363,72	1276,25	1322,98	1258,91
Número de trabajos retrasados	36,30	58,89	32,38	61,22	35,60	54,86	68,57	68,50	132,09	109,04	172,69
Tiempo de flujo medio (s)	91,89	93,85	92,87	95,33	93,35	92,03	93,64	93,64	103,40	100,57	106,22
Tiempo de flujo máximo (s)	189,16	447,77	203,51	217,01	204,73	452,56	217,01	217,01	591,53	248,54	587,85
Tardanza media (s)	10,83	32,82	12,76	11,29	13,27	29,93	16,80	16,78	40,12	22,15	35,49
Tardanza máxima (s)	49,87	307,77	43,49	56,40	45,92	452,56	77,17	77,16	434,38	89,77	441,63
Distancia recorrida zona 1 (m)	7179,39	7201,44	7186,35	7192,78	7186,01	7493,59	7192,11	7192,11	6689,62	6696,02	6700,44
Distancia recorrida zona 2 (m)	12240,33	14374,14	14377,82	14355,31	14309,45	14313,74	12342,86	12342,86	14365,92	13675,75	13608,32
Distancia recorrida zona 3 (m)	9508,33	11415,62	11276,12	11323,34	11255,27	12049,81	9509,35	9509,35	9568,16	9242,02	9597,77

**Tabla 29: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN1-LNGQ-k3**

WHN1-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1431,84	1417,22	1431,94	1430,59	1432,12	1378,40	1428,43	1428,46	1369,05	1425,45	1375,67
Número de trabajos retrasados	0,42	15,16	0,38	1,59	0,31	12,02	3,79	3,76	39,29	6,51	47,59
Tiempo de flujo medio (s)	91,89	93,85	92,86	96,20	93,34	92,49	93,64	93,64	103,40	100,47	106,38
Tiempo de flujo máximo (s)	189,16	447,77	214,04	224,27	215,32	466,04	217,01	217,01	591,53	257,71	581,35
Tardanza media (s)	0,72	45,49	0,47	1,74	0,53	39,58	5,93	5,95	49,62	8,06	44,08
Tardanza máxima (s)	1,99	237,77	1,15	4,53	1,39	227,14	17,65	17,65	357,13	18,36	369,18

**Tabla 30: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-SQ-k2**

WHN2-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1378,35	1354,06	1390,02	1358,37	1384,67	1364,85	1305,29	1306,61	1227,54	1207,79	1163,13
Número de trabajos retrasados	53,93	78,18	42,37	73,87	47,68	67,51	126,43	125,42	203,88	223,41	256,49
Tiempo de flujo medio (s)	93,04	93,02	92,02	94,77	92,67	91,89	98,77	98,75	111,56	111,95	116,03
Tiempo de flujo máximo (s)	204,22	383,86	212,40	231,55	214,23	349,29	277,71	271,39	671,98	369,41	595,57
Tardanza media (s)	13,60	25,06	15,18	14,57	14,96	22,36	39,01	29,73	51,62	51,08	49,56
Tardanza máxima (s)	64,67	226,57	52,11	73,08	55,75	189,88	137,56	131,74	511,87	208,27	452,89
Distancia recorrida zona 1 (m)	7171,67	7195,80	7185,85	7188,06	7177,98	7195,99	7178,01	7187,55	6689,81	6664,59	6681,17
Distancia recorrida zona 2 (m)	12541,19	12615,49	12604,05	12552,52	12577,82	12723,39	12338,52	12349,35	13620,43	13643,87	13968,83
Distancia recorrida zona 3 (m)	9250,59	9712,37	9381,00	9428,24	9367,04	9756,92	8895,41	8896,16	8874,37	8321,20	8688,61

**Tabla 31: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-SQ-k3**

WHN2-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1430,91	1418,63	1431,48	1429,35	1431,35	1421,29	1408,85	1410,55	1356,65	1376,81	1330,82
Número de trabajos retrasados	1,37	13,76	0,88	2,76	1,12	11,10	22,87	21,48	74,77	54,55	100,54
Tiempo de flujo medio (s)	93,04	92,97	92,14	95,80	92,55	92,36	98,77	98,75	111,56	110,45	116,97
Tiempo de flujo máximo (s)	204,22	382,30	222,18	235,63	223,94	351,81	277,71	271,39	671,98	355,63	615,95
Tardanza media (s)	2,98	26,41	1,31	2,97	1,68	22,59	31,14	21,68	58,21	44,83	55,28
Tardanza máxima (s)	7,95	147,70	2,72	8,50	3,65	112,97	70,30	65,04	432,67	116,36	405,57

**Tabla 32: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-LNGQ-k2**

WHN2-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1378,35	1352,58	1390,02	1358,37	1384,67	1364,85	1305,29	1306,61	1227,54	1207,79	1163,13
Número de trabajos retrasados	44,92	79,66	42,37	73,87	47,68	67,51	126,43	125,42	203,88	223,41	256,49
Tiempo de flujo medio (s)	93,04	93,11	92,02	94,77	92,67	91,89	98,77	98,75	111,56	111,95	116,03
Tiempo de flujo máximo (s)	204,22	385,61	212,40	231,55	214,23	349,29	277,71	271,39	671,98	369,41	595,57
Tardanza media (s)	13,60	25,61	15,18	14,57	14,96	22,36	39,01	29,73	51,62	51,08	49,56
Tardanza máxima (s)	64,67	229,20	52,11	73,08	55,75	189,88	137,56	131,74	511,87	208,27	452,89
Distancia recorrida zona 1 (m)	7171,67	7196,11	8992,64	7188,06	7177,98	7195,99	7178,01	7187,55	6689,81	6674,26	6681,17
Distancia recorrida zona 2 (m)	12541,19	12611,74	12604,05	12552,52	12577,82	12723,39	12338,52	12349,35	13620,43	13643,87	13968,83
Distancia recorrida zona 3 (m)	9250,59	9721,33	9381,00	9428,24	9367,04	9756,92	8895,41	8896,16	8874,37	8321,20	8688,61

**Tabla 33: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN2-LNGQ-k3**

WHN2-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1430,91	1418,47	1431,48	1429,35	1431,35	1421,29	1408,85	1410,55	1356,65	1376,81	1330,82
Número de trabajos retrasados	1,37	13,88	0,88	2,76	1,12	11,10	22,87	21,48	74,77	54,55	100,54
Tiempo de flujo medio (s)	93,04	92,98	92,14	95,80	92,55	92,36	98,7721	98,7504	111,564	110,4499	116,968
Tiempo de flujo máximo (s)	204,22	384,17	222,18	235,63	223,94	351,81	277,7054	271,3932	671,9821	355,6291	615,9532
Tardanza media (s)	2,98	26,56	1,31	2,97	1,68	22,59	31,1411	21,6793	58,2112	44,8344	55,284
Tardanza máxima (s)	7,95	150,98	2,72	8,50	3,65	112,97	70,2998	65,0351	432,6729	116,3567	405,5677



**Tabla 34: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-SQ-k2**

WHN4-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1418,80	1430,95	1370,34	1330,55	1362,76	1330,92	1302,41	1302,41	1218,58	1189,31	1158,82
Número de trabajos retrasados	14,14	1,47	61,80	101,48	69,34	101,16	129,49	129,49	212,99	242,13	272,33
Tiempo de flujo medio (s)	82,61	93,07	95,01	98,95	96,98	97,47	99,82	99,82	114,06	114,96	119,14
Tiempo de flujo máximo (s)	172,70	251,17	225,92	246,23	227,69	373,93	274,43	274,43	784,57	378,81	704,85
Tardanza media (s)	7,90	5,89	17,37	16,12	17,08	23,21	28,17	28,17	55,99	54,06	55,74
Tardanza máxima (s)	32,88	17,31	65,31	87,64	67,73	226,43	133,24	133,24	626,44	219,90	562,94
Distancia recorrida zona 1 (m)	8274,99	8189,27	8838,43	8309,95	8291,50	8323,06	8285,79	8289,41	7799,75	7749,21	7818,10
Distancia recorrida zona 2 (m)	8145,96	14038,21	14420,15	14558,29	14590,11	14682,09	12614,48	12614,48	13806,38	13817,63	13782,32
Distancia recorrida zona 3 (m)	7942,58	10385,50	10988,05	11039,90	11019,90	11287,02	9298,99	9298,99	9143,20	8587,67	9077,80

**Tabla 35: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-SQ-k3**

WHN4-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1432,81	1432,42	1429,70	1424,71	1429,87	1414,16	1411,30	1411,30	1348,83	1361,58	1322,13
Número de trabajos retrasados	0,13	0,00	2,56	7,15	2,22	18,01	20,60	20,60	82,74	69,73	108,93
Tiempo de flujo medio (s)	82,61	93,07	95,32	99,87	96,74	98,18	99,82	99,82	114,06	113,87	120,32
Tiempo de flujo máximo (s)	172,70	251,17	237,48	251,94	235,01	359,57	274,43	274,43	784,57	372,26	722,24
Tardanza media (s)	0,20	0,00	3,13	7,86	3,40	24,09	22,56	22,56	63,91	47,03	64,33
Tardanza máxima (s)	0,84	0,00	7,64	21,37	7,56	144,62	65,83	65,83	547,80	132,09	509,86

**Tabla 36: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-LNGQ-k2**

WHN4-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1422,07	1431,72	1394,40	1358,60	1387,93	1346,69	1342,86	1342,86	1275,43	1295,07	1228,04
Número de trabajos retrasados	10,93	0,75	38,11	73,54	44,43	83,81	89,22	89,22	153,99	136,83	200,17
Tiempo de flujo medio (s)	80,73	91,36	92,36	96,07	93,98	95,65	95,45	95,45	104,62	102,61	108,11
Tiempo de flujo máximo (s)	167,39	238,80	207,78	229,12	211,49	361,23	240,58	240,58	594,13	271,37	562,68
Tardanza media (s)	7,70	4,50	13,27	13,67	13,84	21,68	20,66	20,66	38,06	25,81	35,40
Tardanza máxima (s)	28,17	11,74	46,79	69,13	52,28	213,44	100,47	100,47	437,39	113,18	417,49
Distancia recorrida zona 1 (m)	7170,71	7496,23	7492,27	7191,18	7183,29	7185,21	7191,19	7191,19	6701,30	6674,17	6704,63
Distancia recorrida zona 2 (m)	8304,75	13931,85	14140,65	14246,84	14274,23	14354,87	12343,35	12343,35	13724,88	13668,11	13704,25
Distancia recorrida zona 3 (m)	7864,97	10311,99	12482,87	10912,73	10878,78	11129,22	9139,57	9139,57	9227,23	8783,91	9139,88

**Tabla 37: Resultados obtenidos en el Caso 3 con la variante WHN4-LNGQ-k3**

WHN4-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	1432,88	1432,46	1420,89	1429,27	1431,24	1419,03	1423,93	1423,93	1387,06	1417,13	1372,52
Número de trabajos retrasados	0,12	0,01	0,63	2,75	1,09	13,13	8,15	8,15	42,36	14,79	59,03
Tiempo de flujo medio (s)	80,73	91,36	92,45	96,93	93,96	95,96	95,45	95,45	104,62	102,66	108,73
Tiempo de flujo máximo (s)	167,39	238,80	220,15	230,92	221,08	359,13	240,58	240,58	594,13	283,09	568,03
Tardanza media (s)	0,33	0,05	0,99	3,61	1,55	25,05	12,51	12,51	45,73	18,11	40,45
Tardanza máxima (s)	0,82	0,10	2,00	8,96	3,35	147,39	35,19	35,19	359,67	42,21	359,01

## 4 RESULTADOS CASO 4

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos del último caso simulado correspondiente a un *Job Shop Flexible*.

**Tabla 38: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-SQ-k2**

WHN1-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	590,31	692,38	571,19	666,38	644,20	595,52	669,24	678,75	625,22	599,51	601,82
Número de trabajos retrasados	371,67	269,49	390,86	295,29	317,59	366,51	292,61	283,67	336,65	362,43	360,11
Tiempo de flujo medio (s)	110,15	112,38	112,55	115,15	118,19	109,75	115,69	112,66	113,53	114,57	114,22
Tiempo de flujo máximo (s)	292,26	1092,35	310,11	1085,27	1066,52	290,75	1036,49	1082,43	580,89	521,85	517,46
Tardanza media (s)	39,97	71,39	42,40	71,85	72,85	39,88	75,74	67,11	55,10	52,17	51,78
Tardanza máxima (s)	186,55	987,60	191,02	987,82	941,13	184,65	932,08	977,72	468,30	401,83	396,74
Distancia recorrida zona 1 (m)	12797,05	13078,29	12856,35	13119,27	12991,65	12764,53	13172,51	13111,46	12546,28	12473,96	12479,31
Distancia recorrida zona 2 (m)	12351,90	12415,58	12394,46	12398,07	12422,28	12337,55	12290,20	12546,15	12042,62	12021,69	12005,44

**Tabla 39: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-SQ-k3**

WHN1-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	860,98	872,61	845,54	863,88	863,58	860,78	855,44	872,01	852,57	847,80	846,80
Número de trabajos retrasados	101,00	89,22	116,44	97,98	98,23	101,25	106,32	89,90	109,29	114,03	115,08
Tiempo de flujo medio (s)	110,04	112,19	113,60	114,76	118,01	109,94	115,54	112,72	113,55	114,49	114,13
Tiempo de flujo máximo (s)	290,19	1088,19	326,61	1059,33	1079,39	291,73	1068,27	1081,22	581,54	520,58	520,57
Tardanza media (s)	37,29	127,05	41,61	125,13	133,01	37,09	119,28	120,88	75,07	66,33	64,63
Tardanza máxima (s)	137,51	931,29	144,62	913,66	891,18	136,38	912,53	924,45	412,61	343,35	339,09

**Tabla 40: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-LNGQ-k2**

WHN1-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	724,21	763,56	703,87	742,25	721,62	726,83	744,36	754,26	712,60	703,34	701,95
Número de trabajos retrasados	237,98	198,74	258,37	220,04	240,60	235,40	217,94	208,04	240,96	258,89	260,27
Tiempo de flujo medio (s)	96,51	96,19	98,22	97,50	100,50	96,32	99,09	96,87	99,58	100,42	100,21
Tiempo de flujo máximo (s)	212,73	395,20	236,74	386,38	451,82	214,67	467,74	409,01	368,44	340,93	343,55
Tardanza media (s)	21,47	32,04	23,91	31,13	36,73	21,26	40,45	31,77	32,53	31,45	30,90
Tardanza máxima (s)	103,60	290,33	115,05	286,37	327,23	105,35	361,05	303,51	250,29	221,90	225,81
Distancia recorrida zona 1 (m)	11064,65	11196,18	11173,69	11185,32	11246,42	11070,63	11302,74	11219,00	10689,47	10757,85	10750,83
Distancia recorrida zona 2 (m)	12075,79	12111,90	12168,25	12067,96	12192,82	12077,93	12078,18	12023,05	11779,43	11883,44	11839,78

**Tabla 41: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN1-LNGQ-k3**

WHN1-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	940,98	926,52	932,63	923,85	915,69	941,28	910,68	926,29	907,85	916,97	915,98
Número de trabajos retrasados	21,23	35,81	29,66	38,38	46,46	21,06	51,60	35,97	45,69	45,31	46,22
Tiempo de flujo medio (s)	96,51	96,20	98,61	97,47	100,60	96,38	99,05	96,88	99,63	100,56	100,20
Tiempo de flujo máximo (s)	213,58	388,06	248,47	390,84	451,77	214,49	466,85	407,95	370,19	352,50	340,58
Tardanza media (s)	18,51	49,29	20,47	48,32	58,78	18,40	59,12	50,71	43,35	40,75	37,63
Tardanza máxima (s)	55,42	232,32	64,52	242,85	265,24	56,47	306,29	251,67	195,17	173,43	161,90

**Tabla 42: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN2-SQ-k2**

WHN2-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	736,39	773,83	715,46	752,08	733,66	738,73	754,02	763,27	721,46	712,17	711,11
Número de trabajos retrasados	225,92	188,52	246,81	210,17	228,58	223,54	208,28	198,99	232,14	250,10	251,18
Tiempo de flujo medio (s)	95,55	95,11	97,21	96,51	99,42	95,38	98,07	96,14	98,75	99,70	99,54
Tiempo de flujo máximo (s)	216,24	397,82	237,00	381,45	453,64	214,78	466,98	410,19	368,07	347,81	344,04
Tardanza media (s)	21,42	32,08	23,95	31,04	37,00	21,39	40,15	32,08	32,83	31,78	31,18
Tardanza máxima (s)	104,13	292,83	115,78	282,36	329,85	104,22	359,65	304,66	252,24	229,13	225,62
Distancia recorrida zona 1 (m)	10664,73	10794,27	10792,94	10782,25	10861,93	10656,84	10883,28	10786,15	10322,18	10408,52	10393,30
Distancia recorrida zona 2 (m)	11904,59	11919,86	11979,65	11884,27	12019,40	11899,42	11975,17	11916,10	11672,16	11741,70	11719,10

**Tabla 43: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN2-SQ-k3**

WHN2-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	941,12	928,42	934,51	926,21	917,74	942,03	912,93	926,62	909,08	917,62	915,73
Número de trabajos retrasados	21,16	33,94	27,81	36,08	44,45	20,27	49,37	35,67	44,54	44,66	46,51
Tiempo de flujo medio (s)	95,65	95,12	97,61	96,42	99,55	95,38	98,10	96,17	98,79	99,70	99,65
Tiempo de flujo máximo (s)	216,08	406,60	248,31	377,28	447,53	214,24	456,34	411,29	370,28	349,53	347,02
Tardanza media (s)	18,94	50,48	20,43	47,41	58,15	18,68	57,65	51,16	43,70	39,63	38,86
Tardanza máxima (s)	56,97	250,81	64,68	228,76	260,90	55,58	296,72	253,48	198,35	169,81	171,09

**Tabla 44: Tabla de resultados en el Caso 3 con la variante WHN2-LNGQ-k2**

WHN2-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	735,49	772,69	715,04	753,71	733,15	739,02	752,74	762,33	720,90	711,58	709,75
Número de trabajos retrasados	226,78	189,70	247,22	208,51	229,09	223,25	209,54	199,94	232,75	250,70	252,50
Tiempo de flujo medio (s)	95,61	95,17	97,23	96,44	99,47	95,37	98,14	96,24	98,87	99,65	99,60
Tiempo de flujo máximo (s)	215,41	407,20	237,25	381,37	457,04	214,30	465,09	418,34	373,74	339,65	343,85
Tardanza media (s)	21,64	32,07	23,95	30,93	37,03	21,33	40,20	32,22	33,08	31,45	31,23
Tardanza máxima (s)	105,02	302,19	115,54	282,95	332,91	104,24	358,86	311,32	258,89	220,86	226,44
Distancia recorrida zona 1 (m)	10665,32	10782,22	10760,85	10793,33	10862,36	10660,25	10893,70	10790,45	10327,01	10411,64	10397,47
Distancia recorrida zona 2 (m)	11910,45	11919,06	11982,46	11891,60	12006,09	11904,48	11979,84	11913,00	11668,25	11735,12	11713,49

**Tabla 45: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN2-LNGQ-k3**

WHN2-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	941,32	927,74	933,39	926,21	917,52	941,43	912,48	926,59	909,04	917,63	915,80
Número de trabajos retrasados	20,98	34,58	28,89	36,15	44,69	20,87	49,81	35,69	44,61	44,66	46,42
Tiempo de flujo medio (s)	95,58	95,18	97,58	96,45	99,45	95,40	98,17	96,20	98,85	99,69	99,71
Tiempo de flujo máximo (s)	214,40	404,17	250,16	384,49	443,61	213,44	459,51	417,53	373,26	348,12	346,97
Tardanza media (s)	18,75	49,52	20,63	47,52	56,68	18,18	57,67	51,54	44,21	39,66	39,17
Tardanza máxima (s)	56,25	248,24	66,58	234,29	257,13	54,52	299,35	257,87	202,43	168,60	170,75

**Tabla 46: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-SQ-k2**

WHN4-SQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	680,79	741,16	657,47	715,06	690,08	684,89	718,58	730,20	683,05	667,86	668,72
Número de trabajos retrasados	281,38	220,99	304,72	247,08	272,03	277,39	243,54	231,99	270,41	294,23	293,41
Tiempo de flujo medio (s)	99,65	98,95	101,62	247,08	104,24	99,06	102,47	99,88	102,65	103,56	103,39
Tiempo de flujo máximo (s)	228,19	487,25	248,73	458,82	519,05	225,05	538,91	495,57	407,29	364,29	361,27
Tardanza media (s)	24,39	37,31	26,97	36,12	42,24	24,17	46,26	37,15	36,69	34,91	34,50
Tardanza máxima (s)	117,79	369,48	127,56	359,49	394,28	115,47	432,66	388,51	290,48	245,40	240,91
Distancia recorrida zona 1 (m)	11578,13	11706,43	11650,33	11692,98	11746,61	7775,23	11798,48	11741,23	11189,76	11245,12	11252,06
Distancia recorrida zona 2 (m)	12138,86	12221,99	12241,74	12153,66	12282,65	11947,37	12053,21	11993,20	11736,82	11853,06	11805,16

**Tabla 47: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-SQ-k3**

WHN4-SQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	928,63	914,74	917,89	909,85	899,76	930,71	896,20	913,93	893,45	901,49	900,21
Número de trabajos retrasados	33,58	47,49	44,22	52,27	62,36	31,52	65,91	48,27	59,97	60,62	61,94
Tiempo de flujo medio (s)	99,60	98,93	102,06	100,61	104,49	99,03	102,42	99,84	102,64	103,76	103,55
Tiempo de flujo máximo (s)	227,31	479,39	262,60	478,56	531,42	224,22	532,28	498,96	403,78	371,99	367,63
Tardanza media (s)	20,79	58,56	23,06	56,45	65,97	20,41	66,47	60,21	47,96	44,13	41,84
Tardanza máxima (s)	67,87	323,08	79,08	331,08	343,48	65,34	371,66	340,09	230,57	193,76	189,27



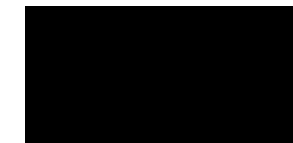
**Tabla 48: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-LNGQ-k2**

WHN4-LNGQ-k2	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	727,28	764,89	707,18	745,12	724,81	731,09	747,47	755,95	721,50	705,27	705,65
Número de trabajos retrasados	234,96	197,51	255,10	217,13	237,41	231,20	214,78	206,40	240,76	256,96	256,60
Tiempo de flujo medio (s)	96,41	96,04	97,99	97,36	100,29	95,95	98,78	96,74	99,41	100,20	100,12
Tiempo de flujo máximo (s)	215,19	396,77	239,93	382,93	454,38	213,93	464,69	406,40	371,36	343,24	350,76
Tardanza media (s)	21,52	31,72	23,85	31,40	36,85	21,37	40,44	31,78	32,77	31,25	31,30
Tardanza máxima (s)	104,83	290,78	118,37	282,28	330,02	103,45	358,74	301,10	253,10	224,45	232,66
Distancia recorrida zona 1 (m)	10981,90	11123,84	11077,63	11094,42	11168,76	10998,13	11205,82	11130,30	10717,36	10694,57	10684,41
Distancia recorrida zona 2 (m)	12052,38	12097,37	12148,52	12060,05	12195,30	11854,30	11976,08	11923,69	11782,04	11754,02	11741,19

**Tabla 49: Tabla de resultados en el Caso 4 con la variante WHN4-LNGQ-k3**

WHN4-LNGQ-k3	FIFO	SPT	EDD	RC	MS	ATC	SIMSET	SSPT	JSPT	JEDD	JCR
Número de trabajos en plazo	941,17	926,65	932,42	923,63	915,74	941,40	911,21	925,82	916,82	916,57	915,96
Número de trabajos retrasados	21,07	35,73	29,76	38,63	46,50	20,90	51,03	36,52	45,45	45,71	46,24
Tiempo de flujo medio (s)	96,43	95,97	98,52	97,37	100,41	95,93	98,82	96,73	99,40	100,34	100,03
Tiempo de flujo máximo (s)	215,46	396,94	249,78	385,21	447,05	214,31	464,35	407,10	372,68	349,77	333,98
Tardanza media (s)	18,79	49,27	21,04	47,67	57,95	18,55	58,67	49,80	43,65	40,64	37,55
Tardanza máxima (s)	55,81	241,53	67,39	236,81	260,25	55,53	305,53	250,28	197,15	174,36	158,05

En Ferrol a Julio 2020.



Fdo.: Óscar Manuel Castro Martínez.