



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**Modelización y definición de estrategias de
mejora de un sistema de transporte AGV**

Autor:

Arconada del Corte, Inés

Tutores:

De Benito Martín, Juan José

Sanz Angulo, Pedro

**Dpto. de Organización de
Empresas y Comercialización e
Investigación de Mercados**

Valladolid, septiembre 2015.

Resumen

Toda empresa es, por definición, un ente dinámico inmerso en un entorno en constante evolución, por lo que su habilidad para adaptarse a los múltiples cambios que se producen, programados o no, determina su capacidad de supervivencia.

Por otro lado, el auge de los sistemas de información y el desarrollo computacional de los últimos años ha producido una evolución de los métodos de estudio tradicionales en la Ingeniería de Organización, dando lugar al desarrollo de herramientas software, como las de simulación, que pretenden dar respuesta allí donde los métodos tradicionales no alcanzan.

En el presente proyecto se aborda la resolución de un problema real a través del simulador Witness. En concreto, se busca optimizar el sistema de transporte de la línea de producción preparación/terminación situada en la factoría Michelin de Valladolid y que está constituido por vehículos guiados automáticamente (AGV). Se ha estudiado la respuesta del modelo ante diferentes escenarios que simulan cambios programados para, de este modo, plantear diferentes propuestas de mejora en el sistema actual.

Palabras clave

Simulación, Witness, Sistema de Transporte, Modelo, AGV, Sistema de Producción Kanban

Abstract

Every Enterprise is, by definition, a dynamic entity immerse in an environment in constant evolution, therefore its capability to adapt to the multiple changes that arise, planned or not, determines its survival.

On the other hand, the booming of the information systems and the computing development in recent years has brought up an evolution in the traditional means of study in Organization Engineering, this has led to the development of software tools such as simulation tools which are intended to find answers that traditional methods cannot achieve.

The aim of this paper is to deal with the solution of an actual problem by using a Witness simulator. Specifically, the objective is to optimize the transport system in the preparation/completion production line located in the Michelin factory in Valladolid run by automatically guided vehicles (AGV). The model's response in several scenarios, simulating programmed changes, is studied in order to be able to make improvement proposals to the current system.

Key Words

Simulation, Witness, Transport System, Model, AGV, Kanban Production System.

A mi pequeño gran amigo, gracias por todos estos años.

Agradecimientos

En estas líneas me gustaría agradecer a todos aquellos que, de una manera u otra, han formado parte de este proyecto.

A mi familia, por su apoyo durante todos estos años.

A mis amigos, por los buenos momentos y los que aún están por venir.

A Michelin, por la oportunidad de realizar este proyecto dentro de su gran familia; a mi tutor Javier, por sus horas extra de trabajo y a todos mis compañeros, en especial al departamento de ORG.

Agradecer a mis tutores Pedro y Juanjo su ayuda en este proyecto y, en especial, por el esfuerzo en la revisión línea a línea de esta memoria.

Índice de contenido

Introducción	1
Antecedentes	3
Motivación	4
Objetivos	5
Estructura de la memoria	5
1 Mejora de procesos productivos	7
1.1 Introducción	9
1.2 Simulación	10
1.2.1 Razones para simular	13
1.2.2 Modelos de simulación	13
1.2.3 Ventajas y desventajas de la simulación	14
1.2.4 El proceso de simulación	15
1.2.5 Aplicaciones de la simulación	17
1.3 Lenguajes de simulación	17
1.3.1 Ventajas y desventajas de los lenguajes de simulación	18
1.3.2 Lenguajes de simulación específicos	18
1.3.3 Características deseables de un lenguaje de simulación	19
1.3.4 Clasificación del software de simulación	20
1.4 Witness	20
1.4.1 Introducción	21
1.4.2 Características generales del paquete	21
1.4.3 Modelización con Witness	22
1.4.4 Opciones de visualización	26
1.4.5 El reloj de simulación	27
1.4.6 Ejecución de la simulación	28
1.4.7 Modos de simulación	29
1.4.8 Generación de informes	29
1.4.9 Optimizer module	30
1.5 Stat-Fit	30
1.5.1 Utilización de Stat-Fit	30
2 Descripción del sistema	35
2.1 La empresa Michelin	37
2.1.1 Historia del Grupo Michelin SA	38
2.1.2 Michelin España-Portugal	40
2.1.3 Michelin Valladolid	42
2.2 Fabricación del neumático	43
2.2.1 Preparación de los productos semiterminados	45
2.2.2 Ensamblado	45
2.2.3 Cocción	47
2.2.4 Controles	48

2.3	Definición del sistema	48
2.3.1	<i>Descripción de la instalación</i>	48
2.3.2	<i>Entorno espacial</i>	53
2.3.3	<i>Función</i>	53
2.3.4	<i>Formulación del modelo</i>	55
2.3.5	<i>Colección de datos</i>	56
3	Implementación del modelo parte I: Elementos discretos	59
3.1	Piezas	61
3.1.1	<i>Productos</i>	61
3.1.2	<i>Pedidos</i>	64
3.1.3	<i>Baterías</i>	65
3.1.4	<i>Paradas</i>	66
3.2	Máquinas	66
3.2.1	<i>Máquinas de inicialización</i>	66
3.2.2	<i>Máquinas de procesamiento de productos</i>	68
3.2.3	<i>Máquina de cambio de batería</i>	74
3.2.4	<i>Centralita</i>	78
3.2.5	<i>Operarios</i>	82
3.2.6	<i>Averías</i>	89
3.3	Almacenes	93
3.3.1	<i>Almacenes comunes</i>	93
3.3.2	<i>Stocks avanzados</i>	94
3.3.3	<i>Almacén de baterías cambiadas</i>	95
3.3.4	<i>Almacén de pedidos vacíos</i>	96
3.3.5	<i>Almacén de pedidos pendientes</i>	96
3.3.6	<i>Almacén de pedidos atendidos</i>	98
3.4	Vehículos	99
3.5	Tracks	101
3.6	Recursos	107
4	Implementación del modelo parte II: Elementos lógicos, distribuciones y elementos gráficos	111
4.1	Elementos lógicos	113
4.1.1	<i>Atributos</i>	113
4.1.2	<i>Variables</i>	114
4.1.3	<i>Funciones</i>	121
4.2	Distribuciones	131
4.3	Elementos gráficos	131
4.3.1	<i>Gráficos de tarta</i>	131
4.3.2	<i>Series temporales</i>	132
4.3.3	<i>Histogramas</i>	132
5	Explotación del modelo	135
5.1	Verificación	137
5.2	Validación	138
5.2.1	<i>Comparación simulación-estimación</i>	139
5.2.2	<i>Comparación de las salidas del modelo con el sistema real</i>	139
5.2.3	<i>Test de Turing</i>	139

5.2.4	<i>Método Delphi</i>	139
5.2.5	<i>Validación mediante el comportamiento en extremos</i>	140
5.3	Vías de explotación y experimentación	140
5.3.1	<i>Disminución del número de vehículos</i>	140
5.3.2	<i>Aumento del número de vehículos</i>	146
5.3.3	<i>Modificación de la velocidad de los vehículos</i>	147
5.3.4	<i>Adición de nuevas máquinas</i>	151
5.3.5	<i>Disminución del número de vehículos + nuevas máquinas</i>	153
5.3.6	<i>Límites del sistema</i>	155
5.4	Interpretación.....	159
	<i>Disminución del número de vehículos</i>	159
	<i>Aumento del número de vehículos</i>	160
	<i>Modificación de la velocidad de los vehículos</i>	161
	<i>Adición de nuevas máquinas</i>	165
	<i>Límites del sistema</i>	165
6	Estudio económico	167
6.1	Integrantes del equipo de proyecto	169
6.2	Fases del proyecto	169
6.2.1	<i>Fase 1: Definición del proyecto</i>	169
6.2.2	<i>Fase 2: Preparación del modelo</i>	170
6.2.3	<i>Fase 3: Implantación del modelo</i>	170
6.3	Costes de elaboración del proyecto	171
6.3.1	<i>Horas efectivas y tasas horarias del personal</i>	171
6.3.2	<i>Horas dedicadas a cada fase del proyecto</i>	172
6.3.3	<i>Amortización de equipos</i>	172
6.3.4	<i>Coste del material consumible</i>	173
6.3.5	<i>Costes indirectos</i>	173
6.4	Costes asignados a cada fase del proyecto	174
6.4.1	<i>Costes asignados a la Fase 1</i>	174
6.4.2	<i>Costes asignados a la Fase 2</i>	175
6.4.3	<i>Costes asignados a la Fase 3</i>	176
6.5	Coste total del proyecto	176
6.6	Estimación del precio unitario de ventana unitario	177
6.7	Planificación del proyecto.....	177
	Conclusiones y líneas futuras	179
	Conclusiones.....	181
	<i>Optimización de las condiciones de funcionamiento</i>	181
	<i>Ampliación de la instalación</i>	182
	<i>Límites de la instalación. Relación recursos-rendimiento</i>	182
	Líneas futuras	183
	<i>Lógica de gestión de pedidos</i>	183
	<i>Guiado de los vehículos</i>	184
	<i>Almacenamiento de productos</i>	185
	<i>Funcionamiento de máquinas</i>	185
	<i>Integración en toda la fábrica</i>	186
	<i>Límites de la instalación</i>	186

Bibliografía	187
Libros.....	189
Páginas web.....	189
Proyectos Fin de Carrera	190
Manuales.....	190

Índice de figuras

Figura 1.1 El problema de "La aguja de Buffon". Fuente: Lander Simulation	11
Figura 1.2 ENIAC. Fuente: Lander Simulation	12
Figura 1.3 Editor de pantalla	27
Figura 1.4 Editor de iconos.....	27
Figura 1.5 Ventana de configuración del reloj.....	28
Figura 1.6 Ventana de introducción de datos.....	31
Figura 1.7 Botón Auto-Fit	32
Figura 1.8 Configuración de la distribución	32
Figura 1.9 Distribuciones aproximadas	33
Figura 1.10 Distribución ajustada	33
Figura 1.11 Botón de exportación de distribuciones	34
Figura 1.12 Exportación de resultados.....	34
Figura 2.1 Logotipo Michelin. Fuente: Intranet Michelin.....	37
Figura 2.2 Marcas que comercializa el grupo Michelin. Fuente: Intranet Michelin	38
Figura 2.3 Hermanos Michelin. Fuente: 100 años de Bibendum	38
Figura 2.4 Portada de "Le Petit Journal" 1981. Fuente: 100 años de Bibendum.....	40
Figura 2.5 Fábrica de Lasasrte (1970). Fuente: Intranet Michelin	41
Figura 2.6 Distribución de Michelin en la península Ibérica. Fuente: Intranet Michelin	42
Figura 2.7 Fábrica de Valladolid (1975). Fuente: Intranet Michelin	42
Figura 2.8 Arquitectura del neumático. Fuente: Intranet Michelin.....	43
Figura 2.9 Proceso de fabricación del neumático. Fuente: Intranet Michelin	44
Figura 2.10 Actividades de preparación de los semiterminados. Fuente: Diario Motor	45
Figura 2.11 Goma perfilada y aros. Fuente: Diario Motor.....	46
Figura 2.12 Proceso de confección del neumático. Fuente: Diario Motor	46
Figura 2.13 Forma toroidal definitiva del neumático. Fuente: Diario Motor	47
Figura 2.14 Prensas de cocción. Fuente: Diario Motor	47
Figura 2.15 Regulación de las máquinas de preparación.....	49
Figura 2.16 Detector de posición del vehículo. Fuente: Intranet Michelin	51
Figura 2.17 Automatic Guided Vehicle. Fuente: Intranet Michelin	52
Figura 2.18 Logotipo de JBTC. Fuente: JBT Corporation	53
Figura 2.19 Disposición del taller. Fuente: Intranet Michelin.....	54
Figura 3.1 Ventana de configuración de atributos asociados a los elementos productos	61
Figura 3.2 Ventana de configuración del producto JVBL	62
Figura 3.3 Reglas de salida del producto JVBL	63
Figura 3.4 Acciones de comienzo de la máquina BL1	63
Figura 3.5 Representación gráfica de la pieza pedido	64
Figura 3.6 Ventana de configuración de la pieza pedido	64
Figura 3.7 Regla de salida del elemento pedido	65
Figura 3.8 Icono del elemento batería	65
Figura 3.9 Ventana de configuración del elemento batería.....	66
Figura 3.10 Máquinas de inicialización.....	67
Figura 3.11 Ventana de configuración de la máquina de inicialización del producto BVGI	67
Figura 3.12 Reglas de entrada de la máquina M_ini_BVGI	68
Figura 3.13 Regla de salida de la máquina M_ini_BVGI.....	68
Figura 3.14 Representación gráfica de la máquina CG2	69
Figura 3.15 Ventana de configuración de la máquina CG2_ITM	69
Figura 3.16 Regla de recursos para la máquina esclava CG2_TM	70
Figura 3.17 Representación gráfica de la máquina MC1	70
Figura 3.18 Ventana de configuración de la máquina MC1	71
Figura 3.19 Regla de recurso para la máquina MC1_IGI.....	72
Figura 3.20 Ventana de configuración de la máquina MC1_GI	72
Figura 3.21 Regla de recurso para la máquina MC1_GI.....	72
Figura 3.22 Configuración de averías I de la máquina MC1_GI	73
Figura 3.23 Configuración de averías II de la máquina MC1_GI	73

Figura 3.24 Representación gráfica de la máquina de cambio de batería.....	74
Figura 3.25 Ventana de configuración de la máquina de cambio de batería.....	75
Figura 3.26 Regla de entrada de la máquina de cambio de batería.....	75
Figura 3.27 Acciones de comienzo de la máquina de cambio de batería.....	76
Figura 3.28 Regla de salida de la máquina de cambio de batería.....	76
Figura 3.29 Acciones de salida de la máquina de cambio de batería.....	77
Figura 3.30 Ventana de configuración de la vía BATSWP_D.....	77
Figura 3.31 Representación gráfica de la máquina centralita.....	78
Figura 3.32 Ventana de configuración de la máquina centralita.....	79
Figura 3.33 Regla de entrada de la máquina centralita.....	79
Figura 3.34 Acciones de entrada de la máquina centralita.....	80
Figura 3.35 Regla de salida de la máquina centralita.....	81
Figura 3.36 Mensaje de asignación de un pedido en la ventana de interacción.....	81
Figura 3.37 Mensaje de asignación de cambio de batería en la ventana de interacción.....	82
Figura 3.38 Representación gráfica del operario de abastecimiento de la máquina CG2.....	83
Figura 3.39 Ventana de configuración del operario OP_ABA.CG2.BVTM.....	83
Figura 3.40 Regla de entrada del operario OP_ABA.CG2.BVTM.....	84
Figura 3.41 Acciones a la entrada del operario OP_ABA.CG2.BVTM.....	84
Figura 3.42 Acciones de comienzo del operario OP_ABA.CG2.BVTM.....	85
Figura 3.43 Acciones de comienzo del operario OP_ABA.BL1.....	85
Figura 3.44 Regla de salida del operario OP_ABA.CG2.BVTM.....	86
Figura 3.45 Acciones a la salida del operario OP_ABA.CG2.BVTM.....	86
Figura 3.46 Mensaje de pedido de aprovisionamiento en la ventana de interacción.....	87
Figura 3.47 Ventana de configuración del operario OP_EVA.CG2.BLTM.....	87
Figura 3.48 Acciones de comienzo del operario de evacuación OP_EVA.CG2.BLTM.....	88
Figura 3.49 Acciones de comienzo del operario OP_EVA.BL2.....	88
Figura 3.50 Mensaje de pedido de evacuación en la ventana de interacción.....	89
Figura 3.51 Representación gráfica de la máquina averías.....	89
Figura 3.52 Ventana de configuración de la máquina averías.....	90
Figura 3.53 Regla de entrada de la máquina averías.....	90
Figura 3.54 Acciones de comienzo de la máquina averías.....	91
Figura 3.55 Regla de salida de la máquina averías.....	92
Figura 3.56 Acciones de salida de la máquina averías.....	92
Figura 3.57 Ventana de configuración del almacén CR_JVBL.....	93
Figura 3.58 Acciones de entrada del almacén CR_JVBL.....	94
Figura 3.59 Acciones de salida del almacén CR_JVBL.....	94
Figura 3.60 Representación gráfica del SA de la máquina CG1 del producto BLTM.....	95
Figura 3.61 Ventana de configuración del buffer SA.CG1.BLTM.....	95
Figura 3.62 Representación gráfica del almacén de aterías cambiadas.....	96
Figura 3.63 Ventana de configuración del almacén de pedidos vacíos.....	96
Figura 3.64 Ventana de configuración del almacén de pedidos pendientes.....	97
Figura 3.65 Acciones de entrada del buffer pedidos_pendientes.....	97
Figura 3.66 Acciones de salida del almacén pedidos_pendientes.....	98
Figura 3.67 Ventana de configuración del almacén de pedidos_atendidos.....	99
Figura 3.68 Representación gráfica del elemento vehículo.....	99
Figura 3.69 Leyenda de colores del elemento AGV.....	100
Figura 3.70 Ventana de configuración de AGV.....	100
Figura 3.71 Regla de entrada de los vehículos.....	101
Figura 3.72 Representación gráfica del elemento track.....	101
Figura 3.73 Ventana de configuración del track BAAfAg.....	102
Figura 3.74 Acciones a la entrada del track BAAfAg.....	103
Figura 3.75 Regla de salida del track BAAfAg.....	103
Figura 3.76 Regla de salida de la vía PAML.....	104
Figura 3.77 Ventana de configuración de descarga de la vía BAAfAg.....	104
Figura 3.78 Regla de descarga del track BAAfAg.....	105
Figura 3.79 Acciones de descarga de la vía BAAfAg.....	105
Figura 3.80 Ventana de configuración de carga del elemento BAAfAg.....	106
Figura 3.81 Regla de carga del elemento BAAfAg.....	106
Figura 3.82 Representación gráfica del elemento recurso.....	107

Figura 3.83 Ventana de configuración del elemento recurso	107
Figura 3.84 Recursos asociados a las máquinas esclavas en su ciclo de funcionamiento	108
Figura 3.85 Recursos asociados a la máquina central durante avería	109
Figura 4.1 Ventana de configuración del atributo producto	113
Figura 4.2 Representación gráfica de los valores de la variable carro	114
Figura 4.3 Representación gráfica de la variable localización	116
Figura 4.4 Representación gráfica de la variable maq	117
Figura 4.5 Representación gráfica de la variable material	117
Figura 4.6 Ventana de configuración de la variable Nom_TRACK	118
Figura 4.7 Actualización de la variable VAR_PARO en las máquinas de preparación	121
Figura 4.8 Ventana de configuración de la función DEJAR_SA_BA	122
Figura 4.9 Cuerpo de la función COGER_SA_BA	123
Figura 4.10 Ventana de configuración de la función LLAMADA_CENTRALITA	124
Figura 4.11 Cuerpo de la función LLAMADA_CENTRALITA	124
Figura 4.12 Variables de información de los vehículos	125
Figura 4.13 Llamada a la función ACT_VALORES_DSCRG	125
Figura 4.14 Ventana de configuración de la función ACT_VALORES_DSCRG	126
Figura 4.15 Cuerpo de la función ACT_VALORES_DSCRG	126
Figura 4.16 Llamada a la función APARCAR	127
Figura 4.17 Ventana de configuración de la función APARCAR	127
Figura 4.18 Mensaje de envío a parking en la ventana de interacción	129
Figura 4.19 Ventana de configuración de la función CONTADOR_DSCRG	130
Figura 4.20 Cuerpo de la función CONTADOR_DSCRG	130
Figura 4.21 Tiempo de ciclo de la máquina CG2_ITM	131
Figura 4.22 Gráfico de tarta de la utilización de los vehículos	132
Figura 4.23 Serie temporal del nivel de stock	132
Figura 4.24 Histograma del tiempo de espera de los pedidos	133
Figura 5.1 Ejemplo de traza exportada de Witness	137
Figura 5.2 Resultado de experimento 1 con 8 AGV III	145
Figura 5.3 Localización de las nuevas máquinas	152
Figura 5.4 Gráfico del nivel de stock y del nivel de pedidos I	156
Figura 5.5 Gráfico del nivel de stock y del nivel de pedidos II	157
Figura 5.6 Histograma de pedidos I	158
Figura 5.7 Histograma de pedidos II	158
Figura 5.8 Comparativa de tiempos en relación a la disminución del número de vehículos	160
Figura 5.9 Comparativa de tiempos en relación al aumento del número de vehículos	161
Figura 5.10 Comparativa de tiempos en relación al aumento de velocidad del 10%	162
Figura 5.11 Comparativa de tiempos en relación al aumento de velocidad del 25%	163
Figura 5.12 Comparativa de tiempos en relación a la reducción de velocidad del 10%	163
Figura 5.13 Comparativa de tiempos medios con 11 vehículos	164
Figura 5.14 Comparativa de tiempos medios con 10 vehículos	164
Figura 5.15 Comparativa de tiempos medios con 9 vehículos	165
Figura 6.1 Fases del proyecto	171
Figura 6.2 Gráfico de costes asociados a la Fase 1	175
Figura 6.3 Gráfico de costes asociados a la Fase 2	175
Figura 6.4 Gráfico de costes asociados a la Fase 3	176
Figura 6.5 Gráfico de coste total del proyecto por etapas	177
Figura 6.6 Gantt del proyecto	178

Índice de tablas

Tabla 1.1 Ventajas de la simulación	14
Tabla 1.2 Desventajas de la simulación	14
Tabla 1.3 Ventajas de los modelos de simulación	14
Tabla 1.4 Desventajas de los modelos de simulación	15
Tabla 1.5 Ventajas de los lenguajes de simulación	18
Tabla 1.6 Inconvenientes de los lenguajes de simulación	18
Tabla 1.7 Ventajas de los lenguajes de propósito general	18
Tabla 2.1 Máquinas de preparación	48
Tabla 2.2 Máquinas de confección/terminación	49
Tabla 2.3 Productos de entrada y salida	50
Tabla 2.4 Datos del AGV	56
Tabla 2.5 Datos máquina	56
Tabla 2.6 Datos almacén	56
Tabla 2.7 Datos vías	57
Tabla 2.8 Tabla de toma de datos por observación directa	57
Tabla 2.9 Tabla de toma de datos de tiempos de ciclo y averías	57
Tabla 3.1 Representación gráfica de los productos	62
Tabla 5.1 Comparación simulación-estimación	139
Tabla 5.2 Resultado experimento 1 con 11 AGV I	141
Tabla 5.3 Resultado de experimento 1 con 11 AGV II	141
Tabla 5.4 Resultado de experimento 2 con 11 AGV I	141
Tabla 5.5 Resultado de experimento 2 con 11 AGV II	141
Tabla 5.6 Resultado de experimento 3 con 11 AGV I	142
Tabla 5.7 Resultado de experimento 3 con 11 AGV II	142
Tabla 5.8 Resultado de experimento 1 con 10 AGV I	142
Tabla 5.9 Resultado de experimento 1 con 10 AGV II	142
Tabla 5.10 Resultado de experimento 2 con 10 AGV I	142
Tabla 5.11 Resultado de experimento 2 con 10 AGV II	143
Tabla 5.12 Resultado de experimento 3 con 10 AGV I	143
Tabla 5.13 Resultado de experimento 3 con 10 AGV II	143
Tabla 5.14 Resultado de experimento 1 con 9 AGV I	143
Tabla 5.15 Resultado de experimento 1 con 9 AGV II	143
Tabla 5.16 Resultado de experimento 2 con 9 AGV I	144
Tabla 5.17 Resultado de experimento 2 con 9 AGV II	144
Tabla 5.18 Resultado de experimento 3 con 9 AGV I	144
Tabla 5.19 Resultado de experimento 3 con 9 AGV II	144
Tabla 5.20 Resultado de experimento 1 con 8 AGV I	144
Tabla 5.21 Resultado de experimento 1 con 8 AGV II	145
Tabla 5.22 Resultado de experimento 2 con 8 AGV I	145
Tabla 5.23 Resultado de experimento 2 con 8 AGV II	146
Tabla 5.24 Resultado de experimento 3 con 8 AGV I	146
Tabla 5.25 Resultado de experimento 3 con 8 AGV II	146
Tabla 5.26 Resultado de experimento 1 con 12 AGV I	146
Tabla 5.27 Resultado de experimento 1 con 12 AGV II	146
Tabla 5.28 Resultado de experimento 2 con 12 AGV I	147
Tabla 5.29 Resultado de experimento 2 con 12 AGV II	147
Tabla 5.30 Resultado de experimento 3 con 12 AGV I	147
Tabla 5.31 Resultado de experimento 3 con 12 AGV II	147
Tabla 5.32 Resultado experimento 1 con velocidad actual	148
Tabla 5.33 Resultado experimento 2 con velocidad actual	148
Tabla 5.34 Resultado de experimento 3 con velocidad actual	148
Tabla 5.35 Resultado experimento 1 con aumento de velocidad un 10%	148
Tabla 5.36 Resultado experimento 2 con aumento de velocidad un 10%	149
Tabla 5.37 Resultado experimento 3 con aumento de velocidad un 10%	149

Tabla 5.38 Resultado de experimento 1 con aumento de velocidad un 25%	149
Tabla 5.39 Resultado de experimento 2 con aumento de velocidad un 25%	149
Tabla 5.40 Resultado de experimento 3 con aumento de velocidad un 25%	150
Tabla 5.41 Resultado de aumento de velocidad un 25% con 8 AGV	150
Tabla 5.42 Resultado de experimento 1 con reducción de la velocidad un 10%	150
Tabla 5.43 Resultado de experimento 2 con reducción de la velocidad un 10%	150
Tabla 5.44 Resultado de experimento 3 con reducción de la velocidad un 10%	151
Tabla 5.45 Características máquina BA3	151
Tabla 5.46 Características de la máquina BD5	151
Tabla 5.47 Resultado experimento 1 adición máquinas I	152
Tabla 5.48 Resultado experimento 1 adición máquinas II	152
Tabla 5.49 Resultado experimento 2 adición máquinas I	153
Tabla 5.50 Resultado experimento 2 adición máquinas II	153
Tabla 5.51 Resultado experimento 3 adición máquinas I	153
Tabla 5.52 Resultado experimento 3 adición máquinas II	153
Tabla 5.53 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 10 AGV I	153
Tabla 5.54 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 10 AGV II	154
Tabla 5.55 Resultado experimento 2 adición nuevas máquinas y 10 AGV I	154
Tabla 5.56 Resultado experimento 2 adición de nuevas máquinas y 10 AGV II	154
Tabla 5.57 Resultado experimento 3 adición nuevas máquinas y 10 AGV I	154
Tabla 5.58 Resultado experimento 3 adición nuevas máquinas y 10 AGV II	154
Tabla 5.59 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 9 AGV I	154
Tabla 5.60 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 9 AGV II	155
Tabla 5.61 Resultado experimento 2 adición nuevas máquinas y 9 AGV I	155
Tabla 5.62 Resultado experimento 2 adición nuevas máquinas y 9 AGV II	155
Tabla 6.1 Días laborables efectivos anuales	172
Tabla 6.2 Semanas laborables efectivas anuales	172
Tabla 6.3 Coste horario y semanal del equipo de profesionales	172
Tabla 6.4 Horas dedicadas por profesional a cada fase del proyecto	172
Tabla 6.5 Coste de los equipos y software utilizados	173
Tabla 6.6 Amortización de los equipos y del software	173
Tabla 6.7 Coste del material consumible por persona	173
Tabla 6.8 Costes indirectos	174
Tabla 6.9 Costes asignados a la Fase 1	174
Tabla 6.10 Costes asignados a la Fase 2	175
Tabla 6.11 Costes asignados a la Fase 3	176
Tabla 6.12 Coste total del proyecto	176
Tabla 6.13 Desglose del P.V.P del proyecto	177

Introducción

Antecedentes

La realización del proyecto titulado “Modelización y definición de estrategias de mejora de un sistema de transporte AGV en la factoría Michelin de Valladolid” conlleva el estudio de una parte del amplio proceso de fabricación del neumático de turismo. En concreto la zona de preparación y confección/terminación, lugar donde se realiza la fabricación de los diferentes productos existentes en el neumático y el ensamblado de todos ellos dando forma a lo que se conoce como carcasa, es decir, el neumático sin cocer.

Para el estudio de los procesos existen multitud de métodos tradicionales que, en la mayoría de los casos, son capaces de garantizar un dominio aceptable del proceso y un buen análisis para su posterior mejora. Por otro lado, encontramos ciertos procesos más complejos que exigen un control muy detallado del proceso para minimizar los costes de fabricación, mejorar el rendimiento de los equipos, aumentar la rentabilidad de la fábrica, o conocer de forma detallada las posibles evoluciones que puede sufrir ante determinados cambios en el sistema.

Dicha instalación está formada por una gran cantidad de máquinas pero las que interesan son únicamente diecisiete, aquellas que trabajan con el sistema de transporte AGV. Las máquinas se denominan: CG1, CG2, CT1, DLR, BL1, BL2, DO2, MC1, MC2, MC3, MF1, MF2, BNS1, BN2, BNS4, BNS5 y BNS6. Todas las máquinas cuentan con un stock avanzado donde se almacenan los materiales que se incorporan a la máquina, denotado por “SA_##_**”, donde ## corresponde al nombre de la máquina y ** hace referencia al nombre de los materiales de entrada o salida.

Dividimos las máquinas en dos grandes grupos, un primer bloque denominado preparación y un segundo bloque llamado confección/terminación. Las máquinas de preparación procesan los materiales que luego utilizarán las máquinas de confección/terminación. Entre ellas se sitúan los almacenes generales, donde las máquinas del bloque preparación depositan productos terminados que posteriormente son retirados por las máquinas de confección/terminación para utilizarlas como producto de entrada.

El aprovisionamiento y evacuación de materiales (desde stock avanzado de las máquinas hasta los almacenes comunes y viceversa) se realiza a través de un sistema de transporte AGV (*Automatic Guided Vehicle*) que actualmente cuenta con once vehículos. La incorporación de material desde el SA hasta la máquina donde se utiliza lo realizarán los distintos operarios encargados de las máquinas.

Por otro lado, la implantación de este sistema de transporte AGV en el mundo Michelin es, de momento, un prototipo. La factoría de Valladolid es la única fábrica en todo el mundo Michelin que cuenta con este sistema, de ahí la importancia del estudio, conseguir un sistema óptimo y que aporte valor a la fábrica a fin de exportarlo a las demás empresas del grupo.

Cabe añadir que el puesto de carrista manual es un puesto de poco valor añadido y se busca automatizar el sistema por dos razones; en primer lugar para destinar aquellos operarios a tareas de mayor valor y con mayor progresión y desarrollo personal y, en segundo lugar, para dotar de mayor seguridad a los trabajadores reduciendo las vibraciones que éstos sufren y disminuyendo el tráfico existente en la zona de producción y evitar así accidentes.

Motivación

Una instalación industrial es, por la naturaleza, un sistema dinámico que se encuentra sometido a numerosos cambios, ya sean programados o no, que afectan al rendimiento y a la capacidad de fabricación. En los cambios programados podemos destacar los cambios de volumen de producción (fruto de la planificación por parte de la dirección), las ampliaciones de la fábrica en cuanto a volumen de maquinaria se refiere, los cierres de secciones de la instalación, la automatización de procesos, el aumento de carga de trabajo de los sistemas de transporte etc. En cambios no programados se incluyen averías, ensayos, paradas de mantenimiento, calibraciones, reglajes, averías, cambios de dimensión etc.

Todos estos cambios se traducen en pérdidas de rendimiento y reducción de la rentabilidad de la empresa, es por tanto vital detectar estos cambios, estudiar sus posibles efectos y tratar de paliarlos en la medida de lo posible para obtener el máximo beneficio.

La facilidad de adelantarse a los cambios y de prever sus consecuencias marca la capacidad de supervivencia y de mejora de la empresa frente a sus competidores. El estudio de cómo puedan afectar diferentes cambios a nuestra instalación será por tanto el foco de análisis de este estudio así como la mejora de los rendimientos actuales y futuros.

Resulta interesante conocer, además de los límites de producción de las máquinas, los límites de volumen de transporte de nuestro sistema. Una mejora en el volumen de producción de las máquinas caería en saco roto si ello no va acompañado de una mejora de volumen de transporte de nuestro sistema AGV, por tanto la evolución de ambos componentes del sistema debe ir de la mano.

Se comprueba que en muchos procesos las herramientas tradicionales de organización industrial no son suficientes para la realización de un estudio correcto que derive en la optimización de dichos procesos, por tanto en el presente proyecto se utilizan herramientas informáticas de simulación a fin de obtener resultados más detallados que los que se obtendrían utilizando dichos métodos tradicionales.

Gran número de empresas vienen realizando acciones ligadas a la mejora de su competitividad a través de varios caminos: automatización de procesos operativos, racionalizando y simplificando procesos administrativos y mejorando la eficiencia de las diferentes funciones de la empresa. Si bien estas medidas no han dado el resultado esperando debido a que, en muchos casos, la automatización se realiza sin explotar todas las posibilidades y sin tener una visión global de sus consecuencias.

Estas herramientas informáticas de simulación proporcionan la posibilidad de dominar todas las variables que se consideren necesarias para la modelización del sistema y la utilización de tantos recursos como sean necesarios lo que significa mayor veracidad de los resultados obtenidos. Permiten, además, introducir cambios en el sistema de manera fácil y rápida e incluso sobre la marcha de la propia simulación.

Por lo expuesto anteriormente, este proyecto pretende dar respuesta allí donde los métodos tradicionales de análisis de organización industrial no llegan y sólo ofrecen unos resultados que en la mayoría de los casos sólo pueden ser aproximados y no suficientes para una posterior actuación sobre el sistema, además de una optimización de los recursos de la empresa a fin de exportar este proyecto al resto de fábricas del grupo Michelin.

Objetivos

La realización del proyecto titulado “Modelización y definición de estrategias de mejora de un sistema de transporte AGV en la factoría Michelin de Valladolid” conlleva el estudio de una instalación cuyo objetivo es la mejora de los rendimientos actuales y el estudio de los posibles cambios que puedan afectar a la instalación así como la forma de sacar el máximo rendimiento futuro. Estos objetivos pueden desglosarse en tres puntos fundamentales: optimización de las condiciones de funcionamiento, ampliación de la instalación y límites de la instalación. Relación recursos-rendimiento, que desarrollaremos brevemente a continuación.

Optimización de las condiciones de funcionamiento: a través de la simulación y la modificación de diferentes parámetros, por ejemplo número de carros o velocidad de desplazamiento, se busca optimizar el funcionamiento del sistema actual; a fin de mejorar los tiempos de producción y evitar paradas de máquinas por fallos en el sistema de transporte.

Ampliación de la instalación: se pretende obtener datos cuantitativos en lo referente al número necesario de AGV en caso de que se produzca un aumento de maquinaria de producción que funciona con este sistema así como del número de productos transportados. Con ello se pretende estimar cómo debería evolucionar nuestro sistema de transporte en función a la planificación a largo plazo del volumen de maquinaria que trabajase con este sistema y prevenir así posibles cambios. Todo ello como ayuda a la planificación futura de la empresa.

Límites de la instalación. Relación recursos-rendimiento: a través de la modelización del sistema se evalúa la capacidad máxima de producción de la instalación en las condiciones actuales a través de un aumento continuado del volumen de producción hasta la saturación del sistema. A través de este estudio se pretende determinar en qué momento el sistema de transporte actual dejaría de ser útil y qué soluciones podrían solucionar los problemas que se encuentre. Podría obtenerse una previsión temporal teniendo en cuenta el aumento anual de producción de la planta.

Todo ello supondrá una mejora de la planificación y un aumento del rendimiento y por tanto se traducirá en un beneficio económico para la empresa. De la misma forma evitará los costes derivados de sucesivos cambios producidos por los ajustes que se realizarían sobre la marcha para tratar de amoldar el sistema de transporte al volumen de producción actual.

Quedan fuera del análisis de este proyecto el estudio del circuito posterior y anterior a esta instalación, los análisis de almacenes posteriores y anteriores a dicha instalación, la optimización de los ciclos de máquinas.

Estructura de la memoria

El análisis de nuestra instalación se realiza a través de la utilización de la simulación informática, el presente proyecto comprende los siguientes capítulos:

En el primer capítulo titulado “*Mejora de procesos productivos*” donde se trata la importancia de la mejora constante y la evolución de la empresa y los sistemas productivos así como las diferentes

herramientas con las que cuenta la industria moderna para la mejora de los procesos de fabricación y especialmente de la potente herramienta como es la simulación, haciendo especial hincapié en Witness, el programa utilizado para la simulación.

El segundo capítulo titulado *“Descripción del sistema”* se explica el sistema objeto de estudio comenzando con una visión global del grupo Michelin y del proceso de fabricación del neumático y acabando con una descripción detallada del sistema, el modo de funcionamiento de la misma y los datos necesarios para la creación de un modelo válido.

El tercer capítulo denominado *“Implementación del modelo parte I: Elementos discretos”* recoge la definición de todos los elementos discretos que forman parte del modelo, es decir, los elementos tangibles que forman parte del sistema.

El cuarto capítulo titulado *“Implementación del modelo parte II: Elementos lógicos, distribuciones y elementos gráficos”* recoge el conjunto de reglas lógicas y elementos (atributos, variables y funciones) que controlan la instalación simulada. Así como las distribuciones utilizadas a fin de dar variabilidad al sistema y el conjunto de elementos gráficos que aportan información al usuario de la simulación.

En el quinto capítulo titulado *“Explotación del modelo”* se incluyen las etapas de verificación y validación y, además, expone los diferentes escenarios a los cuales se ha sometido la instalación.

El sexto capítulo denominado *“Estudio económico”* incluye un análisis del coste que supone la realización del presente proyecto, además de la estructuración y planificación del proyecto.

Le sigue el capítulo titulado *“Conclusiones y líneas futuras”* se exponen los resultados obtenidos así como sugerencias de líneas de trabajo para la continuación del proyecto.

A continuación le sigue la bibliografía empleada en el presente proyecto.

1 Mejora de procesos productivos

En el presente capítulo se realiza un acercamiento al entorno industrial así como de su evolución desde los sistemas tradicionales de producción, haciendo especial hincapié en la utilidad de la simulación. Se comienza por un breve repaso histórico desde su nacimiento hasta la actualidad y se muestra como una herramienta de gran utilidad a la hora de anticiparse a estos cambios constantes que sufre el entorno industrial. Se tratarán, además, los diferentes modelos de simulación existentes (continuos o discretos, estáticos o dinámicos o los modelos deterministas frente a los modelos estocásticos), las ventajas y desventajas a la hora de enfrentar problemas a través de la simulación frente a otros métodos clásicos y se describirán las diferentes etapas necesarias en todo proceso de simulación así como su amplio campo de aplicación. Dentro de todos los softwares de simulación existentes, se describirá el programa Witness, dado que es la herramienta elegida en la realización de este proyecto. Por último, se analizarán brevemente los principales errores a la hora de acometer un proyecto de simulación.

1.1 Introducción

Bajo una concepción tradicional de los sistemas productivos se enfocaba a las empresas al aumento del volumen de producción tratando de disminuir el coste marginal buscando así una mejora continua de la productividad. Se trataba de sistemas productivos que operaban en mercados estables y con demanda creciente, la variedad de los productos era mínima y se mantenían en el mercado durante varios ciclos de vida, al igual que los precios, que se mantenían estables durante largos periodos de tiempo. Además, los mercados se encontraban muy compartimentados.

Si bien se han producido una serie de cambios en los recursos utilizados por estos sistemas productivos:

- La mano de obra: el número de horas asignadas al trabajador ha ido disminuyendo debido a la constante automatización de los sistemas productivos.
- Los equipos: la inversión por parte de las empresas en sistemas informáticos ha significado un aumento de la productividad.
- Los materiales: ante la escasez de productos sofisticados muchos sistemas productivos recurrieron a la integración vertical lo que ha originado la disminución de la importancia del aprovisionamiento, si bien ha derivado en un aumento de los stocks internos de la empresa, lo que lleva unido un coste de financiación a tener en cuenta.
- La información: en el enfoque tradicional ya se destaca la importancia y la necesidad del conocimiento de la demanda a fin de determinar la capacidad productiva de la empresa. Con estas previsiones se configura el sistema productivo a fin de satisfacer dicha demanda.

Este entorno estable no se ha mantenido a lo largo de los años; los mercados a principios de los setenta eran mercados sin saturación y en constante crecimiento y, por tanto, con una demanda creciente. Los departamentos de marketing cobraron importancia frente a los departamentos de producción, lo que derivó en un aumento de introducción de productos y por tanto en una saturación del mercado. La globalización de los mercados lleva asociada la globalización de la competencia. Los clientes son cada vez más exigentes en lo referente a calidad, precio, rapidez, variedad, etc. y se tiene cada vez más en cuenta las condiciones del servicio con que se suministra. La calidad pasa de ser una ventaja competitiva a ser un requisito para sobrevivir en el mercado. La exigencia de una mayor rapidez de respuesta también afecta al diseño de los productos lo que origina, fruto de la evolución tecnológica y de la fuerte presión competitiva, una disminución del ciclo de vida de los mismos.

Las empresas deben hacer frente a esa realidad; los productos quedan obsoletos rápidamente y deben satisfacer la demanda de los consumidores. Las empresas deben crear nuevos productos que sustituyan los ya obsoletos a la misma velocidad que estos se van desechando. Ello ha provocado que la mejora de los procesos productivos de las empresas sea ahora de gran importancia y se dediquen gran cantidad de recursos en busca de la mejora constante de los procesos productivos.

Durante los años ochenta las empresas centraron su atención en la mejora de sus procesos (MRP *Material Requirements Planning*), en la reducción de inventarios, mejora del tiempo de entregas (JIT *Just In Time*), gestión de los canales logísticos tanto de aprovisionamientos como de distribución y en la mejora de la calidad, tanto de productos como de servicios.

La ventaja competitiva de una empresa frente a sus competidores depende, cada vez en mayor medida, de una gestión adecuada de su proceso de producción, de la implementación de nuevas técnicas de calidad o de su capacidad innovadora. Son las empresas que mayor tasa de crecimiento tienen actualmente las que investigan tanto en la mejora de los productos como en la mejora de los procesos. Es en esta búsqueda de mejoras donde resulta fundamental el papel de la Ingeniería de Organización.

Los problemas tratados en Ingeniería de Organización son extremadamente variados, si bien tienen en común la optimización de un sistema que opera con diferentes recursos limitados, que se encuentra sujeto a una serie de restricciones y eliminando los principales inconvenientes (desperdicios de materiales, maximizando ganancias y minimizando costes, tiempo y esfuerzo humano requerido, etc.). La Ingeniería de Organización se ocupa del rediseño de instalaciones, programación de actividades, eliminación de cuellos de botella, programación de recursos, mejora de métodos, optimización de procesos, etc.

Estos problemas se pueden abordar de diferentes maneras, una de ellas es mediante el estudio de modelos exactos. Dentro de los modelos exactos se encuentran, por ejemplo, la teoría de colas, la programación lineal o la programación dinámica. Estos modelos exactos permiten obtener la mejor solución del problema que se estudia; por ello son preferibles estas técnicas frente a otras.

No obstante, en algunas ocasiones la complejidad de los sistemas hace que la formulación de un problema exacto se presente inviable. En numerosas ocasiones no es factible representar la operativa del sistema en términos analíticos o no es posible su expresión en términos suficientemente sencillos. En caso de que se llegara a la formulación del sistema, por muy complejo que fuera, puede ocurrir que la obtención de soluciones no se consiga en un tiempo de computación aceptable.

En situaciones como estas entra en juego la simulación, que nos permite la obtención de soluciones aceptables en tiempos de computación mucho más razonables. La simulación es especialmente adecuada en sistemas complejos y de carácter dinámico en los que, además, entran en juego fenómenos de carácter estocástico.

1.2 Simulación

Simular consiste en *imitar* el funcionamiento de un sistema real objeto de nuestro interés. Shubik presenta la siguiente definición para la simulación: “*Simulación de un sistema (o un organismo) es la operación de un modelo (simulador), el cual es una representación del sistema. Este modelo puede sujetarse a manipulaciones que serían imposible de realizar, demasiado costosas o imprácticas*”.

Por su parte Thomas Naylor presenta esta otra definición: “*Simulación, es una técnica numérica para conducir experimentos de una computadora digital, las cuales requieren ciertos tipos de modelos*”.

lógicos y matemáticos, que describen en comportamiento de un negocio o un sistema económico (o algún componente de ellos) en periodos extensos de tiempo real".

Se considera que la simulación nace en 1777 con el problema de "La aguja de Buffon" planteado por Claudio Rocchini Buffon. Se trata de un método matemático muy sencillo para ir aproximando el valor de π a partir de iteraciones sucesivas. Este método matemático consiste en una aguja de una longitud determinada lanzada sobre un plano segmentado por líneas paralelas separadas por unidades, como se observa en la **Figura 1.1**, y se estudia la probabilidad de que la aguja cruce la línea.

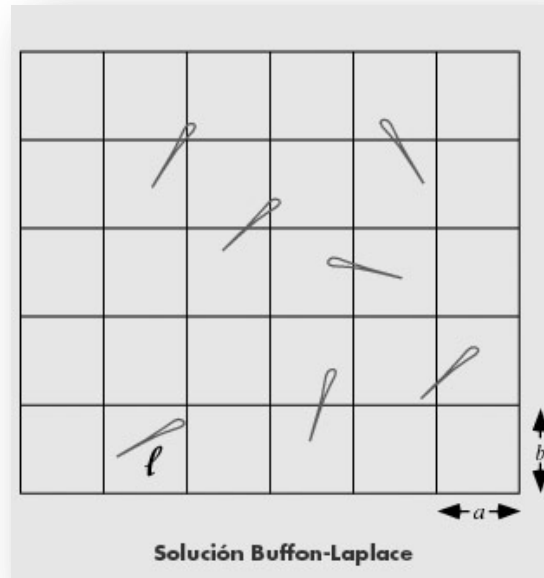


Figura 1.1 El problema de "La aguja de Buffon". Fuente: Lander Simulation

Años más tarde, en 1812 Laplace mejoró el método corrigiendo la solución de Buffon, que en la actualidad se conoce como solución Buffon-Laplace. Posteriormente el estadístico William Sealy Gosset tenía gran interés en el cultivo de la cebada y el diseño de experimentos para mejorar su robustez derivó en la que se conoce como la "distribución t de Student". Este hito histórico abrió las puertas a la simulación en el campo de la ingeniería industrial, basada en la experimentación y en técnicas de análisis a fin de resolver problemas clásicos de la industria y la ingeniería.

A mediados de los años 40 del pasado siglo dos hechos resultaron clave para la evolución del campo de la simulación: la creación de la primera computadora de propósito general llamada ENIAC (**Figura 1.2**) y el trabajo realizado conjuntamente entre Stanislaw Ulam y Jhon Von Neumann, utilizando el método de Montecarlo en computadoras modernas para la resolución de problemas de difusión de neutrones en la construcción de la bomba de hidrógeno.

En el año 1960 Keith Douglas Tocher diseñó un programa de simulación general cuya función era simular una planta de producción donde las máquinas ciclaban por estados: esperando, ocupado, no disponible y fallo. Este trabajo derivó en el primer libro sobre simulación: *The Art of Simulation* en 1963.

Entorno a aquellos años (1960-1961) el IBM desarrolló el Sistema de Simulación de propósito general o General Purpose Simulation System (GPSS). Este sistema se diseñó para simular teleprocesos involucrando, por ejemplo, el control del tráfico urbano o la gestión de llamadas de teléfono.

En 1961 el Royal Norwegian Computing Center desarrollaron el programa SIMULA con ayuda de Univac. Nació SIMULA I, que es probablemente el lenguaje de programación más importante de la historia. Por su parte, en 1963 se desarrolló otra alternativa al General Purpose Simulation System basada en Fortran y llamada SIMSCRIPT, más enfocada a usuarios no expertos en informática.

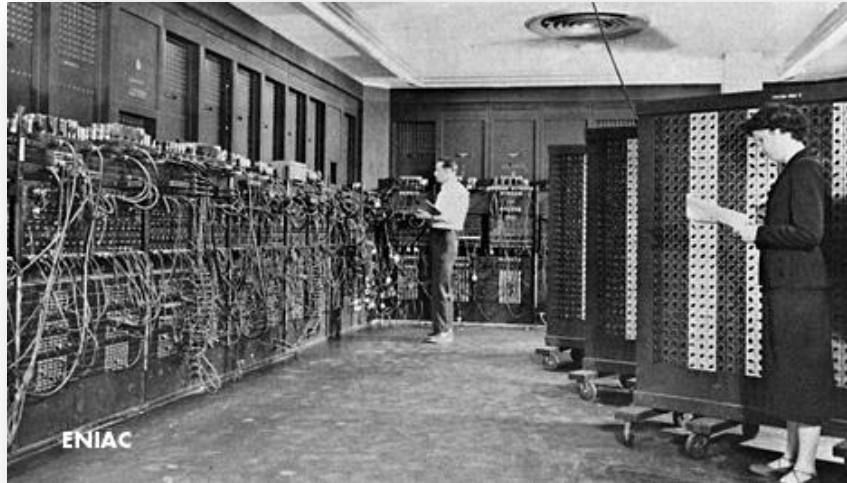


Figura 1.2 ENIAC. Fuente: Lander Simulation

Durante este periodo se produjeron grandes avances en las herramientas de modelado y en el estudio de resultados. Tradicionalmente los datos de salida fruto de la simulación se mostraban en una matriz para mostrar el efecto que tenían los cambios en los parámetros. Se demostró que los seres humanos percibían mejor los cambios a través de gráficos o imágenes en movimiento y ello derivó en las diversas opciones gráficas que a través de animaciones muestran los cambios de estado de los sistemas.

Desde que a finales de los años cuarenta Von Neumann y Ulam crearan el término “análisis de Montecarlo” y con el desarrollo que sufrieron las computadoras en los años siguientes la aplicación de estas técnicas se ha ido generalizando hasta convertirse en una de las técnicas más usadas por la Ingeniería de Organización. Estas técnicas son especialmente recomendables para la optimización de métodos y procesos actuales y el estudio de la evolución del sistema ante determinados cambios antes de que se realicen dichos cambios.

La simulación de Montecarlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad de las computadoras de generar números pseudoaleatorios y automatizar sus cálculos. El método fue llamado así en honor al principado de Mónaco por ser “la capital del juego de azar”.

La idea surgió mientras Stam Ulam jugaba al solitario durante una enfermedad entorno al año 1946. Se dio cuenta de que es mucho más simple tener una idea del posible resultado del juego haciendo varias pruebas con diferentes cartas y contando el porcentaje de los resultados que modelizar formalmente todas las posibilidades de resultado. Dedujo que esta idea era aconsejable aplicarla al trabajo de los Álamos que se encontraba realizando sobre la difusión de neutrones, dado que resultaba realmente complejo la resolución de las ecuaciones íntegro-diferenciales que gobiernan la dispersión, absorción y fisión.

Su idea consistía en probar con experimentos mentales las posibles soluciones y, en cada etapa, distribuir un número aleatorio según unas probabilidades, para estudiar todas las posibles soluciones y tener una idea de la conducta del proceso. A través de la utilización de máquinas de computación podrían efectuarse estas pruebas numéricas.

A partir de entonces comenzó a utilizarse este método y una de las primeras aplicaciones fue en 1948 cuando Enrico Fermi, Ulam y von Neumann lo aplicaron a un problema determinista y consideraron los valores singulares de la ecuación de Schrödinger.

Gracias al rápido desarrollo tecnológico de las últimas décadas, el empleo de la simulación es hoy en día uno de los métodos más utilizados por su efectividad a la hora de transmitir los resultados de los análisis, sin embargo su elevado coste hace que esta tecnología sólo esté al alcance de grandes empresas.

El objetivo final de toda simulación es reproducir un sistema para generar una serie de informaciones que sean lo más parecidas posible a las reales, de forma que se puedan tomar decisiones en base a estos informes.

1.2.1 Razones para simular

Debido a la enorme complejidad del sistema suele ser necesario hacer una serie de simplificaciones que constituyen el modelo. Si no se realizan dichas simplificaciones el modelo puede complicarse en exceso; de la misma manera, si se asumen demasiadas simplificaciones puede ocurrir que los resultados obtenidos con el modelo no sean válidos. Por tanto, debe buscarse un equilibrio entre el sistema real y lo que interesa simular.

La utilización de modelos facilita enormemente la comprensión y el estudio de sistemas complejos. Trabajar e introducir cambios sobre el modelo real supone un coste elevado y un alto riesgo, mucho mayores que experimentar con el modelo del sistema. Por ejemplo, en el rediseño de una línea de fabricación resulta preferible trabajar sobre un modelo en vez de sobre la línea real, lo que supondría parar la producción con la pérdida de beneficio que ello conlleva y puede que, incluso, no se llegara a una solución aceptable tras el cambio. A través de la simulación se consiguen resultados aceptables en tiempos razonables. Además permite la introducción de variables de carácter estocástico que no se permite en los modelos exactos.

1.2.2 Modelos de simulación

La descripción de las características que resultan interesantes de un sistema se denomina modelo del sistema y el proceso de obtención de dicho modelo se conoce como modelado. Existen gran cantidad de tipos de modelos (físicos, mentales o simbólicos) para representar el sistema de estudio.

La descripción de un modelo matemático del sistema real no es un método de estudio propio de la simulación digital si no que acompaña a la resolución de casi cualquier tipo de problema. Por regla general, suele seguir unas pautas: reconocimiento del problema, formulación del problema matemático, resolución del problema matemático e interpretación de los resultados matemáticos en el contexto del problema real.

Para la obtención de un modelo representativo del sistema real debe tenerse en cuenta que un modelo: se desarrolla a través de una serie de hipótesis y simplificaciones; por tanto, representa la realidad pero sólo de forma parcial. Se construye bajo un objetivo y para ese fin debe ser creado teniendo en cuenta su utilidad para la consecución del objetivo. Además tiene que ser lo más simple posible, pero tan complejo como resulte necesario para recoger todos los aspectos que resulten interesantes.

Por tanto, un buen modelo debe representar las características que sean de nuestro interés y ser una representación de la realidad lo más sencilla posible de forma que sea fácil su entendimiento y su posterior utilización.

Existen distintas clasificaciones de modelo. Por ejemplo podemos distinguir entre modelos continuos y discretos. Los primeros tratan de representar sistemas reales cuyo comportamiento varía constantemente en el tiempo; por ejemplo, simulaciones para predecir patrones de las mareas o la evolución en procesos industriales químicos.

En cambio, los modelos discretos sólo cambian de estado en determinados instantes de tiempo; el ejemplo más claro es una cola de supermercado donde sólo ocurren cambios cada vez que se acaba de atender un cliente y la cola avanza una posición.

También se distingue entre modelos estáticos y modelos dinámicos. Un modelo se clasifica como estático si la variable tiempo no influye en este. En cambio los modelos dinámicos sí tienen en cuenta la variable tiempo y pueden establecer cómo evoluciona el sistema en el desarrollo de la simulación.

Por último, se distingue entre modelos deterministas y modelos estocásticos. En un modelo determinista su estado posterior puede ser definido a través de un estado anterior y estudiando sus entradas; es decir, para unos valores de entrada ofrece un único valor de salida. Por el contrario en los modelos estocásticos intervienen variables aleatorias, de manera que a partir de unos valores de entrada se obtienen varios valores de salida.

1.2.3 Ventajas y desventajas de la simulación

Se detallan a continuación las ventajas (**Tabla 1.1**) e inconvenientes de la simulación (**Tabla 1.2**):

Tabla 1.1 Ventajas de la simulación

Ventajas	Los lenguajes de simulación proporcionan automáticamente las características necesarias para la programación de un modelo de simulación, lo que deriva en una reducción significativa del esfuerzo requerido para programar el modelo
	Reduce el riesgo en la toma de decisiones. Permite prever con certeza cómo afectan los cambios en una instalación o un proceso
	Sirve de apoyo para la toma de decisiones de inversión. Aporta pruebas fehacientes para identificar las ideas rentables y evitar los errores costosos
	Permite a los decisores identificar las mejores decisiones. Permite comparar distintos escenarios para buscar la mejor solución y la muestra de forma gráfica
	A nivel operativo se convierte en un activo
	Resulta útil para probar y comprobar soluciones alternativas y validar una como aceptable
	La gran cantidad de datos que produce la simulación y el impacto que provoca una animación realista pueden provocar la tendencia a confiar en exceso sobre los resultados extraídos

Tabla 1.2 Desventajas de la simulación

Desventajas	Necesidad de un software que supone un coste para las empresas
	Consume gran cantidad de tiempo en su desarrollo
	No es uno de los mejores métodos para la obtención de una solución óptima
	Cada modelo de simulación es único. Las soluciones e interferencias no son usualmente transferibles a otros problemas

Vistos anteriormente los tipos de modelos de simulación se detallan a continuación las ventajas (**Tabla 1.3**) e inconvenientes de usarles (**Tabla 1.4**):

Tabla 1.3 Ventajas de los modelos de simulación

Ventajas	Los sistemas complejos donde entran en juego elementos estocásticos no se pueden describir de forma adecuada en un modelo matemático, de forma que queda invalidado el uso analítico
	Posibilita el estudio del sistema en condiciones de operación propuestas
	Ofrece la posibilidad de comparar diseños de sistemas diferentes para elegir aquel que mejor se ajuste a los requerimientos establecidos

Tabla 1.4 Desventajas de los modelos de simulación

Desventajas	En la simulación estocástica, cada vez que se realiza se obtienen estimadores de las características reales del sistema, es necesario realizar varias simulaciones para poder estudiar de forma correcta los parámetros. Esto demuestra que la simulación no es la mejor técnica para la obtención de resultados óptimos pero sí lo es para la comparación de alternativas
	A la hora de elegir entre una solución de simulación y otra analítica suele escogerse esta última pues se considera más fiel y estable

1.2.4 El proceso de simulación

A continuación se detallan los pasos a seguir en un proceso de simulación para llevar a buen término el proyecto, sea cual sea la naturaleza del proceso objeto de estudio.

Todo proceso de simulación comienza con la **definición del problema**, es decir, con la detección de un problema o de una posible mejora. Es necesario tener un amplio conocimiento del sistema y de su funcionamiento para proponer vías de mejora y poder modelarlo. Por tanto una parte vital del proyecto es el aprendizaje exhaustivo de lo que quiere simularse; es imprescindible para realizar un modelado de acuerdo a la realidad del sistema y su posterior verificación y validación. Establece de forma clara la forma de medir los resultados que se esperan fruto del estudio.

Antes de comenzar con el modelado deben definirse cuáles son los **objetivos** del proyecto de simulación para así centrar la atención en simular lo que interesa y modelar en función de ello. Consiste en modelar el sistema de la manera más simplificada posible sin olvidar ninguna consideración importante; por ello, se debe tener claro qué se quiere y qué se busca. Debe establecerse una forma de medición de los objetivos para comprobar que se cumple.

Teniendo en cuenta el nivel de detalle que queremos y una vez establecidos los objetivos del problema de estudio, se define y procede a la **construcción del modelo** a través del cual se obtendrán los resultados esperados. Deben definirse las variables que entran en juego en el modelo, sus relaciones lógicas y los datos necesarios. Es aconsejable hacer una estimación de los recursos necesarios (personal, coste, etc.) y del tiempo a emplear en cada etapa del proyecto.

Es importante que en el paso anterior se definan con claridad los datos necesarios para la simulación. En esta etapa se utilizan los métodos tradicionales empleados en organización industrial para la **colección de datos**: toma de tiempos, registros informáticos, etc. En caso de que el sistema real ya exista facilita la recogida de datos que resulta útil para la configuración de un modelo realista (distribuciones de probabilidad, procedimientos, etc.). Normalmente no va a existir una correspondencia exacta entre el sistema real y el sistema modelado lo que dará lugar a determinadas simplificaciones.

Durante el proceso de **implementación del modelo** en la computadora se puede recurrir a numerosos programas y a diferentes lenguajes de simulación. Los lenguajes de simulación más utilizados son: Fortran, Algol o Lisp. Dentro de los programas más conocidos destacamos Rockwell Arena, GPSS, Simula, Stella y iThink, Promodel, Vensim, Flexsim, Simscript o Witness. La elección

del lenguaje de simulación juega un importante papel en el proyecto. El personal encargado de la realización del proyecto optará por uno u otro en función de los conocimientos que posean, los programas a los que tengan acceso o sus propias preferencias personales.

Una vez realizada la implementación resulta imprescindible la comprobación de que el sistema modelado funciona como queremos, asemejándose lo más posible al sistema real. En caso de no ser así deberá replantearse el problema e implementarse de nuevo. La **verificación** consiste en comprobar que el programa funciona como está previsto que lo haga, es decir, se comprueba que el paso de modelo conceptual a modelo informático es adecuado. Se descubren aquí posibles errores del programa. Debe verificarse que el modelo cumple con los requisitos para los que se diseñó.

A continuación se busca certificar que el modelo es fiel al sistema real, es decir, comprobar que los resultados obtenidos a través del modelo corresponden con la realidad. La **validación** es un proceso continuo durante el modelado de la simulación; a medida que se va construyendo el modelo debe comprobarse su funcionamiento antes de continuar con la siguiente etapa. A través de este diseño modular se busca facilitar el proceso de detección de errores puesto que, en un modelo demasiado grande, el encontrar errores lógicos o técnicos de programación puede resultar muy costoso. Resulta de gran utilidad una interacción continua entre los conocedores del sistema y los creadores del modelo a fin de evitar errores de concepto o interpretación. Resulta interesante también el seguimiento del proceso de modelado por parte de las personas que en un futuro utilizarán la simulación para orientar el modelado a su finalidad.

Los métodos más utilizados para la validación del modelo son: opinión de expertos sobre los resultados obtenidos en la simulación, la exactitud para predecir datos históricos, la exactitud para predecir datos futuros, comprobar que el sistema modelado falla con datos que hacen fallar al sistema real y la aceptación y confianza de la persona que utilizará los resultados que produzca la simulación.

Después de que el modelo haya sido verificado y validado, se procede a la generación de los datos deseados y a la realización de un análisis de sensibilidad de los índices requeridos, esta etapa se conoce como **experimentación**. Ya se expuso anteriormente que la simulación no nos lleva a la obtención de la solución óptima sino que es un método rápido para la consecución de soluciones aceptables y evaluación de diversas soluciones alternativas.

Para paliar este problema los paquetes de simulación comienzan a incorporar módulos de optimización y mejora. No son más que programas que, a través de técnicas heurísticas, buscan las soluciones óptimas. El paquete de simulación empleado en el presente proyecto incluye el módulo Optimizer, el cual, a través de una función objetivo, las variables de mejora y las restricciones necesarias permite obtener resultados que se acercan al objetivo fijado.

Posteriormente se procede a la **interpretación** de los resultados fruto de la simulación y en base a ello se decide. Se pueden comparar los resultados reales con los emitidos en la simulación, ejemplo de una simulación de un proceso que estudia las consecuencias de unas condiciones futuras diferentes.

Como último paso del proyecto debe incorporarse una **documentación** del proyecto que registre todo el proceso y que sirva de ayuda a aquellos que quieran realizar pruebas sobre el modelo. También puede documentarse cómo cambiar el modelo según las líneas futuras de estudio que se estiman. En caso de ser un proyecto modular debe dejarse indicado cómo se han establecido las relaciones lógicas y cómo efectuar los futuros cambios.

1.2.5 Aplicaciones de la simulación

La simulación es una de las técnicas de ayuda a la toma de decisiones más usadas en el estudio de sistemas complejos. Es una de las herramientas más usadas en las empresas por su utilidad y por la gran variedad de campos de aplicación como pueden ser: industria textil, industria química, industria del petróleo y el gas, industria del automóvil, industria farmacéutica, economía, meteorología, sector servicios, empresa aeronáutica, empresa naval, estudio de mareas, etc.

La simulación permite predecir el comportamiento del sistema funcionando bajo unas determinadas condiciones, establecer relaciones entre magnitudes asociadas al sistema, comparar distintos métodos de funcionamiento y determinar cuál es la más adecuada de manera rápida y ágil.

Algunos ejemplos de aplicación serían:

- Simulación de un sistema de colas: permite simular, para su posterior estudio y análisis, un sistema de colas cuya formulación matemática sería demasiado compleja de analizar.
- Simulación de un sistema de inventarios: la utilización de la simulación simplifica en gran manera el análisis de sistemas de inventarios donde los parámetros (demanda, coste de transporte, tiempo de entrega, etc.) son estocásticos.
- Simulación de un proyecto de inversión.

1.3 Lenguajes de simulación

A la hora de enfrentarnos a la resolución de un problema mediante simulación contamos con varias alternativas:

- hojas de cálculo que permiten desarrollar modelos muy simples de forma rápida. (Excel),
- lenguajes de programación de propósito general (FORTRAN),
- lenguajes de simulación (GPSS),
- simuladores (WITNESS),
- mezcla entre simulador y lenguaje de simulación (EXTEND).

Los lenguajes de simulación de carácter general facilitan en gran medida el desarrollo de modelos de sistema complejos reales. En cambio, los lenguajes de simulación de carácter específico permiten simular un ambiente determinado, no necesitan de grandes conocimientos de programación y producen un código más legible y menos largo.

Dichos lenguajes se orientan hacia la simulación basada en eventos, es decir, instantes de tiempos en los que ocurre un cambio en el sistema o hacia una simulación basada en procesos, que estudia las entidades que fluyen a través del sistema.

Los lenguajes de simulación presentan las siguientes características: son muy usados y conocidos actualmente, su aprendizaje no requiere mucho tiempo, son fáciles de usar gracias a su interfaz gráfica, reducen el esfuerzo necesario para la programación de un modelo, los modelos pueden modificarse fácilmente, facilitan la detección de posibles errores, los paquetes software de simulación contienen aplicaciones que facilitan la depuración de errores, la generación de escenarios y los cambios en el modelo mientras este se ejecuta, su uso queda restringido a las áreas de manufactura y comunicaciones y tienen flexibilidad limitada.

1.3.1 Ventajas y desventajas de los lenguajes de simulación

El lenguaje de simulación elegido juega un papel fundamental en el desarrollo del modelo. Una mala elección puede llevar al fracaso del proyecto o a una finalización tardía. Las ventajas de elegir lenguajes de simulación frente a lenguajes de propósito general son (**Tabla 1.5**):

Tabla 1.5 Ventajas de los lenguajes de simulación

Ventajas	Los lenguajes de simulación cuentan con la mayoría de las características que se necesitan para la resolución de un modelo de simulación lo cual se traduce en una reducción del tiempo de programación y de líneas de código
	Los modelos de simulación son más fácilmente modificables cuando están desarrollados en lenguaje de simulación
	Los errores potenciales se identifican y chequean automáticamente en los lenguajes de simulación
	Integran funciones como generación de números aleatorios, análisis estadísticos y gráficas
	Gozan de una alta fiabilidad lo que deriva en una validación rápida y sencilla de los resultados
	Los bloques básicos de construcción son muchos más afines al propósito buscado que los de un lenguaje de tipo general

Si bien los lenguajes de simulación presentan una serie de inconvenientes (**Tabla 1.6**):

Tabla 1.6 Inconvenientes de los lenguajes de simulación

Inconvenientes	Presentan menos flexibilidad que los de propósito general
	Su sintaxis resulta menos natural
	Las ejecuciones del modelo resultan más lentas
	Son lenguajes menos conocidos por analistas y programadores y los compiladores menos accesibles
	Resulta imprescindible la inversión para la adquisición del software

En lo referente a lenguajes de propósito general, presentan una serie de ventajas (**Tabla 1.7**):

Tabla 1.7 Ventajas de los lenguajes de propósito general

Ventajas	Son más conocidos
	Cuentan con mayor flexibilidad que los lenguajes de simulación
	BASIC, C o FORTRAN se encuentran disponibles en casi cualquier ordenador, cosa que puede no ocurrir con los lenguajes de simulación
	Un programa desarrollado a través de un lenguaje de propósito general suele necesitar un tiempo de ejecución menor que uno equivalente
	El coste de software de un lenguaje de propósito general suele ser menor

Por tanto, la elección de utilizar un lenguaje de propósito general o uno de simulación debe estudiarse para cada sistema particular ya que cada uno de ellos tiene una serie de ventajas y desventajas.

1.3.2 Lenguajes de simulación específicos

Los lenguajes de simulación de propósito específico son paquetes de computadora que facilitan la simulación para un ambiente concreto; no requieren de un gran conocimiento de programación, ya que se trata de un código más simple y corto. Estos lenguajes se orientan hacia sistemas basados en procesos o en eventos. Lo más conocidos son SIMAN, SIMSCRIPT y SLAM.

Siman (Simulation Modeling and Analisis) fue desarrollado por el doctor Dennis Pedgen (creador también del lenguaje Arena) a través de la compañía Systems Modeling Corp. Por su parte

SIMSCRIPT II.5, de la compañía CACI, y **SLAM II** son lenguajes de simulación específicos de alto nivel orientados tanto a eventos como a procesos.

Dentro de las ventajas de los lenguajes de simulación específicos cabe destacar que permiten la creación de programas más cortos, lo que facilita la detección de errores e incluso una serie de errores típicos suelen ser identificados y chequeados de forma automática. Pero como contrapartida destaca su menor flexibilidad y su ejecución más lenta, además de la necesidad de invertir en la adquisición de un software.

1.3.3 Características deseables de un lenguaje de simulación

Las características que se establecen como deseables de un lenguaje de simulación se presentan a continuación agrupadas en cinco categorías:

Características generales

Lo más importante para un software de simulación es la flexibilidad de la que dispone para realizar modelos. Si el software no ofrece la posibilidad de modelar un sistema en particular se hará a través de una aproximación, lo que provoca una reducción de su utilidad.

La facilidad para el desarrollo del modelo es vital dado que los tiempos para el desarrollo de proyectos suelen ser limitados. La ayuda del software en el proceso de depuración ayudará a aumentar la exactitud y la velocidad de modelado.

Animación

La facilidad para la simulación a través de la animación popularizó el uso de estos sistemas. Durante la animación los iconos cambian de color, posición o forma en función de su estado, de forma que puede verse el cambio de un sistema en el tiempo de forma gráfica.

La importancia de la animación en una simulación radica en la gran ayuda que supone en la comprensión de su funcionamiento y en su aumento de credibilidad.

Si bien la animación presenta otras ventajas como la facilidad de depuración del modelo, la ayuda a entrenar al personal operativo, la ayuda a entender el comportamiento dinámico del sistema, la detección de errores, la validación o la verificación.

Debe destacarse que, aunque la animación aporta numerosas ventajas, no es más que un complemento de un análisis estadístico. La detección de errores y la validación no puede hacerse únicamente a través de su animación, debe hacerse un estudio detallado.

Capacidades estadísticas

Es importante que un software de simulación permita representar el aspecto aleatorio con el que cuentan la gran mayoría de los sistemas reales. Esta aleatoriedad (tiempo de procesamiento, tasa de fallos, etc.) se modela a través de una distribución estadística.

Por lo general los paquetes de simulación cuentan con una serie de distribuciones estándar (normal, logarítmica, exponencial, etc.) que deben ser sacadas a partir de datos observados en el sistema y debe incluirse una variable aleatoria.

Soporte

Además de las pruebas gratuitas para que los interesados se descanten por ese producto, los usuarios estándar de paquetes de simulación precisarán de algún soporte permanente. Por tanto, el distribuidor del programa debe ofrecer cursos y seminarios públicos de forma regular, además de

contar con un soporte técnico para la ayuda de los usuarios. Es también importante una buena documentación, libros, manuales y numerosos ejemplos explicativos.

Informes

Todo software de simulación debe generar informes para las estadísticas más comunes (tiempo de utilización de la máquina, tamaño de colas y demoras) y también debe ofrecer la posibilidad de desarrollar informes personalizados. Es aconsejable que estos informes incluyan gráficos, histogramas o diagramas de tarta a fin de hacer más intuitivos los resultados.

1.3.4 Clasificación del software de simulación

La clasificación del software de simulación puede atender a dos criterios, según la especificidad del paquete informático y según el enfoque del modelado:

Según la especificidad del paquete informático:

- **Lenguajes de simulación:** es un lenguaje de programación de naturaleza general que posee características especiales para ciertas aplicaciones de simulación. Destacamos entre ellos SIMAN y SLAM II, que poseen módulos de manufactura para AGV y cintas transportadoras.
- **Simulador:** paquetes que ofrecen la posibilidad de simular sistemas con poca programación. Las ventajas más notables de estos simuladores es la facilidad de uso, por su escasa programación, y la reducción del tiempo de desarrollo del programa. Por el contrario tiene menor flexibilidad y su uso está sujeto a las características estándar del paquete.
- **Híbrido:** mezcla entre un simulador y un lenguaje de simulación, este software cuenta con las características de un simulador y, además, cuenta con la opción de agregar programación al modelo.

Según el enfoque del modelado:

- **Secuenciación de eventos (event-scheduling):** esta manera de modelar consiste en la identificación de eventos propios del sistema y a continuación se establece una descripción de los cambios de estado que tienen lugar cuando se produce cada suceso. La ventaja de este enfoque de modelado es que no consume tiempo de simulación durante la ejecución de una rutina.
- **Proceso (process):** proceso indica una secuencia ordenada en el tiempo de sucesos relacionados y separados por intervalos de tiempo, describiendo la relación de una entidad con el resto del sistema. La simulación por procesos presenta una serie de ventajas frente a la simulación por eventos: por lo general la programación suele necesitar menos líneas de código. Por el contrario resta flexibilidad frente a la simulación por eventos.

1.4 Witness

En el mercado existen actualmente gran cantidad de paquetes de simulación, cada uno con unas características determinadas en cuanto a rapidez, facilidad de análisis, rigurosidad estadística, capacidad de modelización, facilidad de uso, flexibilidad o coste. La utilización de uno u otro dependerá del sistema a simular, del coste que supone para la empresa el programa de simulación o de las preferencias del analista.

El programa Witness suministrado por Lanner Group es actualmente uno de los programas de simulación más completos para la simulación de procesos dinámicos y, en concreto, para procesos logísticos y de fabricación. Este programa es utilizado por grandes empresas con distintos entornos de aplicación como Carrefour, Enel, Nissan, Ford, Michelin, Carlsberg, British Airways, Airfrance o Airbus.

Se ha elegido este programa para realizar el presente proyecto por tres razones fundamentales: en primer lugar las características propias de Witness y la facilidad de uso lo hacen apto para la simulación de este proyecto en concreto; en segundo lugar, es el programa de simulación sobre el que mayor conocimiento tenía el programador; y, por último, es el paquete de simulación con el que ya trabajaba la empresa donde se ha realizado dicho proyecto.

1.4.1 Introducción

El programa de simulación Witness es suministrado por la empresa Lanner Group, que se encuentra entre los líderes del mercado en simulación. Establece su sede en el Reino Unido con sucursales y partners en Europa, América y Asia.

Deriva del paquete de simulación interactivo *SEE WHY* que lanzó AT&T Istel en 1979 y que ya incluía gráficos animados. El programa Witness tal y como se conoce hoy en día apareció en el año 1986.

El paquete de software que se utiliza en el presente proyecto es Witness™ PwE 3.0, que entra dentro del grupo de simuladores dinámicos de eventos discretos. La potencia de este tipo de simuladores radica en el tiempo y la evolución del sistema en su desarrollo. Permite la creación gráfica de modelos de simulación acompañadas de una representación dinámica del sistema además de permitir la interacción constante del usuario con el programa. El usuario puede cambiar durante el desarrollo de la simulación los diferentes parámetros (tiempos de ciclo de las máquinas, velocidad de los vehículos, ruta de las parts, etc.) o añadir diferentes elementos al sistema. Además, el programa muestra una serie de informes al usuario (rendimiento de las máquinas, porcentaje de ocupación, tiempo medio de las piezas en el sistema, nivel de producción, número de piezas defectuosas, máquinas averiadas, etc.).

Las ventajas más destacables que se presentan en Witness son:

- El compromiso adquirido por las personas trabajando juntas como equipo en la creación de modelos Witness.
- Los modelos pueden crearse y probarse con pequeñas variaciones en diferentes estados de manera que se simplifica enormemente la construcción del modelo y la detección de errores en la lógica, lo cual hace más fiable al modelo.
- El modelo puede modificarse durante el tiempo de ejecución y dichos cambios son incorporados al instante.

Witness se utiliza en una enorme variedad de entornos y sectores: electrónica, alimentación, papel y cartón, banca y finanzas, transporte, ingeniería, industria del automóvil, industria química, industria aeroespacial y Gobierno.

1.4.2 Características generales del paquete

Witness es un programa de simulación interactivo interesante principalmente para el entorno industrial por varios motivos:

- Permite crear modelos de sistemas en los que fluye algún elemento (admite hasta 32.000 parts) a través de distintos puestos de trabajo (machines), pudiendo modelizarse además

almacenes (buffers), transportadores (conveyors), trabajadores (labours), transportes (tracks y vehicles), turnos de trabajo (shifts), etc., que ayudan a definir el sistema a modelizar.

- Permite el empleo de una gran cantidad de variables y atributos para, a través del lenguaje de programación propio, poder modelizar correctamente el funcionamiento del sistema.
- Permite la creación de modelos gráficos en movimiento, otorgando a la simulación gran claridad, comprensión, fidelidad e impacto visual.
- Permite la obtención de una gran cantidad de datos de salida como resultado de la simulación para su posterior análisis, directamente a través de los informes generados o bien a través del estudio de los datos que vuelca en los ficheros.
- Es de fácil comprensión para un programador sin conocimientos previos, aunque el dominio de todos sus elementos y el lenguaje de programación propio resulta algo más complejo.
- Debido a que trabaja con entorno Windows (ventanas, cajas de diálogo y menús desplegados) resulta fácil de utilizar.
- Cuenta con un sistema de ayuda off-line (tecla F1).
- Permite la importación de datos al sistema a través de ficheros realizados con otro programa (hojas de cálculo Excel) e importa dichos resultados a ficheros manipulables con otros programas informáticos.
- Permite la edición del programa sin necesidad de correr Witness a través del programa de edición de texto Write (Windows).
- Permite la creación de ficheros de arranque en formato ASCII.
- Pueden crearse submodelos que pueden ser copiados, borrados, desplazados e interconectados, lo que posibilita un diseño modular del sistema.
- Cuenta con la opción de realizar gráficas e histogramas (timeseries e histograms) para evaluar la evolución temporal.
- Permite la utilización de numerosas distribuciones de probabilidad, teóricas y empíricas, que permiten la aleatoriedad del modelo (tiene más de 1000 series de números aleatorios distintas).

1.4.3 Modelización con Witness

Un sistema industrial está formado por un conjunto de elementos, piezas que pasan por una serie de máquinas donde son transformadas, transportadores que llevan las piezas de un lugar a otro, almacenes donde esperan, operarios que realizan el mantenimiento de las máquinas, etc.

Este sistema puede ser representado en un modelo Witness a través del empleo de los elementos de los que dispone el programa y la lógica de control necesaria. Si bien, no es necesario plasmar todos los elementos de los que consta el sistema real, sólo los indispensables.

Elementos de modelización Witness

Un modelo en Witness está formado por multitud de elementos físicos relacionados entre sí con una serie de reglas lógicas denominadas reglas de entrada y reglas de salida. Cada componente del sistema a modelizar tendrá una correspondencia en el modelo a través de uno o más elementos de Witness.

El propósito de toda simulación es, a través de los cambios realizados en el modelo, la obtención de resultados y comparar cómo afectan al rendimiento dichos cambios. Puesto que la aplicación de estos cambios y la recogida de información sobre el sistema real sería muy costoso se recurre a la simulación.

En la modelización del proceso Witness se utiliza la misma combinación de máquinas, piezas y gente que en el sistema real; cada uno de estos factores de producción se conoce como elementos del modelo.

Los elementos se dividen en cinco categorías: discretos, continuos, lógicos, gráficos y especiales.

Elementos discretos

- **Parts:** son las piezas que se mueven individualmente a través del modelo, pasando de unos elementos a otros en función de las reglas de entrada y de salida. La entrada al modelo de piezas se realiza a través de un elemento predefinido llamado *world* o a través de un fichero de piezas (*part file*) que indica en qué momento entra cada pieza en el sistema. A la salida del modelo las piezas se dirigen hacia *ship* o hacia un fichero de piezas (*part file*) que recoge el momento de salida de cada pieza.

Las piezas pueden visualizarse en el modelo de diferentes formas: con un icono, con las cuatro iniciales del nombre o como un simple contador. Llevan asociadas uno o varios atributos que pueden tomar diferentes valores en función del momento en que se encuentre la simulación. Dichos atributos pueden representar el tamaño, la longitud o el color.

Las piezas pueden fluir por el modelo de manera individual o en grupo, pudiendo juntarse, dividirse, transformarse en otro tipo de pieza, etc.

Pueden representar vehículos atravesando los diferentes puestos de fabricación, personas moviéndose en un restaurante, llamadas de teléfono o traspaso de información.

- **Buffers:** almacenes donde esperan los parts. Son elementos pasivos que no pueden ni coger ni soltar piezas desde/hacia otros elementos. Witness permite especificar la forma en que las piezas entran y salen del almacén, existen diferentes formas; FIFO, LIFO, en función de un atributo, etc. Puede fijarse que las piezas permanezcan un tiempo mínimo o máximo en el almacén antes de salir. Pueden representar ruedas en el almacén, motores esperando a ser procesados, gente esperando en la cola.

- **Machines:** son elementos que operan con las piezas, utilizados para representar como los parts se cogen, se transforman y se depositan en otro lugar. Pueden procesar varias parts al mismo tiempo y desarrollar varios ciclos en una misma estación de trabajo. Son el elemento principal de simulación y tiene gran utilidad porque permite simular un gran número de operaciones ya sean realizadas por personas o máquinas, como un trabajador, un elevador, montar piezas o mecanizarlas.

Gráficamente se representan con un icono que cambia de color en función del estado de la simulación: verde-ocupada, amarillo-ociosa, roja-avería, azul-esperando operario para funcionar, cyan-esperando operario para ser configurada y blanco-fuera de turno.

Existen varios tipos de máquina en función del número de piezas que procesen a la vez; *singles*: procesan una pieza cada vez, *batch*: procesan un lote de piezas a la vez, *assembly*: entran varias piezas, son ensambladas y sale una única pieza, *production*: entra una pieza y sale esa misma pieza y además una cantidad fija de otra pieza, la que se desee producir, *general*: entra una cantidad fija de piezas y sale otra cantidad fija de piezas y, por último, el tipo *multi-station*: máquina con varias posiciones en las que van entrando secuencialmente las piezas.

- **Conveyors:** mueven las piezas desde un punto del sistema a otro en un periodo de tiempo determinado. Las piezas van en fila a una velocidad fija atravesando el conveyor, simula una especie de cinta transportadora. Hay dos tipos de este elemento; *fixed*: las piezas mantienen la misma distancia entre ellas en todo momento, si la primera pieza se detiene las demás lo hacen también (ejemplo de cinta de supermercado), *queuing*: las piezas están a cualquier

distancia unas de otras, si la primera se detiene las demás hacen cola detrás acumulándose (ejemplo de rodillos).

- **Vehicles:** transportan piezas por los tracks. Son útiles cuando son varios los puntos de carga y descarga. La ruta seguida por los vehículos viene determinada por la regla *destination*.
- **Tracks:** rutas por donde circulan los vehículos. La carga y descarga se realiza al final del track.
- **Labour:** representan los recursos que necesitan los demás elementos para desarrollar su labor (reparación, configuración, limpieza, cambio de herramienta, etc.). Puede representar tanto a un operario como una herramienta. Puede priorizarse su uso para en caso de que varios elementos requieran a un mismo labour, éste se dirige al de mayor prioridad.
- **Modules:** agrupaciones de elementos físicos del modelo que se utilizan para facilitar la comprensión y modelización del sistema. Son útiles para representar zonas que se repiten pues Witness ofrece la posibilidad de clonar módulos.

Elementos continuos

- **Fluids:** fluyen de manera continua a través de los elementos del modelo que se indican a continuación. Se utilizan para representar líquidos u otros fluidos o elementos no líquidos como el correo, tráfico denso, etc. Los fluidos pueden mezclarse entre ellos o cambiar su color durante la ejecución de la simulación.
- **Tanks:** lugares donde se almacenan los fluidos. Son la equivalencia a los buffers pero para los fluidos. La capacidad se mide en función del volumen que son capaces de almacenar. Cuentan con la posibilidad de añadir iconos que cambian de color en función de su estado. Al igual que las máquinas son elementos pasivos pero sí dan la posibilidad de establecer reglas de entrada y salida para los fluidos, de asignar prioridades y labours y de provocar breakdowns.
- **Processors:** representan la equivalencia a las máquinas pero se utilizan en el tratamiento de fluidos. Al igual que las máquinas cuentan con iconos que cambian de color según el estado, pueden necesitar labours por averías o tener prioridad frente a otros procesadores.
- **Pipes:** son las “tuberías” que se encargan de conectar los tanques y los procesadores, de alguna manera son equivalentes a los tapices para las piezas. Ofrecen la posibilidad de cambiar su color en función del estado. Disponen de reglas de entrada y de salida, posibilidad de asignar labours y provocar breakdowns.

Elementos lógicos

- **Attributes:** son valores vinculados a un elemento pieza, ya sean nombres o valores numéricos (enteros o reales). Su valor se modifica en las acciones de los diversos elementos. Puede representar, por ejemplo, el tamaño, el color, la longitud o el peso de una pieza de modo que en función de su valor el ciclo de las máquinas puede variar. Hay dos tipos de atributos: los *fixed* son aquellos en los cuales su valor ha de ser el mismo para todas las piezas con el mismo nombre, mientras que los *variable* son aquellos atributos cuyo valor puede variar para cada pieza individual. A cada tipo de pieza puede asignársele un grupo de atributos a través del campo *Group* de las piezas.
- **Variables:** valores a los que se puede acceder desde cualquier parte del modelo. Pueden contener un nombre o un valor numérico (entero o real) y se emplean para implementar reglas lógicas al sistema. No van asociadas a ninguna pieza, su valor varía a lo largo de la simulación a través de las acciones de los elementos.

- **Distributions:** permiten otorgar variabilidad al modelo incluyendo datos que se han recogido del propio sistema real. Por ejemplo: el tiempo de ciclo de una máquina, el tiempo entre fallos o el tiempo de reparación. Witness aporta de serie varios modelos de distribuciones disponibles para usar, aunque también podemos crear nuestras propias distribuciones.
- **Files:** ficheros que se utilizan para importar valores o exportar datos que pueden ser utilizados por otros programas para la generación de informes.
- **Functions:** son funciones ya creadas por el propio programa que devuelven información sobre el estado del modelo. Pueden crearse, asimismo, funciones propias para usar en el modelo.
- **Shifts:** son modelos de trabajo que pueden ser referenciados por otros elementos y que permiten crear el modelo sobre tipos de secuenciación ya definidos.
- **Part files:** una lista de los parts con la que se puede especificar el momento de llegada de cada pieza al modelo.

Elementos gráficos

- **Timeseries:** ofrecen la posibilidad de representar en la pantalla los resultados de la simulación (valores de una variable en función del tiempo). Útiles para detectar tendencias y ciclos del modelo.
- **Histograms:** representan los resultados de la simulación con formato de diagrama de barras. Toman nota del valor y la frecuencia de aparición de algún parámetro.
- **Pie charts:** representan los resultados de la simulación en forma de gráfico de sectores.

Elementos especiales

- **World:** es el único elemento predefinido de entrada en Witness y que cuenta con infinitas piezas.
- **Ship:** se trata de un elemento de salida donde se envían las piezas que abandonan el modelo, se llama también embarque.
- **Scrap:** a este elemento de salida van a parar las piezas defectuosas, aquellas que no han terminado la simulación de manera satisfactoria.
- **Assemble:** a este elementos de salida se envían las piezas que han sido ensambladas con otras piezas en las máquinas tipo *assembly*.

Una vez que se han definidos los elementos del modelo debe establecerse la relación entre ellos utilizando las reglas de entrada y salida. Una vez hecho esto puede ponerse en funcionamiento el modelo, podrán realizarse las modificaciones que se consideren oportunas durante el desarrollo de la misma para comparar los efectos de estos cambios.

Reglas de entrada y salida

Se utilizan para dirigir las piezas a través del modelo y se definen en los campos de Input y Output Rule. Witness permite introducir reglas de hasta 32 Kb cada una. El significado de cada regla depende de si se establece como entrada o salida. Las principales reglas son:

Reglas de entrada

- **Wait:** espera hasta que las piezas son empujadas. Es la regla por defecto.
- **Pull:** coge de otro elemento de una lista de estaciones por orden preferente. Únicamente puede emplearse como regla de entrada.
- **Most:** de una lista coge del elemento que tenga más entidades.
- **Least:** de una lista coge del elemento que tenga menor número de entidades.

- **Percent:** las piezas se cogen aleatoriamente siguiendo un porcentaje, establecido por el usuario, de cada elemento.
- **Sequence:** coge una serie de piezas en orden desde distintos almacenes.
- **If/else:** si una condición es cierta realiza una determinada acción.
- **Select:** según el valor de una función coge piezas de un sitio u otro.
- **Buffer:** crea un almacén de entrada, pero sólo para las máquinas.
- **Macth:** permite a una máquina tener entradas según una serie de condiciones.

Reglas de salida

- **Wait:** las piezas esperan hasta ser retiradas.
- **Push:** empuja hacia otro elemento de una lista de estaciones por orden preferente. Sólo puede utilizarse como regla de salida.
- **Most:** de una lista de elementos coge del que tenga más entidades.
- **Least:** de una lista de elementos coge del que tenga menos entidades.
- **Percent:** las piezas se dejan aleatoriamente siguiendo un porcentaje establecido por el usuario de cada elemento.
- **Sequence:** deja una serie de piezas en orden en distintos almacenes.
- **If/else:** si una condición es cierta realiza una determinada acción.
- **Select:** según el valor de una función deja piezas en un sitio u otro.
- **Buffer:** crea un almacén de salida, pero sólo para máquinas.
- **Destination:** en función del destino del vehículo se empuja hacia una vía u otra.

Acciones

Permiten aportar la lógica necesaria para que funcione correctamente el modelo y lo más parecido posible a la realidad. A través de acciones se puede manipular variables y atributos, controlar piezas, escribir en ficheros de disco o importar datos. Witness permite crear acciones de hasta 32 Kb cada una. Mediante acciones pueden realizarse varios tipos de cálculos matemáticos o lógicos:

Cálculos matemáticos: permite realizar cálculos con números o variables empleando los siguientes operadores: paréntesis "()", potenciación "**", multiplicación "*", división "/", suma "+" y resta "-".

Cálculos lógicos: para implementar reglas lógicas a través de los siguientes operadores lógicos y aritméticos: paréntesis "()", "NOT", potenciación "**", multiplicación "*", división "/", suma "+", resta "-", igual "=", desigual "<>", menor que "<", mayor que ">", menor o igual que "<=", mayor o igual que ">=", "AND", "OR".

Es posible combinar cálculos matemáticos con cálculos lógicos con funciones matemáticas, estadísticas y de estado para formar acciones de gran potencia y complejidad (en las acciones no pueden emplearse reglas de entrada y salida).

1.4.4 Opciones de visualización

La gran ventaja de Witness reside en la posibilidad de realizar el efecto visual del modelo. Ello se hace a través del menú *Edit* donde destacan:

Editor de pantalla

Ofrece la posibilidad de representar líneas, figuras, tramas, texto, etc., en la pantalla del modelo de forma que se mejore su comprensión y su visualización. Para su edición Witness ofrece la siguiente barra de herramientas (**Figura 1.3**):



Figura 1.3 Editor de pantalla

Editor de iconos

Permite modificar los iconos que por defecto vienen asociados a los elementos o incluso crear iconos propios a través de las opciones que se observan en la **Figura 1.4**:

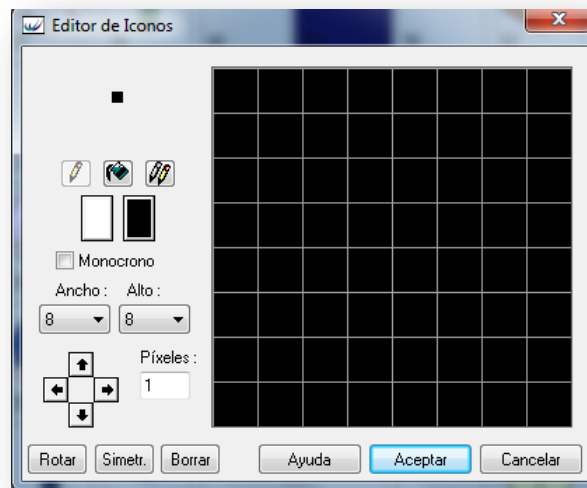


Figura 1.4 Editor de iconos

Ventanas

Witness dispone de cuatro ventanas que permiten guardar diferentes puntos de vista del modelo, útil para acceder rápidamente a alguna zona.

1.4.5 El reloj de simulación

Witness tiene asociado un reloj interno que contabiliza el tiempo de simulación. En el menú *Edit* puede indicarse la unidad mínima temporal y sus múltiplos. Es un detalle a tener en cuenta dado que si introducimos como unidad mínima temporal el minuto todos los datos de nuestro modelo deberán estar en minutos. En la siguiente imagen aparece la ventana de configuración del reloj (**Figura 1.5**):

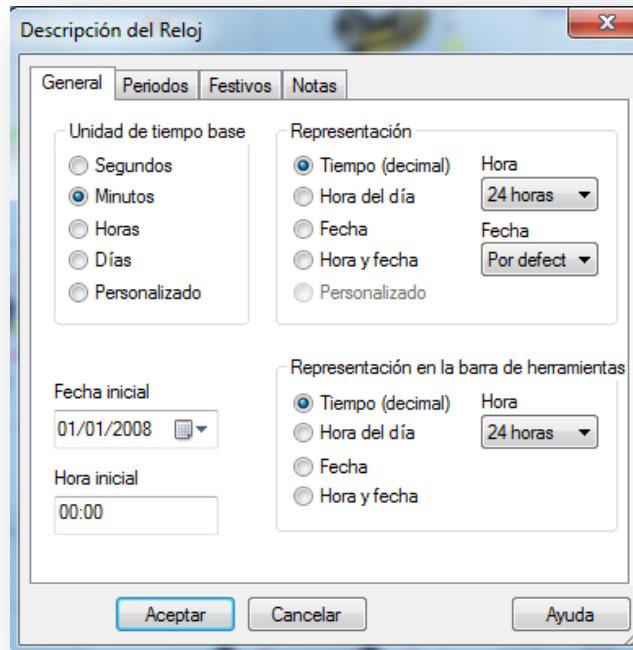


Figura 1.5 Ventana de configuración del reloj

1.4.6 Ejecución de la simulación

Una vez construido el modelo se procede a la experimentación, para ello hay que realizar diversas ejecuciones.

Witness está configurado de tal forma que ofrece las siguientes opciones en el menú desplegable *Run*:

- **Beggin**: reinicia el reloj de la simulación
- **Stop**: detiene la simulación
- **Run**: activa la simulación
- **Batch**: activa la simulación hasta el instante indicado. Por ejemplo:
 Poniendo: Time+60 ejecutará la simulación desde el punto actual hasta una hora posterior.
 Poniendo 60: ejecutará la simulación y se detendrán en el instante 60 minutos.
- **Advance**: activa la simulación tantas unidades temporales como el valor indicado
- **Walk**: disminuye la velocidad de la simulación
- **Step**: ejecuta la simulación paso a paso, lo que quiere decir es que cada vez que se ejecuta el botón step sucede una acción de la simulación. Opción útil para depurar la lógica del modelo y observar posibles fallos.

Como complemento a la opción step encontramos la ventana interactiva donde pueden observarse las acciones de la simulación de forma secuencial.

Una vez que se arranca la simulación se ejecutan todas las acciones definidas como *Initialize Actions*. Una vez hecho esto el tiempo de la simulación comienza a correr. El programa va verificando todos y

cada uno de los elementos en el orden en que fueron creados y observa si ese elemento tiene o va a tener part y realizará las acciones pertinentes. Hecho esto pasa al siguiente elemento de la lista. El orden de los elementos puede cambiarse editando el fichero de librería de extensión `*.lst` del modelo en ASCII.

1.4.7 Modos de simulación

Una vez creado el modelo o un módulo independiente puede ponerse a funcionar para comprobar el correcto funcionamiento del mismo. Witness ofrece la posibilidad de trabajar con varios modos de simulación:

- **RUN:** es la simulación estándar. Se ejecuta pulsando el icono “play” (►) en la barra de herramientas de ejecución.
- **WALK:** activa un modo de simulación similar al anterior pero más lento y puede observarse con detalle el flujo de elementos en la simulación. Es posible acelerar o decelerar el avance de la simulación en la barra de ejecución.
- **ADVANCE:** ejecuta la simulación hasta el momento concreto determinado en el casillero de la barra de ejecución.
- **STEP:** modo de simulación animado con la diferencia de que se realiza paso a paso. Cada vez que se produce un evento se refleja en la ventana de interacción.
- **BATCH:** se trata de una simulación sin animación. Es notablemente más rápido que el resto y se utiliza, una vez que ya se ha comprobado el correcto funcionamiento del modelo, para obtener resultados en un largo periodo de tiempo.
- **TRACE:** origina un fichero de extensión `.trc` donde se almacenan todos los eventos producidos durante la simulación.

1.4.8 Generación de informes

Una de las grandes cualidades del programa Witness es la generación de informes sobre los distintos elementos del modelo. Ayuda a comprobar el correcto funcionamiento del modelo además de reflejar puntos débiles de la instalación (infrautilización de las máquinas o sobreutilización), lo que ayuda a buscar vías de mejora.

Los informes pueden ser expuestos por pantalla o llevados a un fichero donde cada tipo de informe tiene una extensión diferente, si bien todos son ficheros tipo ASCII. Para la obtención de los informes hay que acceder al menú *Informes* donde aparece un listado de todos los elementos del modelo. Aparecen diversas opciones donde destacan cuatro de ellas. Veamos qué aporta cada una de estas opciones:

- **Statistics:** esta opción ofrece información detallada sobre los elementos especificados, agrupados por tipo. Cada tipo de elemento ofrece un conjunto de datos característicos como pueden ser: porcentajes de ocupación, ociosidad, bloqueo o espera y número de operaciones realizadas para las máquinas; número de piezas que han entrado al modelo, las que se han tratado correctamente y las que se han desechado, además del tiempo medio de estancia. Además, se ofrece la posibilidad de realizar gráficos de barras (Charts), de los diferentes porcentajes de estado (Chart status) que sólo están disponibles para máquinas, vehículos, recursos, vías y cintas transportadoras.
- **Used:** esta opción ofrece información sobre las relaciones lógicas entre el elemento seleccionado y el resto de los elementos que componen el modelo. Aparece una tabla con el siguiente formato: nombre del elemento, tipo, las relaciones del elemento con el entorno, regla o acción que regula la relación y dónde se usa el elemento. Cuando trata de eliminarse

algún elemento que está relacionado con el sistema aparece este mensaje de forma automática. Útil para la verificación en grandes modelos.

- **Summary:** esta otra opción ofrece, de forma resumida, las principales características de un elemento o de un grupo de ellos. En un modelo muy complejo no ayuda a la comprensión del funcionamiento pero en modelos más simples sí puede ser de gran ayuda.
- **Explode:** este informe muestra datos sobre la situación actual del elemento marcado. Resulta útil para comprobar el correcto funcionamiento del modelo, permite conocer la situación actual del elemento dentro del modelo y su correcta manipulación. El formato de la tabla para cada elemento varía; por ejemplo, para un elemento tipo vehículo aparece: el estado actual del vehículo (0: fuera de turno, 1: ocioso, 2: demandado, 3: bloqueado, 4: cargado, 5: cargando, 6: descargando, 7: parado, 8: aparcado y 9: fuera de la simulación), su próximo destino, lista de demanda del vehículo, pedidos pendientes y, por último, la carga actual del vehículo y sus principales características.

1.4.9 Optimizer module

Esta novedad incluida en el paquete de simulación de Witness ayuda, una vez que el modelo ha sido validado y verificado, a buscar soluciones del sistema simulado a través de la experimentación en diferentes escenarios. En modelos complejos el número de variables aumentan considerablemente así como la influencia en el resultado, por tanto deben simularse una gran cantidad de casos para estudiar todas las variaciones posibles. Dado que esto puede frenar el uso de la aplicación en la práctica Witness ofrece este “Módulo de Optimización” que reduce considerablemente el número de experimentos que deben realizarse para cubrir todas las posibles variaciones. Este módulo posee un algoritmo basado en técnicas metaheurísticas (recocido simulado, búsqueda tabú y búsqueda termoestática reactiva) que ofrece soluciones óptimas rápidamente. Este módulo aparece en versiones WITNESS 8.1 o superiores.

1.5 Stat-Fit

Stat-Fit es un programa estadístico desarrollado por Geer Mountain Software Corp que ofrece una versión para estudiantes de libre acceso. Permite, a través de una serie de datos, transformarlos en una distribución simple. Por ejemplo el tiempo de ciclo de una máquina puede ser ajustado de forma sencilla a una distribución simple para posteriormente ser utilizados en programas como Witness, Promodel o Arena.

La entrada de datos al programa puede ser directa mediante su escritura o a través de la importación de una hoja de cálculo Excel. Para el tratamiento de datos ha sido necesaria la utilización de este programa estadístico.

1.5.1 Utilización de Stat-Fit

Se procede a la creación de un modelo muy sencillo para utilizar Stat-Fit y determinar la distribución que mejor se ajusta a los tiempos de ciclo asociados a una determinada actividad de una máquina. Se parte de una serie de datos obtenidos de una observación directa, estos datos de entrada son los siguientes:

5, 4, 3.75, 7.5, 5.5, 9, 2.25, 5, 6.25, 3.25, 4.25, 3.5, 6.4, 2.5, 3.2, 1.5, 1, 1.3, 2.3

Para la creación de un nuevo modelo y la inserción de datos debe hacerse clic en una celda vacía e ir insertando datos como se muestra a continuación (**Figura 1.6**):

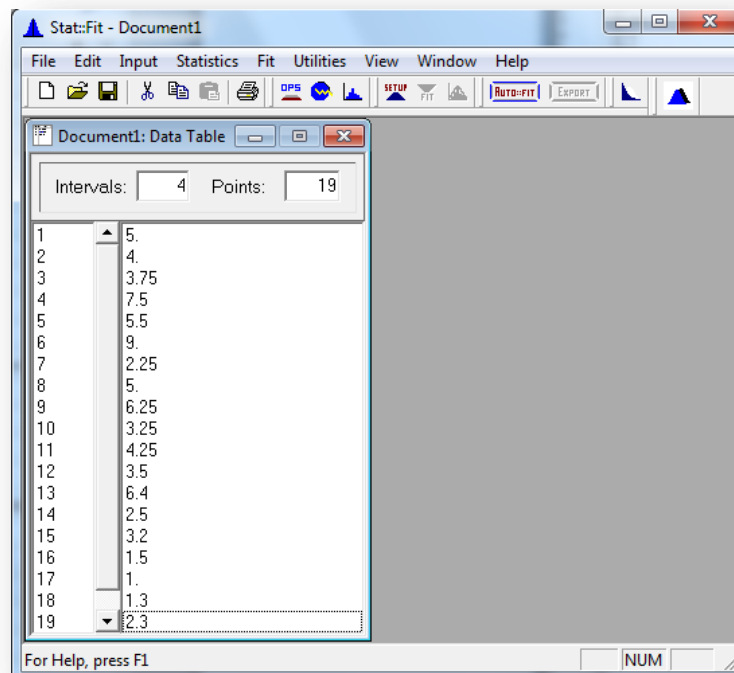


Figura 1.6 Ventana de introducción de datos

Para ejecutar el programa y que busque la distribución que mejor encaja con los datos de entrada proporcionados debe hacerse clic en AUTO-FIT (**Figura 1.7**):

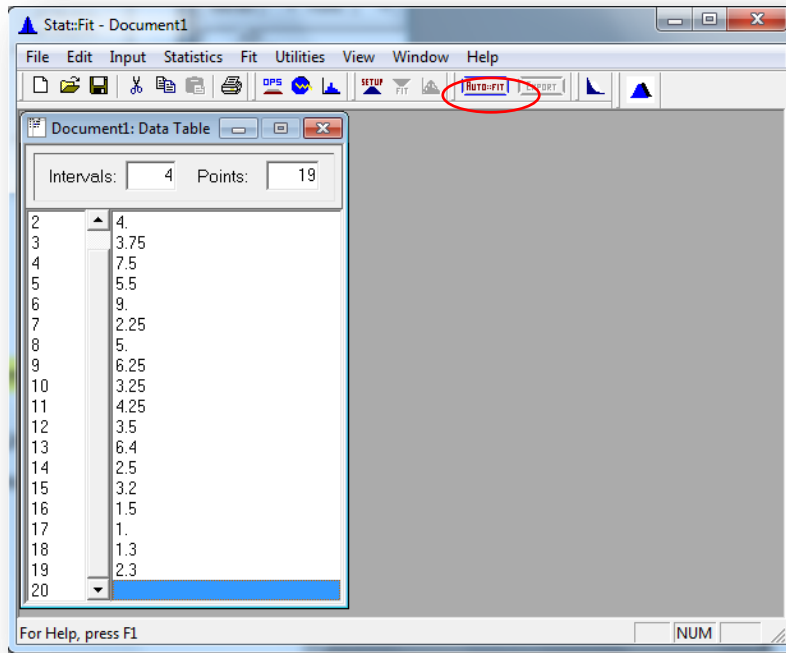


Figura 1.7 Botón Auto-Fit

Una vez hecho esto aparece un mensaje de comprobación sobre el rango de los datos a evaluar (Figura 1.8):

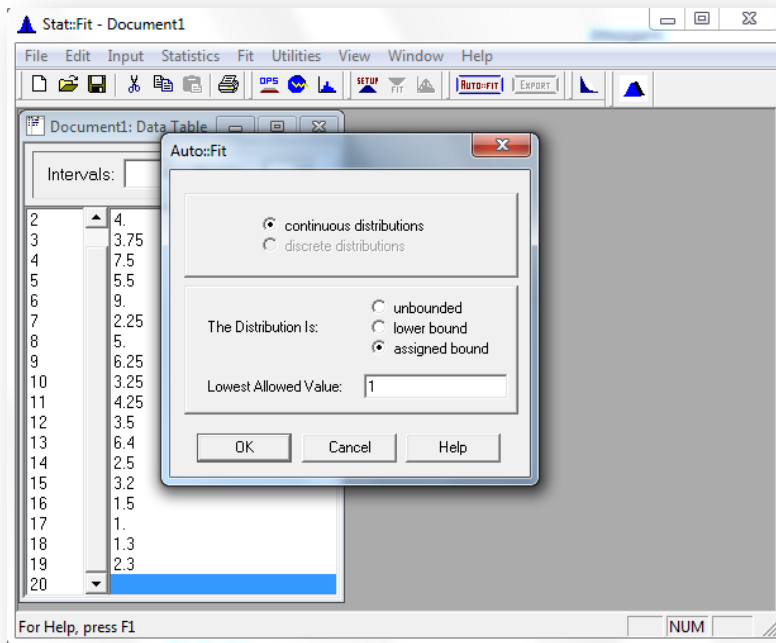


Figura 1.8 Configuración de la distribución

Esto indica que se trata de una distribución continua con límite inferior fijo en 1. Haciendo clic en OK Stat-Fit ajusta automáticamente la muestra con la mejor distribución y aparece lo siguiente (Figura 1.9):

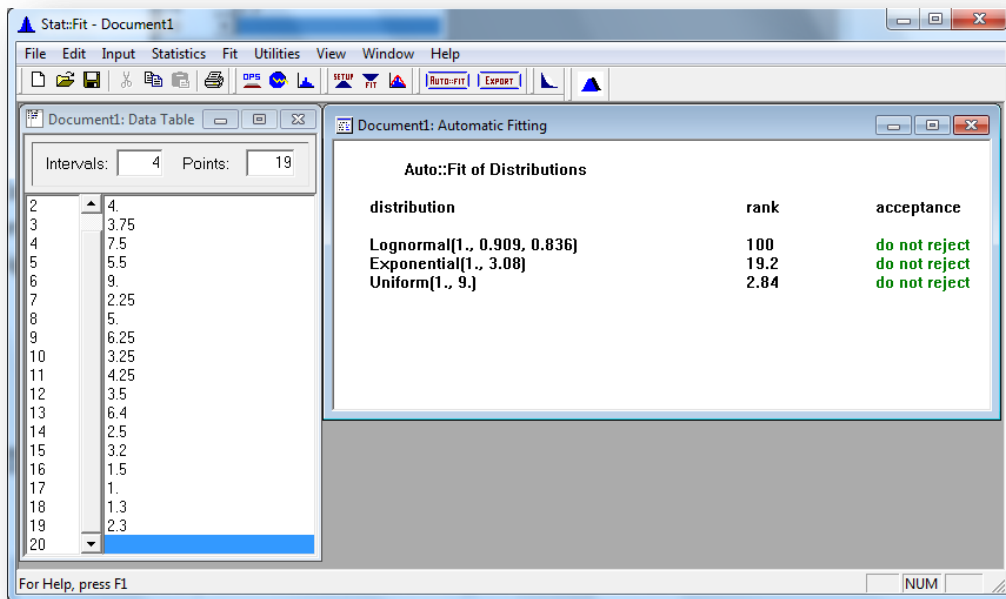


Figura 1.9 Distribuciones aproximadas

Como puede observarse la distribución Lognormal es la que mejor se adapta a nuestros datos con un nivel aceptable. El programa produce una gráfica comparativa entre los datos insertados (barras azules) y la distribución teórica aproximada (línea roja), como se muestra en la Figura 1.10:

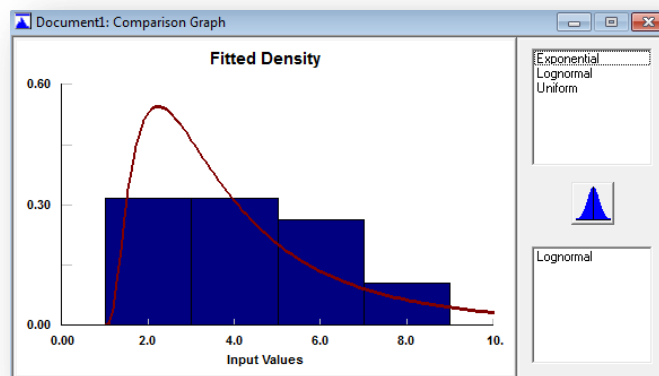


Figura 1.10 Distribución ajustada

Para exportar la distribución ajustada y utilizarla en el programa de simulación se selecciona la opción *exportar* (Figura 1.11) en la barra de tareas:

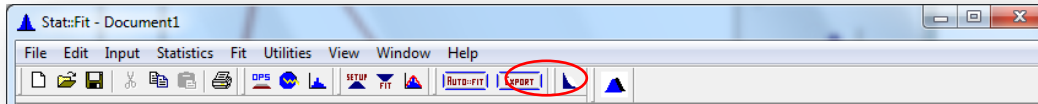


Figura 1.11 Botón de exportación de distribuciones

Y se elige la distribución que quiere exportarse y el programa de destino (Witness, Promodel, Arena...) como se muestra a continuación (Figura 1.12):

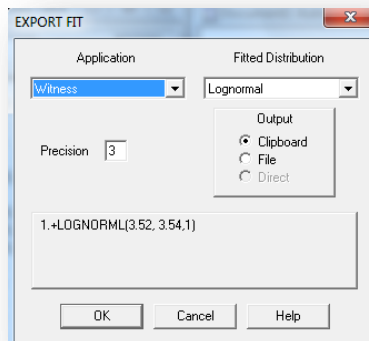


Figura 1.12 Exportación de resultados

2 Descripción del sistema

En el presente capítulo se busca describir el sistema a partir del cual se construye el modelo. Por ello antes debe hacerse una contextualización del sistema, mostrando una visión general de la empresa y del propio proceso de fabricación del neumático, donde se encuentra el sistema objeto de estudio.

2.1 La empresa Michelin

El grupo Michelin (**Figura 2.1**) es una empresa líder en el ámbito de la movilidad de personas y bienes. Trabaja desde hace más de 100 años en este sector, diseñando, fabricando y vendiendo neumáticos en todos los países del mundo con una apuesta clara por la potencia innovadora y su visión de futuro. Desarrolla a su vez una importante producción de Mapas, Guías y Ediciones de Viaje, ViaMichelin y MICHELIN Lifestyle Ltd.



Figura 2.1 Logotipo Michelin. Fuente: Intranet Michelin

La misión del grupo Michelin se centra en la contribución al avance del campo de la movilidad de bienes y personas, basándose siempre en el respeto: al cliente, a las personas, al accionista, al medio ambiente y a los hechos.

Los objetivos que se marca la empresa son, entre otros, el crecimiento sólido y diversificado, creciendo en nuevos países emergentes junto a los históricos con el fin de satisfacer las necesidades de movilidad; la consolidación de la competitividad que permite a Michelin seguir creciendo gracias a la diferenciación de productos y, por último, la rentabilidad económica y financiación duradera que permita el crecimiento de la empresa y la realización de nuevas inversiones.

El grupo Michelin cuenta con 74 centros de producción repartidos en cuatro de los cinco continentes; América, Asia, África y Europa. Dispone además de centros tecnológicos (I+D+i) en Europa, América y Asia, además de seis plantaciones de Heveas (árbol del caucho) en Nigeria y Brasil.

Comercializa a través de diversas marcas, todas ellas relacionadas con el sector del caucho, a través de distintas sociedades. Algunas de las marcas de neumáticos más conocidas que son propiedad de Michelin son las que se aprecian a continuación (**Figura 2.2**):



Figura 2.2 Marcas que comercializa el grupo Michelin. Fuente: Intranet Michelin

Estructura su fabricación y comercialización de productos en líneas de producción como Turismo y Camioneta, Camión, Obras Públicas, Agrícola, Avión, Dos Ruedas, Componentes (caucho y elastómeros, refuerzos, etc) y Mapas y Guías. La línea de mercado de reemplazo en Turismo/Camioneta y camión supone el 80% de las ventas del grupo.

Cuenta con un equipo humano de 125.000 personas con una producción anual de 180 millones de neumáticos y 22 millones de mapas y guías; en total Michelin vende 28.000 productos diferentes. Toda esta actividad es coordinada por los gerentes Michel Rollier, Didier Miraton y Jean-Dominique Senard, con la asistencia del Consejo Ejecutivo del Grupo.

2.1.1 Historia del Grupo Michelin SA

“Es en 1889 cuando los hermanos André y Édouard Michelin (**Figura 2.3**) arrancan hacia una gran aventura humana e industrial: poner la innovación al servicio de los medios de transporte modernos, instrumento de libertad y de desarrollo económico.” Fuente: 100 años de Bibendum.

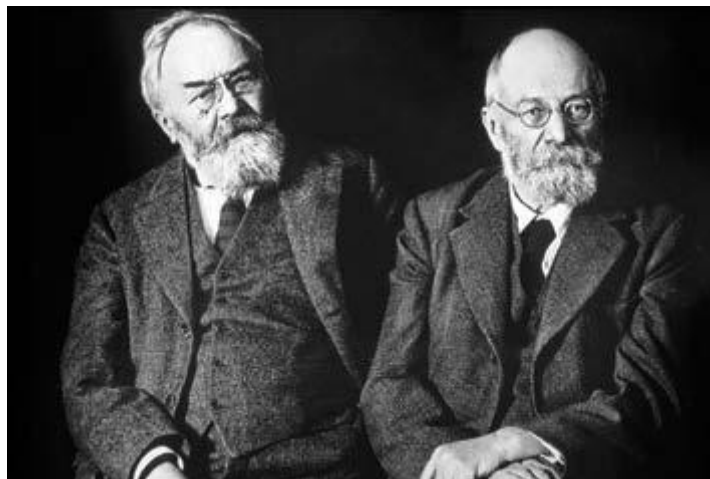


Figura 2.3 Hermanos Michelin. Fuente: 100 años de Bibendum

Pero la historia se remonta mucho más atrás. En 1832, Aristide Barbier, abuelo materno de André y Édouard Michelin se asocia con su primo Nicolas Edouard Daubrée para crear una empresa en la

localidad francesa de Lavort, llamada “Barbier y Daubrée”. La sociedad en un principio iba a dedicarse al desarrollo y fabricación de maquinaria azucarera pero la crecida del río en 1831 acabó con proyecto empresarial.

Poco después, Arístide y Nicolas se ponen de nuevo en marcha y abren en Clermont-Ferrand una fábrica de tejido de caucho y pelotas de goma elásticas, un cambio radical muy probablemente sugerido por la esposa de Daubrée (nieta del descubridor del método para impermeabilizar telas). Tuvieron un gran éxito comercial, aunque resultaban algo caras por estar hechas con caucho natural, tenían, en cambio, un gran aguante.

En 1886, fallecidos los fundadores y tras una serie de malas gestiones administrativas la empresa se encontraba al borde de la quiebra. En un intento por salvar la empresa familiar se pide a André Michelin, que por aquel entonces tenía 33 años, que se ocupe del negocio.

Es nombrado director interino y se encuentra con una gran cantidad de trabajo por realizar. Por ello busca la ayuda de su hermano Edouard, cuatro años menor y que acababa de terminar sus estudios de bellas artes. Finalmente el 28 de mayo de 1889 se convierte en gerente único de la empresa, cuya razón social pasa a ser “Michelin & Cia”.

Esa misma primavera, Edouard tiene un encuentro que cambia su vida y la de su empresa. Una tarde se presenta en la fábrica un ciclista aficionado llamado Grand Pierre que llevaba en su bicicleta un invento llamado neumático. Este revolucionario invento, que había sido patentado un año antes por el escocés John Boyd Dunlop, es mucho más cómodo que las tradicionales ruedas pero más delicadas, Grand Pierre había sufrido un pinchazo.

Los operarios de Michelin ayudan a reparar la rueda, pero les lleva más de tres horas, y después la rueda debe secar durante toda la noche antes de poder utilizarla. A la mañana siguiente el propio Edouard monta en la bicicleta y comprueba las ventajas del neumático. Apenas recorre 100 metros y sufre un pinchazo, pero vuelve a la fábrica convencido de que ese neumático es el futuro.

Lo que Edouard tiene en mente es el neumático desmontable y por ello trabaja con el ingeniero Laroche. El 18 de junio de 1891, tras dos años de exhaustivas investigaciones y ensayos, solicita una primera patente de invención para un “Bandaje neumático para velocípedos y otros vehículos”. Finalmente el 14 de agosto del mismo año la sociedad Michelin deposita una nueva patente, “perfeccionamiento de los bandajes neumáticos para ruedas de velocípedos y otros vehículos”.

Nace así el anhelado “Desmontable”, el primer neumático donde la llanta es independiente del resto del conjunto neumático. Está formado por una cámara de caucho puro que va envuelta por una cubierta que se une a la llanta mediante dos aros metálicos que van sujetos por tornillos a la llanta. Los tiempos de reparación frente a pinchazos rondan los 15 minutos.

El 6 de septiembre, 24 días después de haber presentado la última patente, se pone a prueba el neumático desmontable en una carrera ciclista de ida y vuelta entre París y Brest (recorrido total de 1200km). De los 206 participantes de la carrera, sólo Charles Terront acepta calzar los neumáticos de Michelin. Aunque tiene que cambiar tres veces sus neumáticos debido a los muchos clavos de la carretera gana la carrera con un tiempo de 71 horas y 18 minutos. El siguiente en acabar la carrera es Laval, el teórico favorito, que lo hace 9 horas después. El tercer clasificado lo hace un día después.

En la siguiente imagen aparece la portada de “Le Petit Journal” (**Figura 2.4**) con Charles Terront tras su victoria:



Figura 2.4 Portada de "Le Petit Journal" 1891. Fuente: 100 años de Bibendum

Tras esta enorme publicidad la fábrica de Clermont queda obsoleta ante la avalancha de peticiones de neumáticos desmontables por ello la fábrica es ampliada y la plantilla pasa de 300 a más de 3.000 obreros.

Por aquella época surge un nuevo invento, el automóvil y pronto los hermanos Michelin centran su objetivo en equipar a esta nueva revolución. Comienza así la fabricación de neumáticos para automóviles en Michelin.

2.1.2 Michelin España-Portugal

Michelin llega a España a comienzos del siglo XX, concretamente en 1909 con la apertura de una oficina comercial en Madrid, en la calle Sagasta. La producción industrial de Michelin en España llega con la apertura de la fábrica de Lasarte en 1934: esta fábrica comenzó elaborando neumáticos para turismos y, posteriormente, fabricó desde neumáticos de bicicleta hasta parches de reparación, cámaras de aire, disoluciones etc.

En la actualidad su actividad está dedicada a la fabricación de cubiertas para moto, siendo una de las principales factorías especializadas en este producto del mundo. Puede observarse en la siguiente **Figura 2.5** la fábrica de Lasarte en los años 70:



Figura 2.5 Fábrica de Lasarte (1970). Fuente: Intranet Michelin

La segunda fábrica de Michelin en España sería la de Vitoria, inaugurada en 1966 y dedicada enteramente a la producción de neumáticos de obras públicas. Entre 1966 y 1970 se fueron poniendo en marcha los cambios precisos para la fabricación de neumáticos de turismo y obras públicas, además de plantas para confeccionar productos semiterminados (mezclas de goma, cables, aros, tejido metálico etc.). Actualmente, esta sección de Ingeniería Civil es la de mayor volumen de producción del grupo Michelin.

En 1970 nace la fábrica de Aranda de Duero especializada en cubierta de camión. Un año después la fábrica produce también conjuntos neumáticos (rueda, cubierta, válvula clip, masa de equilibrado y puesta a presión) para su inmediata incorporación al vehículo. Actualmente, su actividad está dedicada a la producción de neumáticos de camión, siendo esta fábrica la planta industrial más importante y productiva del Grupo en esta línea.

Finalmente, en 1973 se abren los dos centros que completarán el mapa de Michelin en España: la fábrica de Valladolid y el Centro de Experiencias Michelin Almería (CEMA). El Centro de Experiencias Michelin Almería es uno de los centros de ensayo más importantes del mundo y desarrolla una importante actividad para diversas líneas de producción, ya que en él se prueban tanto neumáticos de camión como de obras públicas, tractor, turismo y avión. Por último, nace la Compañía Luso Pneu en 1974, comenzando así el despegue del mercado portugués. Podemos observar en la siguiente ilustración (**Figura 2.6**) la distribución de Michelin en la península Ibérica:

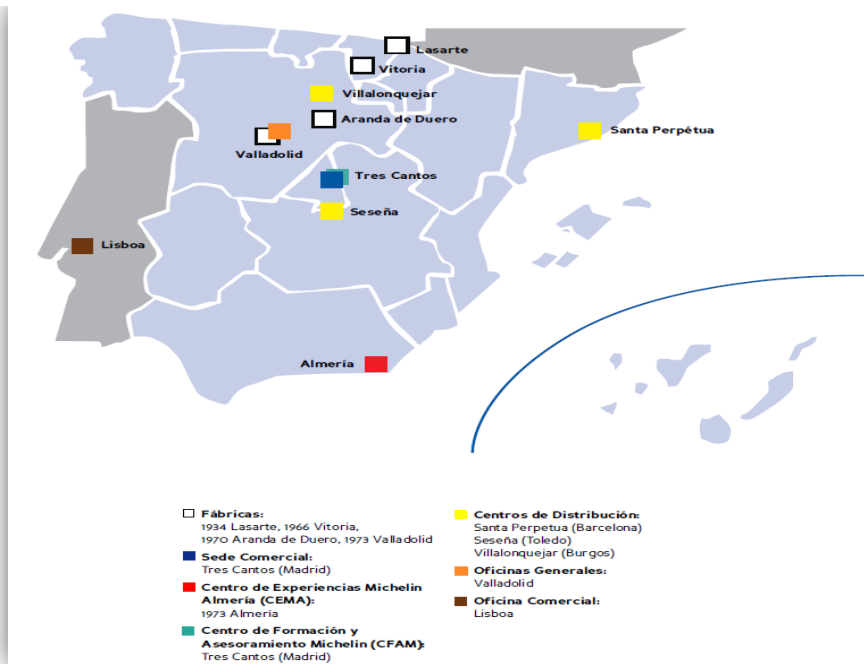


Figura 2.6 Distribución de Michelin en la península Ibérica. Fuente: Intranet Michelin

2.1.3 Michelin Valladolid

La fábrica de Valladolid comienza su andadura en 1973 con la elaboración de neumáticos de turismo para el mercado norteamericano y, dos años más tarde, también para el mercado europeo. En esa misma época añade también a su producción otros productos (semiterminados, neumáticos agrícolas, camión etc.). En la siguiente **Figura 2.7** puede observarse una instantánea aérea de la fábrica de Michelin Valladolid del año 75.



Figura 2.7 Fábrica de Valladolid (1975). Fuente: Intranet Michelin

La fábrica Michelin Valladolid cuenta hoy en día con diferentes líneas de productos (mezclas, agrícola, turismo y renovado) y se caracteriza por ser la única de las fábricas españolas que renueva

neumáticos de camión marca Michelin. Cuenta con una plantilla de 1.640 empleados y una capacidad de fabricación de neumáticos de 89.800 toneladas.

Las líneas de producto en Valladolid son: Agrícola, Camión (Renovado), Turismo-Camioneta y Semiterminados. En el recinto de la fábrica se encuentran también las Oficinas Generales que acogen la dirección de los Servicios Grupo de la empresa en la Península Ibérica.

El 80% de su producción está destinada a los grandes fabricantes de vehículos como son Toyota, General Motors, Fiat-Alfa, Seat-Audi-Volkswagen, Citroën y Renault.

2.2 Fabricación del neumático

La fabricación de un neumático puede parecer a simple vista un proceso sencillo ya que se trata de un producto muy compacto y homogéneo, pero nada más lejos de la realidad. El neumático es el único punto de contacto entre el vehículo y la carretera y por tanto debe alcanzarse un equilibrio óptimo en adherencia, tracción, duración, confort, sonido, eficiencia energética y coste, de ahí la importancia en su fabricación. En su producción intervienen más de 200 componentes, entre materias primas y productos semiacabados, tratando de buscar un comportamiento adecuado.

Un neumático busca: rodar por el mayor número de superficies, soportar la carga del vehículo, hacer más segura la conducción, guiar el vehículo en las trayectorias decididas por el usuario, transmitir al suelo los esfuerzos de frenado y de movimiento, amortiguar tanto los ruidos como las vibraciones mecánicas y durar el máximo tiempo posible.

Pese a su aspecto homogéneo el neumático está formado por una gran cantidad de productos que se van añadiendo en las múltiples etapas del proceso, como puede observarse en la siguiente imagen (**Figura 2.8**) la arquitectura del neumático es algo realmente complejo:

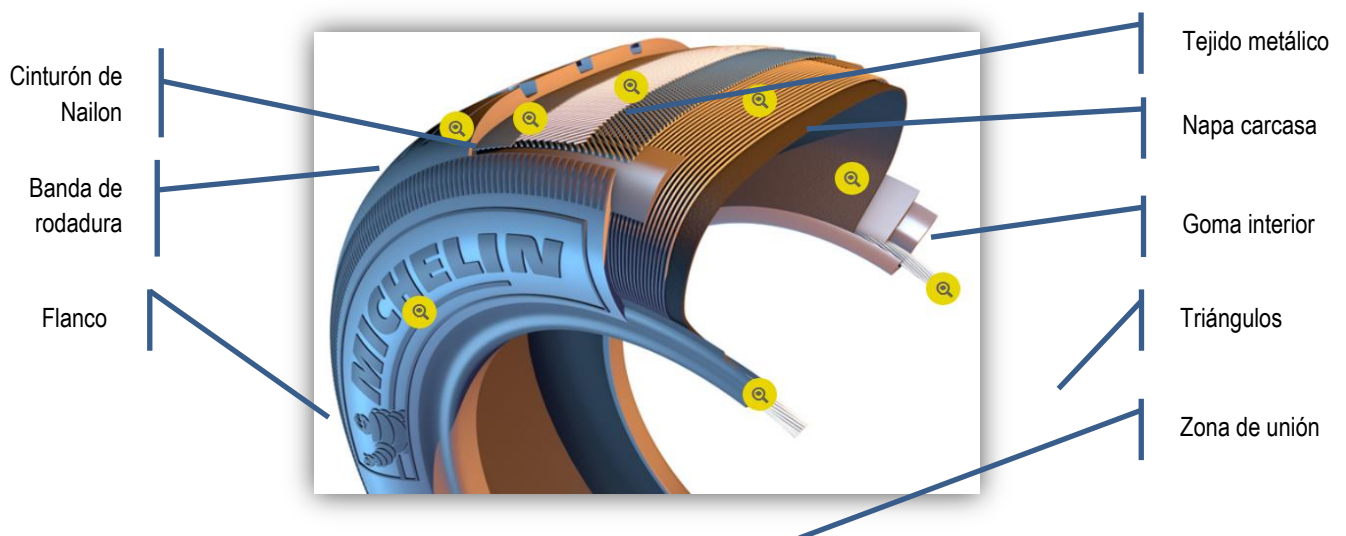


Figura 2.8 Arquitectura del neumático. Fuente: Intranet Michelin

En un neumático entran en juego más de 200 materias primas entre los que destacan: cauchos natural y sintético, negros de carbono, sílices, azufres, plastificantes, vulcanizantes, hilos metálicos o textiles como el poliéster, el rayón y el keblar. Todos estos productos se tratan para convertirse en telas textiles y metálicas, productos planos y perfilados y aros. El conjunto de todos estos productos otorgan al neumático sus propiedades tan características.

Se muestra a continuación (Figura 2.9) una simplificación del proceso de fabricación que desarrollaremos más adelante:

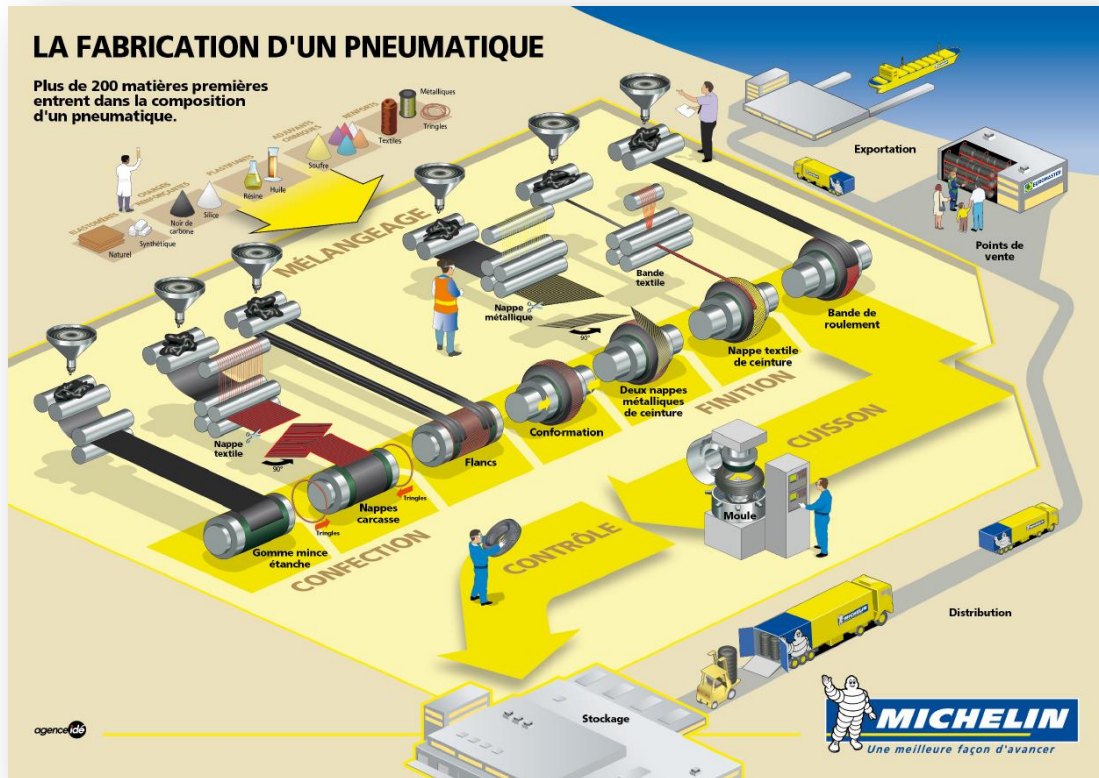


Figura 2.9 Proceso de fabricación del neumático. Fuente: Intranet Michelin

A modo de resumen, en una primera fase se fabrican todos los productos que posteriormente se irán añadiendo al neumático en cada una de las etapas (*preparación de los productos semiterminados*). En una segunda fase se realizan todas las etapas de *confección del neumático* que la dividimos en diferentes etapas:

En primer lugar, se coloca en primer lugar la goma estanca que evita las pérdidas de aire del neumático. A continuación se pone el tejido textil y los aros laterales. En tercer lugar, se sitúan los flancos y se conforma el neumático dándole volumen.

En cuarto lugar se añade el tejido metálico que será el refuerzo que soporte los movimientos de tracción. A continuación se añade el tejido textil cinturón y, como última etapa de confección, se añade la banda de rodadura.

En una tercera fase se realiza la *cocción de las carcassas* para que todos los materiales se adhieran correctamente y terminen de obtenerse todas las propiedades deseadas. En la última fase se procede al *control y verificación de los neumáticos* para comprobar que cumplen con los requisitos establecidos.

2.2.1 Preparación de los productos semiterminados

En esta etapa se preparan los elementos que se ensamblan en la confección y terminación del proceso de producción. Consiste en tres actividades fundamentalmente (**Figura 2.10**): fabricación de la mezcla, preparación de goma y preparación del cable de acero.



Figura 2.10 Actividades de preparación de los semiterminados. Fuente: Diario Motor

El proceso comienza con el tratamiento del caucho que se pasa por un sistema de rodillos para conseguir unas finas láminas. Posteriormente se le añaden una serie de aditivos entre los que destaca el “negro de humo”, que refuerza las propiedades mecánicas y le confiere el color negro. Se añade también azufre, activadores, antioxidantes, retardadores y acelerantes, que serán clave en el proceso de cocción.

2.2.2 Ensamblado

El neumático se monta sobre un tambor rotatorio que cuenta con una zona central flexible de manera que permite aproximar los extremos. En primer lugar se coloca sobre el tambor lo que se conoce como goma estanca pues impide el paso de agua y el escape de aire, esta goma hará la función de cámara de aire del neumático. En segundo lugar se coloca la napa carcasa que consiste en una armadura de cables textiles posicionados en paralelo que formarán el esqueleto del neumático. A continuación se coloca en los extremos de la goma una banda de goma perfilada donde se sitúan seguidamente dos aros metálicos muy resistentes cuya función es mantener firme la unión entre el neumático y la llanta (**Figura 2.11**)

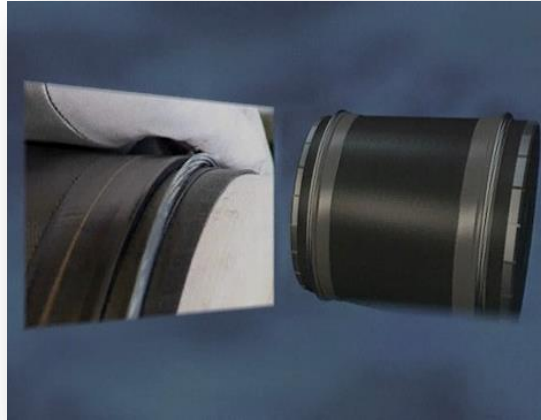


Figura 2.11 Goma perfilada y aros. Fuente: Diario Motor

El siguiente paso es, a través del inflado de la zona central del tambor, el volteo de la napa carcasa sobre los aros de forma que estos quedan ya sujetos. A continuación se añaden una serie de capas (**Figura 2.12**) que varían en función del tipo de neumático y en las que destaca el tejido metálico, cuya disposición entrecruzada le hace soportar las tracciones a las que se ve sometida la rueda, y los flancos, goma flexible y robusta cuya finalidad es proteger al neumático de posibles agresiones laterales.



Figura 2.12 Proceso de confección del neumático. Fuente: Diario Motor

A continuación se acercan los extremos del tambor por su zona central flexible y se le otorga al neumático la definitiva forma toroidal (**Figura 2.13**):



Figura 2.13 Forma toroidal definitiva del neumático. Fuente: Diario Motor

Como último paso del ensamblado se encuentra la adición de la banda de rodadura que es la parte que está en contacto con el suelo y sobre la que se imprime el dibujo.

2.2.3 Cocción

Hasta este momento tenemos lo que se conoce como neumático crudo que posee propiedades plásticas y puede deformarse, a través de la cocción se busca que el neumático adopte características elásticas para poder recuperar su forma tras las deformaciones a las que se verá sometido.

Se introduce el neumático crudo en un molde como el de la **Figura 2.14** que lleva impreso por dentro todos los marcajes y el dibujo de la suela. En el molde el agua circula por una membrana interior que se hincha y pega el neumático a las paredes interiores del molde.

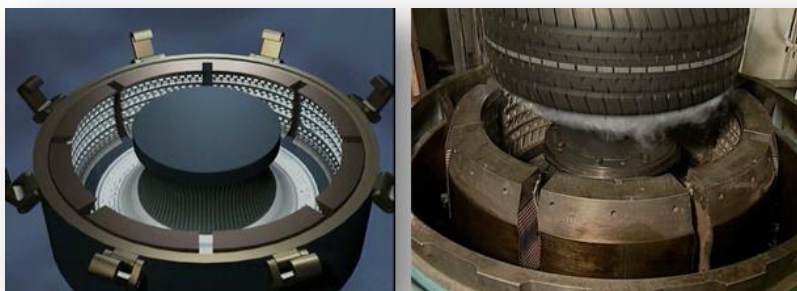


Figura 2.14 Prensas de cocción. Fuente: Diario Motor

Durante la cocción, que dura aproximadamente 10 minutos y se realiza a unos 150° C, se produce el proceso de vulcanización. La goma deja de tener un carácter plástico y pasa a ser elástico. Una vez cocido el neumático se separa del molde y comienza a enfriarse, tomando la forma final. El enfriamiento se produce al aire libre.

2.2.4 Controles

Una vez enfriado el neumático pasa por una serie de controles antes de proceder a su venta. Se realizan controles sobre la resistencia, la flexibilidad o la elasticidad. Existen varios tipos de controles, manuales y automáticos.

Los manuales se realizan a través del tacto para comprobar si tiene la consistencia necesaria, si tiene un buen aspecto o si los dibujos se han impreso correctamente. Los controles automáticos consisten en un análisis a través de rayos X y ultrasonidos para comprobar que las estructuras interiores están correctamente montadas. En caso de pasar todas las pruebas se procede a su comercialización.

Una vez presentada la empresa y el proceso de fabricación de neumáticos, llega el momento de describir el sistema que será objeto de estudio en el presente proyecto.

2.3 Definición del sistema

El sistema a simular debe estar perfectamente establecido. La empresa y el desarrollador del modelo deben acordar los límites del modelo, qué entra en la simulación y qué queda fuera, y las interacciones con otros procesos que se tendrán en cuenta.

Se procede, a continuación, a describir la instalación que se modelará y a explicar su funcionamiento.

2.3.1 Descripción de la instalación

La instalación objeto de estudio consta de diecisiete máquinas agrupadas en dos bloques atendiendo a su funcionalidad; las máquinas de preparación y las máquinas de confección/terminación. Las siete primeras máquinas forman parte del bloque confección y las diez siguientes del bloque confección terminación, (**Tabla 2.1** y **Tabla 2.2**):

Tabla 2.1 Máquinas de preparación

PREPARACIÓN	
Máquina	Nombre
1	CG1
2	CG2
3	CT1
4	CLR
5	BL1
6	BL2
7	DO2

Tabla 2.2 Máquinas de confección/terminación

CONFECCIÓN/TERMINACIÓN	
Máquina	Nombre
8	MC1
9	MC2
10	MC3
11	MF1
12	MF2
13	BA1
14	BA2
15	BA4
16	BA5
17	BA6

Las máquinas del bloque confección elaboran los productos que servirán como productos de entrada para las máquinas del bloque terminación. Funcionan con un sistema de producción kanban, ya que las máquinas del bloque preparación sólo producirán en caso de necesitar aprovisionamiento las máquinas de la confección/terminación. Dado que las máquinas del bloque I funcionan con un ciclo de tiempo más corto y por ello fabrican a mayor velocidad que la velocidad de consumo que las máquinas del bloque II. El arranque o paro de las máquinas de preparación se regula a través del nivel de stock, como puede observarse a continuación (**Figura 2.15**):

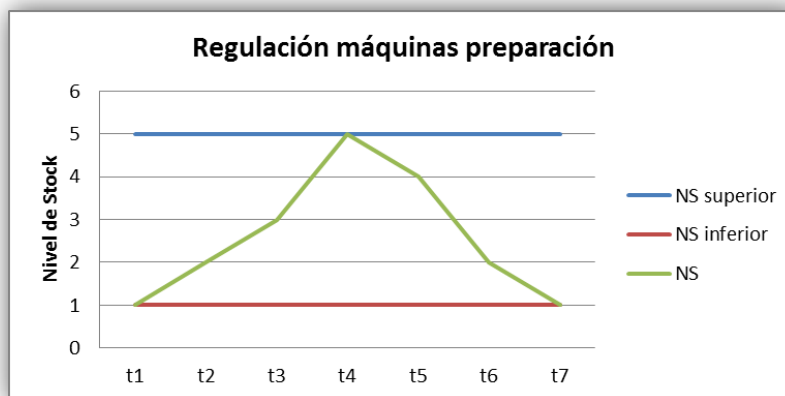


Figura 2.15 Regulación de las máquinas de preparación

Los niveles de stock se regulan entre dos niveles, el inferior y el superior, en este caso 1 y 5 respectivamente. En el instante de tiempo t1 el nivel de stock está en 1 y por tanto las máquinas de preparación comienzan a funcionar hasta que en el instante t4 llegan al nivel superior de stock (en el ejemplo su valor es 5), en ese momento paran su fabricación, las máquinas del bloque II consumen estos productos y disminuye el nivel de stock y cuando éste llegue al nivel mínimo (instante t7) las máquinas del bloque II comenzarán a fabricar de nuevo.

A continuación se presenta una tabla explicativa de los productos de entrada y salida que genera cada máquina (**Tabla 2.3**):

Tabla 2.3 Productos de entrada y salida

Máquina	Producto entrada 1	Producto entrada 2	Intercalador entrada 1	Producto salida 1	Producto salida 2	Intercalador salida 1
1	BVTM	-	PLITM	BLTM	-	PVITM
2	BVTM	-	PLITM	BLTM	-	PVITM
3	BVTT	-	-	BLTT	-	-
4	BVTT	-	-	BLTT	-	-
5	JVBL	-	-	JLBL	-	-
6	JVBL	-	-	JLBL	-	-
7	BVGI	-	PLIGI	BLGI	-	PVIGI
8	BLGI	BLTT	PVIGI	BVGI	BVTT	PLIGI
9	BLGI	BLTT	PVIGI	BVGI	BVTT	PLIGI
10	BLGI	BLTT	PVIGI	BVGI	BVTT	PLIGI
11	JLBL	BLTM	PVITM	JVBL	BVTM	PLITM
12	JLBL	BLTM	PVITM	JVBL	BVTM	PLITM
13	JLBL	BLTM	PVITM	JVBL	BVTM	PLITM
14	JLBL	BLTM	PVITM	JVBL	BVTM	PLITM
15	JLBL	BLTM	PVITM	JVBL	BVTM	PLITM
16	JLBL	BLTM	PVITM	JVBL	BVTM	PLITM
17	JLBL	BLTM	PVITM	JVBL	BVTM	PLITM

La instalación cuenta con una serie de almacenes comunes que abastecen productos a todas las máquinas. Cada máquina cuenta con un stock avanzado (SA) de abastecimiento desde donde el operario coge el material y lo incorpora a la máquina y con un stock avanzado de evacuación donde el operario deposita el producto acabado a la espera de que sea retirado.

Cada máquina consta de un “conductor” que es el encargado de aprovisionar la máquina con los productos necesarios o de retirar el producto hacia el SA y, además, debe controlar que se efectúa de manera correcta el pedido de materia prima para la máquina y el pedido de evacuación de producto terminado.

El aprovisionamiento y evacuación del stock avanzado se realiza mediante un sistema de transporte de vehículos guiados automáticamente (**Automatic Guided Vehicle**) que depositan o retiran material desde los almacenes comunes.

Los AGV son vehículos guiados a través de un láser de reconocimiento de sensores que se encuentran distribuidos por la fábrica (**Figura 2.16**):

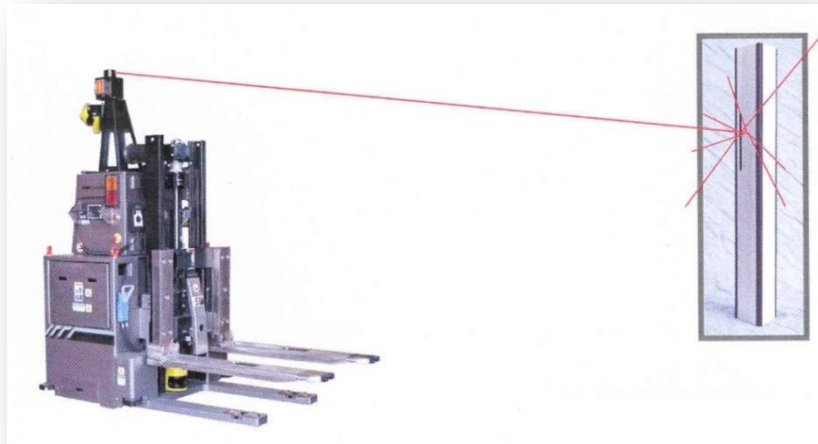


Figura 2.16 Detector de posición del vehículo. Fuente: Intranet Michelin

Los sensores no son más que paneles reflectantes que emiten al AGV información de la posición en la que se encuentran y esta información, a su vez, es enviada al servidor para controlar en todo momento la localización de los AGV. En la **Figura 2.17** se observa un AGV con los diferentes elementos de los que dispone.

El AGV cuenta con una serie de sensores de detección de obstáculos (personas, carros manuales u otra serie de objetos que obstaculicen su recorrido) que se encuentran situados delante, detrás y a los lados del vehículo. Cuenta también con un detector en las paletas donde se posa la carga para detectar si hay o no presencia de carga, detecta también si en un momento dado por un choque puede haber perdido la carga. Para el manejo de productos cuenta con un sistema hidráulico que mueve las pinzas de transporte de productos.



Figura 2.17 Automatic Guided Vehicle. Fuente: Intranet Michelin

También posee un sistema de iluminación que informa de su estado así como de su movimiento, las luces rojas parpadean en caso de que el AGV se encuentra parados por avería, las luces naranjas superiores parpadean cuando el AGV se encuentra en funcionamiento y las luces naranja inferior formada por dos bombillas se ilumina cuando hay un cambio de dirección (se ilumina una bombilla u otra en función de la dirección).

Dispone también de dos setas de emergencia que permiten parar inmediatamente el carro y de una pantalla que informa de su estado (en funcionamiento, parado por avería etc.), de su destino, del producto que transporta y del nivel de batería en el que se encuentra. Cuando el nivel de batería del AGV baja a 30% se envía el carro a la zona de carga. En el momento que un AGV llega a la zona de cambio de batería se envía una señal al operario encargado de mantenimiento que realiza el recambio de la batería de forma manual.

La instalación cuenta en la actualidad con once carros disponibles y en funcionamiento para la evacuación y abastecimiento de materiales y con veintidós baterías, once que se encuentran colocadas en los AGV en funcionamiento y otras once baterías en la zona de carga, listas para el recambio.

La empresa JBT Corporation (**Figura 2.18**) ha sido la encargada de la implementación del sistema de vehículos guiados automáticamente en la fábrica.



Figura 2.18 Logotipo de JBTC. Fuente: JBT Corporation

JBTC desarrolla un programa para expandir y cambiar el sistema de Vehículos Guiados Automáticamente en caso de que la empresa necesite añadir un vehículo más o incorpore una nueva área de trabajo al programa. Ofrece un sistema de reparación a domicilio para reducir los costes de mantenimiento. Utiliza una base de datos de SQL donde se almacenan todos los datos que necesita el vehículo además de toda la información que éste produce.

El guiado de los AGV se lleva a cabo a través de un láser, colocado en la parte superior del vehículo, patentado por JBTC que ofrece gran precisión y flexibilidad al sistema de transporte. Cuenta, además, con una serie de detectores de presencia que ordenan al AGV su detención o ralentización. JBTC dispone de un sistema de mantenimiento 24 horas además de un servicio de revisiones preventivas periódicas.

2.3.2 Entorno espacial

La disposición del taller es la que se muestra en la **Figura 2.19**. Las máquinas se encuentran distribuidas por todo el taller y se pueden diferenciar los dos grandes bloques de producción y de terminación/confección, se observa también entre ellas la disposición de los almacenes comunes, la zona de almacenes a pie de máquina, la ruta seguida por los AGV, las zonas de estacionamiento de los carros y la zona de cambio de batería.

Operarios, AGV y demás personal de la fábrica comparten espacio de convivencia, los carros tienen sus zonas de operación marcadas en el suelo y, normalmente, los operarios circulan por el borde exterior de las trayectorias. Si bien en algunos puntos se entrecruzan los caminos, de ahí la importancia del correcto funcionamiento de los sensores de proximidad de los carros.

Las diferentes vías y caminos están ya establecidas tanto en dirección y sentido como en capacidad de ocupación de carros. La disposición de las máquinas y de los almacenes es fija. El único cambio que admiten es el cambio de lugar de almacenamiento de determinados productos, otros en cambio no admiten cambios de localización en el almacén por sus características geométricas dado que las baldas de las estanterías están especialmente adaptadas.

2.3.3 Función

Se procede a continuación a la explicación del método de funcionamiento de la instalación. Como ya se ha explicado antes, todas las máquinas cuentan con unos operarios encargados de abastecer de material y de retirar el producto de la máquina. Además de realizar el aporte y la retirada de material

de la máquina se encargan de la emisión de peticiones al servidor, esto es, en el momento que se incorpora materia prima a la máquina el operario envía una petición de abastecimiento de materia prima al servidor. En dicha petición se indica qué máquina requiere de abastecimiento, qué producto precisa y la localización del punto de descarga. De la misma forma cuando se obtiene el producto terminado en una máquina el operario envía una petición de evacuación al servidor donde se indican los datos correspondientes.

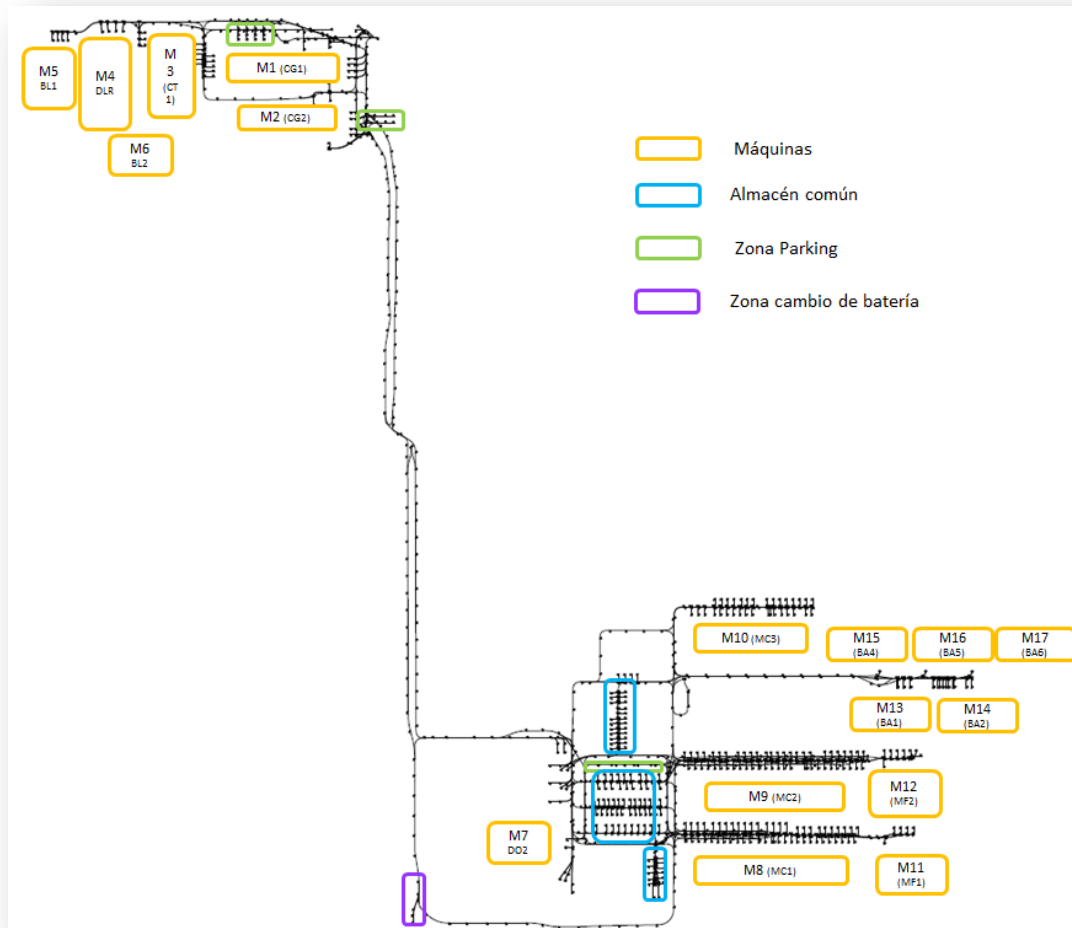


Figura 2.19 Disposición del taller. Fuente: Intranet Michelin

Todas las peticiones enviadas por los operarios se almacenan en un buffer. El servidor o centralita gestiona todos los pedidos recibidos con un sistema FIFO, de forma que sabe en todo momento el orden en el que se han realizado esas peticiones, lo que requiere cada máquina, qué productos hay en circulación, su ubicación y el número de carros disponibles. Por tanto, en el momento que haya una petición de una máquina, el sistema sabe dónde encontrar el producto que la máquina requiere y qué AGV enviar. En caso de que haya varios AGV enviará cualquiera de ellos, si únicamente hay un carro disponible enviará ese carro y en caso de que no haya ningún carro disponible ese pedido se queda en cola a la espera de que haya un carro libre.

Cuando no hay ningún pedido a la espera, los AGV cuentan con varias zonas de estacionamiento repartidas por el taller donde permanecen hasta que se requieran sus servicios. Además de

abastecimiento y evacuación de material en las máquinas, la centralita también gestiona los pedidos de cambio de batería, de forma que en caso de que haya pedidos normales y pedidos de cambio de batería se dará prioridad a este último. En caso de no haber pedido de ningún tipo el carro se envía al parking más cercano. Representamos este funcionamiento por etapas:

- **Fase 1:** aporte de material a la máquina
En esta etapa el operario toma el producto desde el stock avanzado de aprovisionamiento y lo incorpora a la máquina.
- **Fase 2:** Rellenado de la petición de aprovisionamiento
En esta etapa se completan los datos del pedido (producto, máquina, etc.).
- **Fase 3:** Envío de la petición de aprovisionamiento a la centralita
En esta etapa se procede al envío de la petición a la centralita.
- **Fase 4:** Gestión de la centralita
Una vez que la centralita recibe un pedido procede a su asignación a un vehículo según distintos criterios: por gestión FIFO, el primer pedido el llegar es asignado a un vehículo libre; por gestión según la fecha de caducidad del producto, el pedido con menor fecha de caducidad es el primero asignado, etc.
- **Fase 5:** Procesamiento del producto
Una vez que la máquina cuenta con material comienza con su procesamiento.
- **Fase 6:** Aprovisionamiento del AGV
El vehículo que la centralita había asignado en el pedido de aprovisionamiento procede a la deposición del producto en el SA de aprovisionamiento.
- **Fase 7:** Evacuación del producto
Una vez que la máquina ha terminado de procesar el producto el operario retira el producto terminado y lo deposita en el stock avanzado de evacuación.
- **Fase 8:** Rellenado y envío del pedido de evacuación
El operario notifica a la centralita la existencia de la necesidad de retirada del producto, rellena el correspondiente pedido y lo envía.
- **Fase 9:** Gestión de la centralita
Al igual que en la fase 4 la centralita realiza la gestión para determinar en qué momento ese pedido es asignado a un vehículo y a qué vehículo asignarlo.
- **Fase 10:** Evacuación del AGV
El vehículo correspondiente llega vacío al stock de evacuación, carga el producto y se lo lleva.

2.3.4 Formulación del modelo

La formulación de un sistema comienza con la comprensión del sistema para posteriormente desarrollar un modelo simplificado que refleje todos los aspectos relevantes del sistema que pretende reflejar. Discernir qué aspectos son relevantes para el sistema y cuáles no lo son está bajo la decisión

del desarrollador que decidirá qué criterios pretende estudiar con mayor detenimiento y cuáles no aportan información valiosa al sistema. Así mismo debe indicarse las limitaciones que presenta el modelo frente al sistema real.

Entre las limitaciones-hipótesis del modelo encontramos:

- No se conoce la inteligencia del sistema AGV en la priorización de pedidos, se opta por un sistema de gestión FIFO
- Tampoco se conoce cómo realiza el sistema la gestión de almacenes, se opta por un almacén único que contiene todos los tipos de productos y se rellenan y vacían de forma que se mantengan equilibrados los del mismo producto.
- Condiciones viales: simplificación de los puntos de baile.
- Desincronización de preparación-confección/terminación: parada de la preparación en función de los niveles de stock.
- Variedad dimensional y de ciclos: ciclos y rendimientos insertados como una distribución equivalente al mix. Se omiten los movimientos en retorno de llenas (movimiento de material de vuelta a la estantería cuando aún no se ha consumido la totalidad del producto) en los cambios de dimensión, que corresponden a un 15% de movimientos.
- Generalidad de Witness: simplificación de máquinas y adición de elementos inexistentes.

2.3.5 Colección de datos

Los datos necesarios para el funcionamiento del modelo están determinados por la formulación del modelo. Los datos pueden obtenerse a través de registros históricos o a través de mediciones en el propio sistema real. Estos datos deberán ser procesados de forma adecuada a fin de darles el formato necesario en el modelo. Por motivos de seguridad dado que se trata de datos confidenciales se omite su incursión en el presente proyecto. Para la definición del modelo han sido necesarios los siguientes datos (Tabla 2.4, Tabla 2.5, Tabla 2.6 y Tabla 2.7):

Tabla 2.4 Datos del AGV

AUTOMATIC GUIDED VEHICLE
Tiempo de carga
Tiempo de descarga
Tiempo de recorrido por tramo
Tiempo de carga de baterías
Frecuencia de cambio de baterías
Tiempo de paradas
Frecuencia de paradas

Tabla 2.5 Datos máquina

MÁQUINAS
Tiempo de ciclo
Productos utilizados
Niveles de stock de regulación
TRS
Tiempo de parada
Tiempo entre paradas

Tabla 2.6 Datos almacén

ALMACENES
Disposición
Capacidad

Tabla 2.7 Datos vías

VÍAS
Reglas de circulación
Capacidad vías

Para la recogida de datos referentes a los AGV (tiempo de carga, de descarga, tiempo de recorrido de los tramos, frecuencia de cambio de batería y tiempo de carga de batería) se ha empleado la toma de tiempos directa en el terreno. A continuación se detallan las hojas de tomas de datos (Tabla 2.8):

Tabla 2.8 Tabla de toma de datos por observación directa

OBSERVACIÓN					
FECHA		PUESTO		Hoja nº	
OPERACIÓN	Tiempo 1 (cts)	Tiempo 2 (cts)	OPERACIÓN	Tiempo 1 (cts)	Tiempo 2 (cts)

En la información referente a la capacidad de las vías y sus reglas de circulación se disponía de un Route Map (Figura 2.19) suministrado por el propio ordenador que regula su flujo.

Para la recogida de datos de las máquinas en lo referente a los tiempos de ciclo y paradas no ha sido necesaria la toma de datos, la propia máquina genera un archivo txt que posteriormente se exporta a un archivo Excel y tiene una apariencia similar a la siguiente (Tabla 2.9):

Tabla 2.9 Tabla de toma de datos de tiempos de ciclo y averías

Fecha	Hora	Máquina	Código	Tiempo de ciclo	Tiempo parada (min)	Causas	Reparación	Tiempo de reparación

Para la recogida de datos de capacidades y disposiciones de almacenes se disponía de un archivo Excel ya creado y almacenado en los informes del Departamento de Gestión de Ayuda a la Decisión-ORG. Una vez recogidos todos los datos necesarios se procede a su tratamiento.

Análisis de los datos recogidos

Para el tratamiento del conjunto de los datos recogidos se han llevado a cabo diferentes procedimientos en función de la utilidad de dichos datos. Veamos para cada grupo de datos su tratamiento específico.

Para los **Automatic Guided Vehicle** el tiempo de carga y el tiempo de descarga se ha establecido como un tiempo fijo a través de la inserción de un valor medio obtenido de la observación directa. El tiempo de recorrido se ha establecido como fijo (en caso de no ocurrir averías, en caso de que el vehículo sufra una avería el tiempo deja de ser fijo) a través de la observación directa del sistema. El tiempo de cargas de baterías se ha conseguido a través del cronometraje directo y de la inserción de los valores obtenidos en el programa Stat-Fit (cuyo funcionamiento se desarrolla en el Anexo *Stat-Fit*) que extrae a partir de estos datos de entrada una distribución estadística válida.

La frecuencia de cambio de batería se ha establecido como fija, cada ochenta movimientos (se considera un movimiento como una carga, con su consiguiente desplazamiento y la descarga en el lugar adecuado). Este valor es obtenido a través de la observación directa y del valor medio obtenido. Para la inclusión del tiempo de paradas se ha realizado una observación directa a través de las ventanas de control del sistema, de forma que se pueden extraer datos sobre el número de vehículos averiados, la frecuencia y la duración de la avería. De esta forma se ha obtenido una frecuencia y una duración, ambas fijas, para la realización de las paradas de los vehículos.

Para la inserción de los tiempos de ciclo de las **máquinas** a través de los archivos de Excel se han realizado una serie de ajustes, filtrando aquellos valores que no correspondan con una marcha normal de producción, es decir, pruebas de calibrado, ensayos de producto, etc. A través de su tratamiento se han obtenido una serie de distribuciones, cada tiempo de ciclo de máquina cuenta con un peso en función de la probabilidad de ocurrencia de cada tiempo de ciclo. Los productos utilizados así como los niveles de stock que regulan el funcionamiento de las máquinas de preparación figuran como datos ya creados en los archivos del departamento y no ha sido necesaria ni su obtención ni su tratamiento específico.

Los TRS (porcentajes de funcionamiento de las máquinas) son datos que se conocen, así como el porcentaje de tiempo de avería de las máquinas. Para su inserción en el modelo ha sido necesario su tratamiento estadístico a fin de obtener un tiempo de parada y un tiempo entre paradas. Se han introducido estos datos a través de distribución *LOGNORMAL* (*media, desviación, semilla*) tanto para el tiempo de avería como para el tiempo entre averías. Esta distribución se obtiene a través de la utilización de la herramienta Stat-Fit. Se distinguen entre dos tipos de averías, por un lado las denominadas *Pnn* y, por otro, las denominadas *Aleas*, cuyo origen tiene distinta naturaleza.

Para la obtención de la disposición de los **almacenes** así como su capacidad no ha sido necesario un tratamiento específico, basta con su inserción directa. Por último, la capacidad de las **vías de circulación** se ha introducido directamente en la ventana de configuración de las vías.

3 Implementación del modelo parte I: Elementos discretos

Una vez que ya se conoce el sistema a estudiar y los datos a emplear, llega el momento de construir el modelo de simulación que lo represente. En este sentido, en los dos próximos capítulos se va a proceder a describir los aspectos principales del modelo desarrollado.

En concreto, a lo largo del presente capítulo se van a describir los aspectos clave de los distintos elementos discretos (piezas, máquinas, almacenes, vehículos, tracks y recursos) que componen el modelo de simulación, así como las reglas y acciones que rigen su funcionamiento. Podrían denominarse como aquellos elementos tangibles que forman parte del sistema real.

3.1 Piezas

Son las entidades que fluyen a través del modelo. En nuestro caso distinguimos tres grandes grupos de piezas: los productos, los pedidos y las baterías. Los productos son las piezas que se procesan en la instalación. Los pedidos son las peticiones enviadas por los operarios a la centralita donde se solicita el envío o la evacuación de material por parte de una máquina. Las baterías son las piezas que actúan como fuente de energía de los carros automáticos. Se detalla a continuación cada uno de ellos:

3.1.1 Productos

El total de los productos está compuesto por 12 tipos diferentes que se procesan en las distintas máquinas. Los diferentes productos son: JVBL, JLBL, BVTT, BLTT, BVTM, BLTM, PVITM, PLITM, BVGI, BLGI, PVIGI y PLIG. Todas las piezas pertenecen al grupo nº 2 de atributos, como se muestra en la **Figura 3.1**, de forma que se asocian estos valores a la entidad *PEDIDOS* que también pertenece al grupo dos.

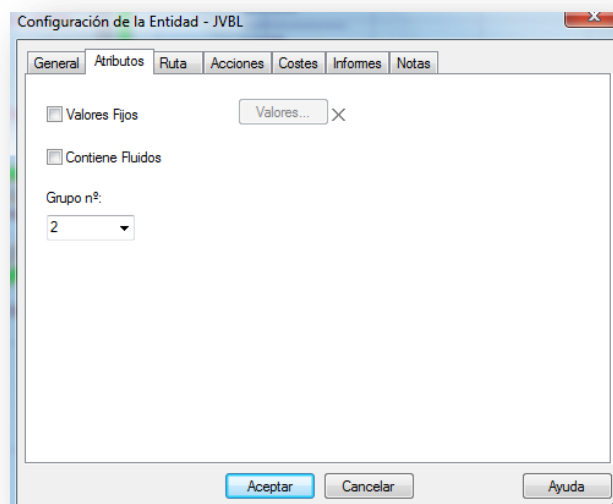
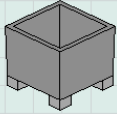


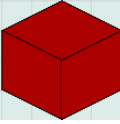
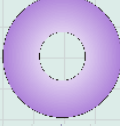



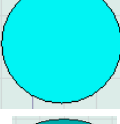
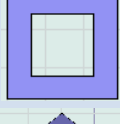
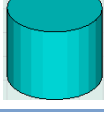
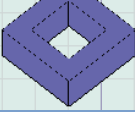


Figura 3.1 Ventana de configuración de atributos asociados a los elementos productos

En la **Tabla 3.1** se muestra la representación gráfica de cada uno de los productos en el modelo:

Tabla 3.1 Representación gráfica de los productos

Nombre	Representación	Nombre	Representación
JVBL		PVITM	
JLBL		PLITM	
BVTT		BVGI	
BLTT		BLGI	
BVTM		PVIGI	
BLTM		PLIGI	

Puesto que se ha establecido que en el momento de inicialización del modelo se abastezca de producto a todas las máquinas las piezas son elementos activos y presentan la siguiente ventana de configuración (**Figura 3.2**):

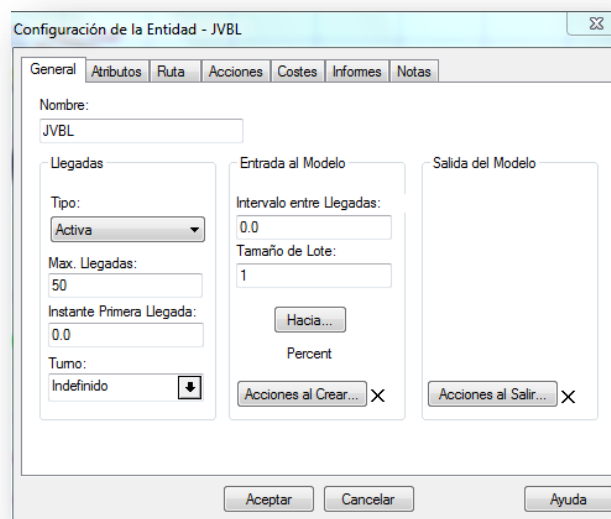


Figura 3.2 Ventana de configuración del producto JVBL

De forma que en el instante inicial se produce un envío de 50 productos de JVBL con un intervalo entre llegadas de 0,0 segundos, es decir se produce de forma instantánea. En **reglas de salida** se ha establecido lo siguiente (**Figura 3.3**):

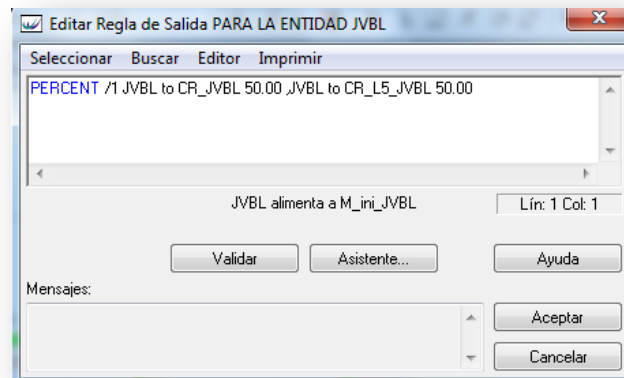


Figura 3.3 Reglas de salida del producto JVBL

De forma que se rellenan los dos almacenes comunes a partes iguales hasta alcanzar el número de piezas marcado como máximo de llegadas. No presenta acciones a la hora de ser creadas ni en la salida.

Las máquinas de procesamiento, los operarios o los stocks avanzados, depende en cada caso, llevan como acciones el cambio de tipo de producto una vez que se ha realizado su procesamiento en la máquina. Debe cambiarse el tipo de producto (*TYPE*) y el icono de éste (*ICON*). Esto se realiza a través de la siguiente sintaxis (**Figura 3.4**):

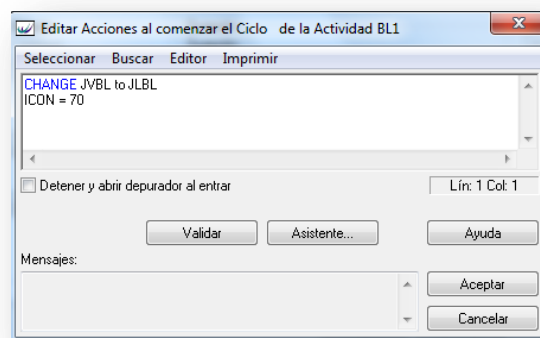


Figura 3.4 Acciones de comienzo de la máquina BL1

A través de esta programación en la primera línea se pasa de tener el producto JVBL a tener el producto JLBL y en la segunda línea se cambia el icono de representación del producto.

3.1.2 Pedidos

Son las peticiones, “*las cartas*” que el operario envía a la centralita donde se especifica, en caso de que sea un pedido de aprovisionamiento, qué material precisa la máquina, dónde cogerlo y dónde depositarlo. Si se trata de un pedido de evacuación el pedido indica qué material debe ser retirado de la máquina, dónde cogerlo y dónde almacenarlo. Se ha representado de la siguiente manera (**Figura 3.5**):

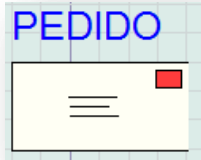


Figura 3.5 Representación gráfica de la pieza pedido

Cada pedido lleva asociado una serie de atributos como son: producto, track de carga, track de descarga y máquina. Dado que la entidad pedido pertenece al grupo nº 2 de atributos, lleva asociado los valores de las entidades productos. Estos atributos son rellenados por los operarios, que abastecen y retiran el producto de las máquinas, con la información correspondiente. Si es un pedido de aprovisionamiento los pedidos se rellenan y envían en el momento que se introduce material a la máquina. Si es un pedido de evacuación el pedido se envía en el momento que el producto sale de la máquina.

Se ha configurado el elemento pedido como una pieza activa de forma que ella misma se mueve hasta el almacén de *PEDIDOS_VACÍOS*. A continuación se muestra la ventana de configuración con las características de la entidad (**Figura 3.6**):

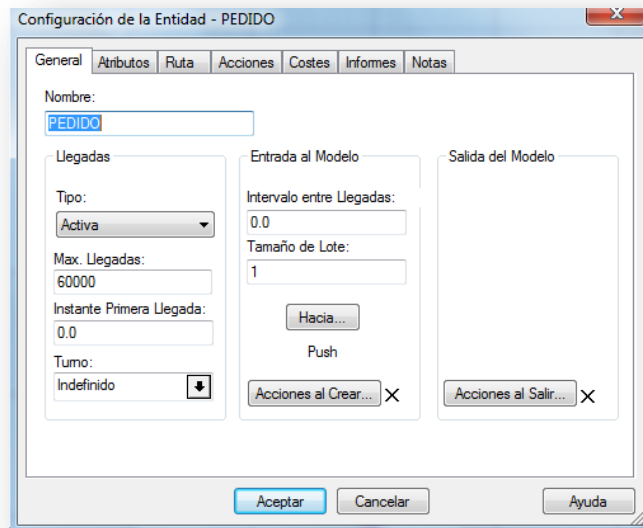


Figura 3.6 Ventana de configuración de la pieza pedido

Se ha establecido un número máximo de llegadas (60.000), un instante de primera llegada (0,0) y un intervalo entre llegadas (0,0) y en la **regla de salida** se establece ese movimiento hacia *PEDIDOS_VACÍOS*, se muestra la sintaxis a continuación (**Figura 3.7**):

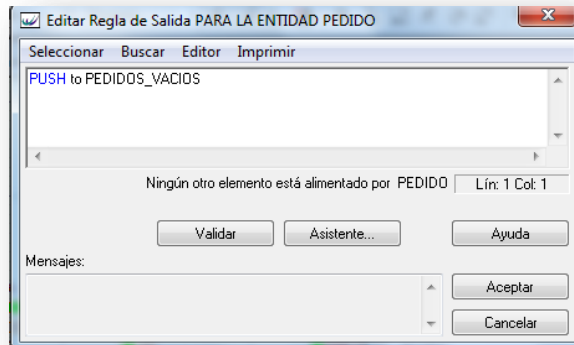


Figura 3.7 Regla de salida del elemento pedido

3.1.3 Baterías

Los pedidos de cambio de batería se gestionan como un pedido de carga y descarga más; por tanto, necesitamos una pieza que coger y dejar. Por ello, se ha introducido la pieza *batería* para cuando se necesite hacer el *pick* y el *drop*. La gestión de los cambios de batería viene especificado en el apartado *máquina de cambio de baterías*, dentro del grupo *máquinas*. Se representa el elemento *batería* con el siguiente icono (**Figura 3.8**):

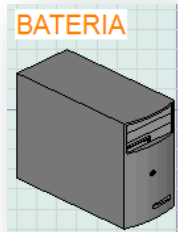


Figura 3.8 Icono del elemento batería

Se trata de una entidad pasiva y, por tanto, no hay acciones de entrada ni de salida, como se aprecia en la ventana de configuración (**Figura 3.9**):

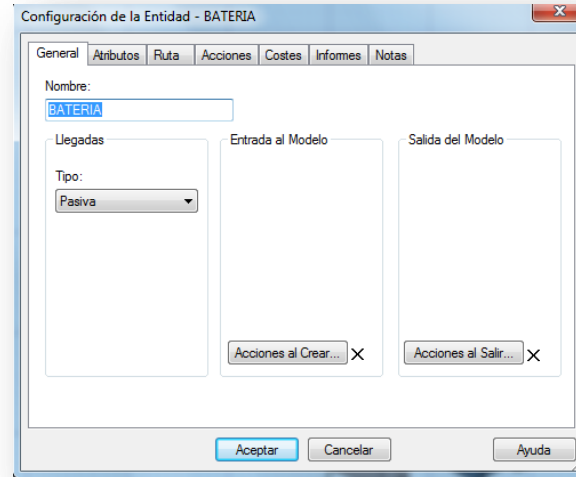


Figura 3.9 Ventana de configuración del elemento batería

3.1.4 Paradas

Se trata de un tipo de pieza pasiva que únicamente es procesada por la máquina averías. Su entrada se produce cada siete minutos en dicha máquina. Se ha representado a través de un círculo rojo. Pertenece al grupo 1 de atributos, es decir, no lleva atributos asociados a diferencia de los pedidos. Se trata de un elemento ficticio, es decir, no tiene ninguna correspondencia con el sistema real.

3.2 Máquinas

Aquí distinguimos seis tipos de máquinas: en un primer lugar, las máquinas de inicialización que se encargan de rellenar los stocks avanzados de las máquinas; en segundo lugar, las máquinas de procesamiento que tratan los productos (por ejemplo CT1, DO2, MC3...); en tercer, lugar la máquina que se encarga del cambio de batería de los carros automáticos; en cuarto lugar, la máquina llamada centralita, que es la encargada de gestionar todos los pedidos que le llegan y de realizar la llamada a los carros; los operarios que envían las peticiones a la centralita; y, por último, la máquina encargada de la generación de las averías de los vehículos. Se detallan a continuación los cinco tipos de máquinas:

3.2.1 Máquinas de inicialización

Este grupo está compuesto por doce máquinas, una para cada tipo de producto, cuya única función es rellenar los stocks avanzados de abastecimiento de las máquinas. Cada máquina envía un único tipo de producto a los stocks avanzados que lo precisen. Se han representado de la siguiente manera (Figura 3.10):

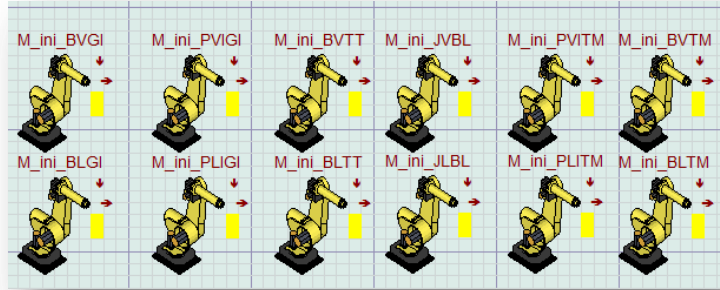


Figura 3.10 Máquinas de inicialización

La ventana de configuración para la máquina de inicialización M_ini_BVGI es la que sigue (Figura 3.11):

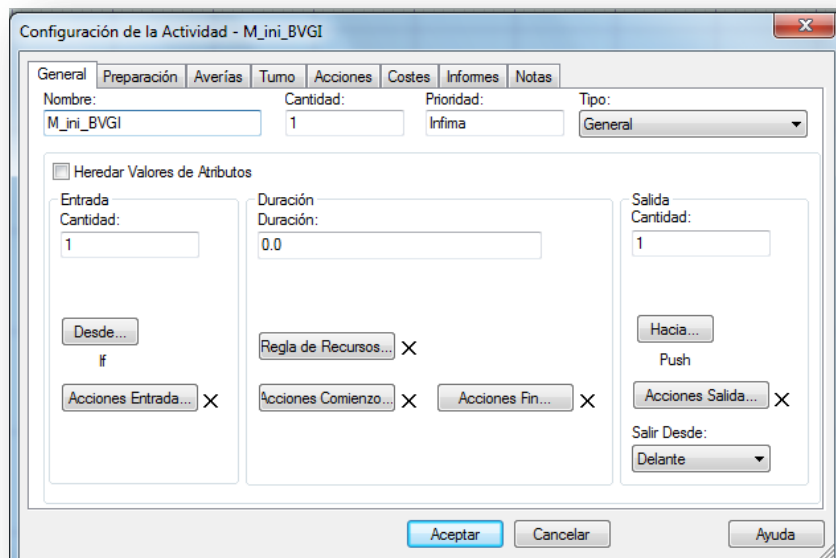


Figura 3.11 Ventana de configuración de la máquina de inicialización del producto BVGI

Se han configurado estas máquinas de forma que su tiempo de ciclo es de 0,0 minutos, es decir, realiza sus movimientos de forma instantánea antes de que comience a correr la simulación. Procesa un número de piezas igual al número de piezas que va a enviar; en este caso, como envía una única pieza procesa una sola pieza, si tuviera que enviar cinco piezas procesaría las cinco piezas a la vez. En las **reglas de entrada** se ha configurado lo siguiente (Figura 3.12):

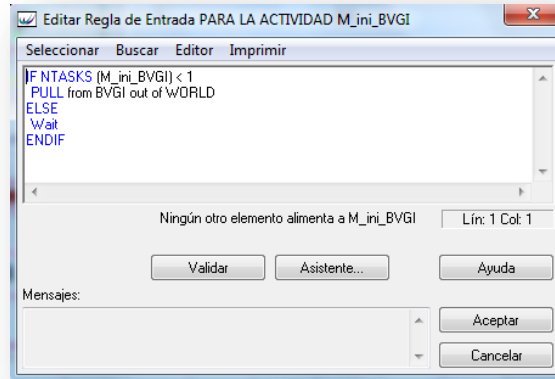


Figura 3.12 Reglas de entrada de la máquina M_ini_BVGI

De forma que, dado que sólo se quiere que funcione al inicio de la simulación, se ha limitado su número de operaciones a través de la función *NTASKS* (*nombre_máquina*) a una. De esta forma únicamente rellena los stocks avanzados indicados al comienzo de la simulación. A continuación se detalla la **regla de salida** que gobierna la máquina M_ini_BVGI (**Figura 3.13**) que envía el producto al stock avanzado de la máquina correspondiente:

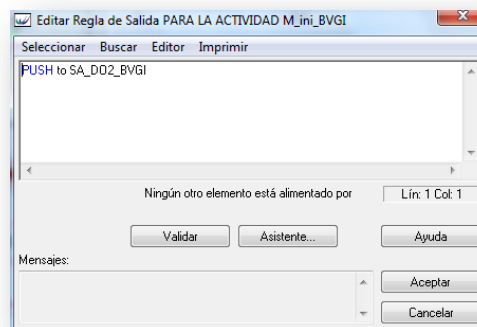


Figura 3.13 Regla de salida de la máquina M_ini_BVGI

3.2.2 Máquinas de procesamiento de productos

En este grupo se incluyen 17 máquinas, son las encargadas del procesamiento de los productos. Se agrupan en dos grandes grupos en función de si pertenecen a la categoría preparación o a la categoría confección/terminación. Las máquinas de preparación reciben materia prima y elaboran productos semiterminados. Las máquinas de confección/terminación cogen estos productos semiterminados y los transforman en productos terminados. Las máquinas pueden procesar uno, dos o tres productos distintos a la vez.

Para explicar la lógica que sigue una máquina en su funcionamiento se detalla el funcionamiento del elemento CG2, que procesa dos productos a la vez. Se ha representado de la siguiente manera (**Figura 3.14**):

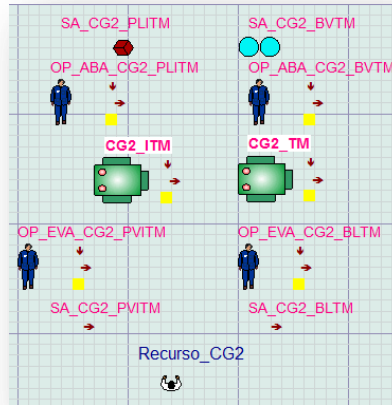


Figura 3.14 Representación gráfica de la máquina CG2

Dado que procesa dos productos distintos, cada uno con un tiempo de ciclo diferente, se ha dividido esta máquina en dos, enlazando su funcionamiento a través de una serie de reglas de entrada en los operarios (se detalla su funcionamiento en el apartado *Operarios*) y las averías mediante la utilización de los recursos (detallado en el apartado *Recursos*). Éste es el aspecto de la ventana de configuración de la máquina (Figura 3.15):

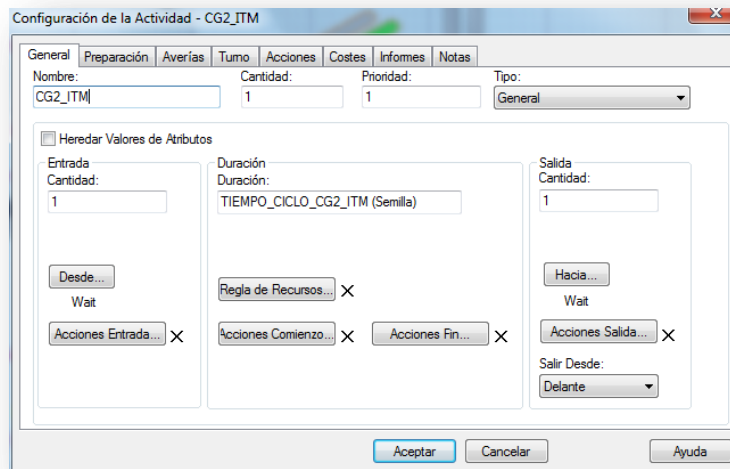


Figura 3.15 Ventana de configuración de la máquina CG2_ITM

En primer lugar, destacar que se trata de una máquina tipo *General* que procesa un único producto de entrada y de salida, eso se establece en el menú desplegable y en las opciones de *Cantidad*. El tiempo de ciclo de la máquina se introduce a través de la referencia a una distribución llamada *TIEMPO_CICLO_CG2_ITM*, además de la utilización de la *Semilla* que se utiliza como base para la generación de números pseudoaleatorios, que dará lugar a la variabilidad en el modelo. Cabe destacar que todas las distribuciones de los tiempos de ciclo de las máquinas son datos exportados de un archivo Excel, a fin de facilitar la experimentación con el modelo.

Se han establecido las máquinas como elementos pasivos dado que son los operarios de abastecimiento y los de evacuación los que insertan y retiran material respectivamente. Se detalla su funcionamiento en el apartado *Operarios*. Cabe destacar que las máquinas centrales, en este caso CG2_ITM, son las que llevan asociadas las averías y precisan de operarios cuando entran en breakdown; en cambio, las máquinas esclavas llevan asociados un recurso en su ciclo de funcionamiento normal y en acciones de recurso se establece lo siguiente (**Figura 3.16**):

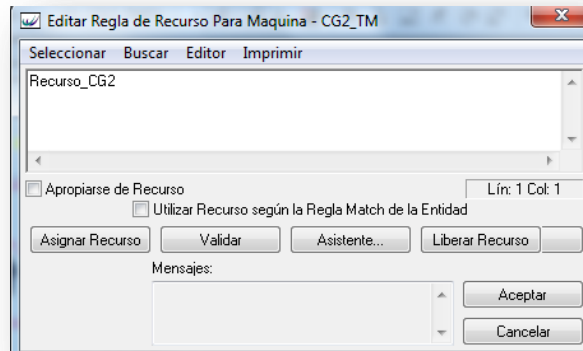


Figura 3.16 Regla de recursos para la máquina esclava CG2_TM

Las máquinas de confección/terminación tienen un funcionamiento similar; la diferencia radica en que procesan tres tipos de productos, cada uno de ellos con un tiempo de ciclo diferente. Se ha hecho de nuevo una aproximación separando estas máquinas en tres, una por producto, y enlazando su funcionamiento entre ellas. Se han representado de la siguiente manera (**Figura 3.17**):

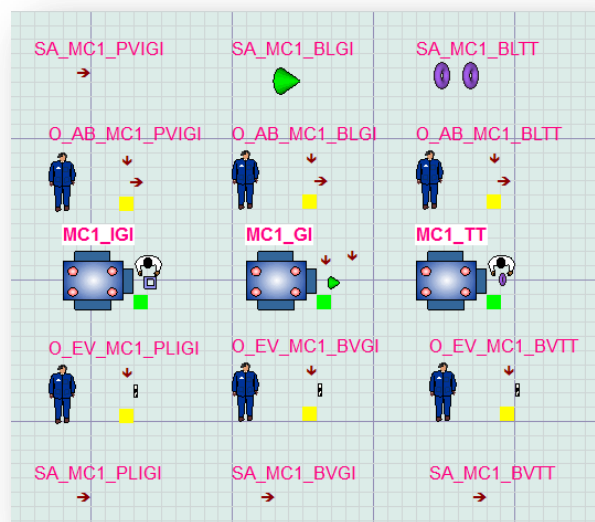


Figura 3.17 Representación gráfica de la máquina MC1

Una vez insertado el producto en la máquina se procede a su procesamiento. La ventana de configuración de la máquina es la que sigue (**Figura 3.18**):

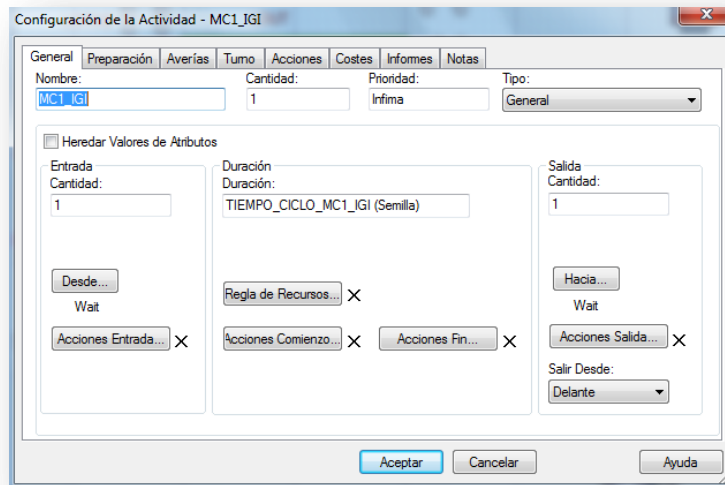


Figura 3.18 Ventana de configuración de la máquina MC1

La máquina procesa un único producto en cada uno de sus ciclos, donde el tiempo de ciclo se introduce a través de la referencia a una distribución junto con la *Semilla* que se utiliza como generador de números pseudoaleatorios. La máquina está configurada como un elemento pasivo, es decir, la entrada y salida de material se realiza a través de los operarios.

Las paradas por averías las lleva asociada la máquina central; en este ejemplo, la máquina MC1_IG1 y las otras dos máquinas, denominadas esclavas, dependen de la central. El enlazamiento con las otras dos máquinas se realiza a través de los recursos. Las máquinas esclavas necesitan un recurso cada una para trabajar; en cambio, la máquina central precisa de los dos recursos cuando se avería.

De esta forma, cuando la máquina central no está averiada las tres máquinas funcionan en ciclo normal. En el momento de avería, y dado que la máquina central tiene capacidad para apropiarse de los recursos, los dos recursos de las máquinas esclavas van a la central donde permanecen mientras dura la avería. Esto implica que en el momento de avería las dos máquinas esclavas al perder sus recursos dejan de funcionar. De forma que las tres máquinas se averían a la vez y durante el mismo porcentaje de tiempo.

La configuración de la máquina esclava es la que se aprecia en la **Figura 3.19**; de esta forma, se ha configurado en la regla de recursos de la máquina la necesidad de utilizar un recurso para su funcionamiento:

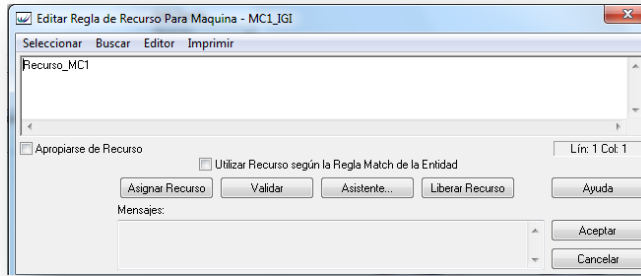


Figura 3.19 Regla de recurso para la máquina MC1_IGI

La configuración cambia en la máquina central donde se ha establecido lo siguiente (Figura 3.20):

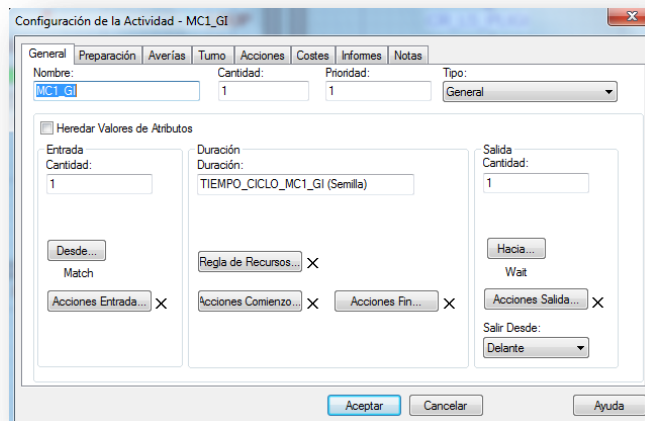


Figura 3.20 Ventana de configuración de la máquina MC1_GI

Se ha otorgado a la máquina una prioridad máxima (Prioridad=1), de forma que tiene prioridad en la utilización de los recursos frente a las máquinas esclavas. Por otra parte, en la configuración de la regla de recursos de averías de la máquina central se ha configurado lo siguiente (Figura 3.21):

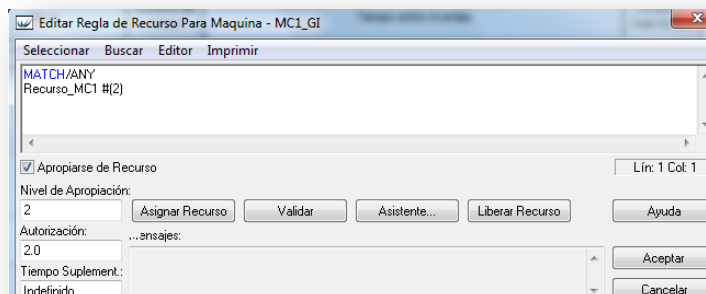


Figura 3.21 Regla de recurso para la máquina MC1_GI

De esta forma, se establece la necesidad de utilización de dos recursos cuando se produce la avería de la máquina central. Además, con la configuración de apropiación del recurso, con un nivel de apropiación dos y con una autorización de dos se asegura que en el momento de la avería los recursos dejen de trabajar en las máquinas centrales, aunque no hayan acabado su tarea, y se utilicen en la máquina central. Esta misma configuración se utiliza para los dos tipos de avería que presentan las máquinas de confección/terminación. Se presentan a continuación (Figura 3.22 y Figura 3.23):

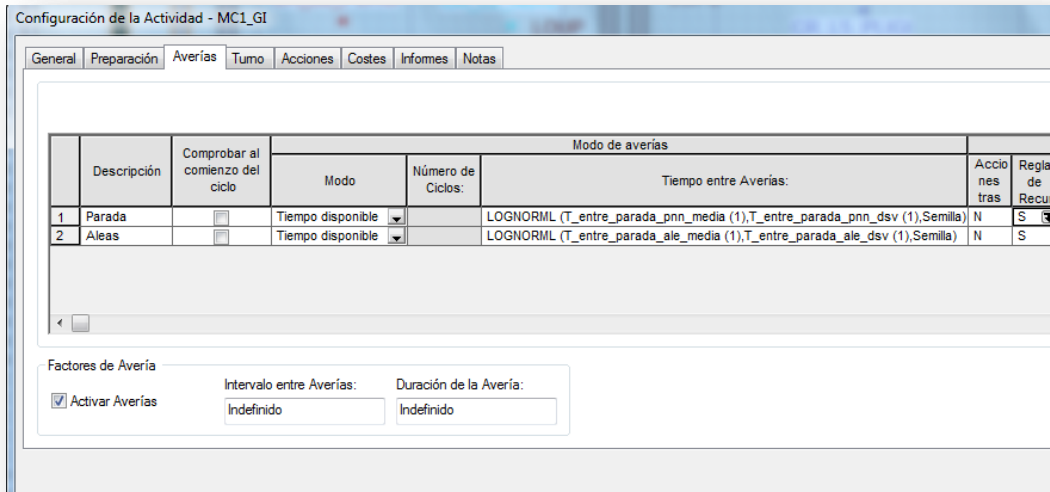


Figura 3.22 Configuración de averías I de la máquina MC1_GI

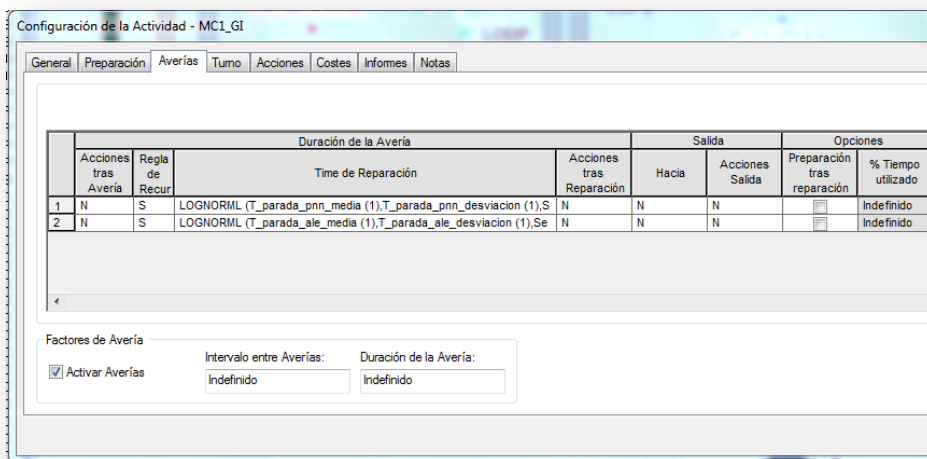


Figura 3.23 Configuración de averías II de la máquina MC1_GI

Se han establecido dos tipos de avería: las paradas y las aleas. El modo de funcionamiento es *Tiempo disponible*, de forma que la máquina puede averiarse esté o no ocupada trabajando. El tiempo

de reparación y el tiempo de averías se generan a través de una distribución *LOGNORMAL* que utiliza como media y desviación datos extraídos de un Excel. Además, se introduce una semilla que sirve como base en la generación de números aleatorios y que dota de variabilidad al modelo.

3.2.3 Máquina de cambio de batería

Esta máquina se encarga de gestionar el cambio de batería de los vehículos: para ello coge, rellena y envía los pedidos al buffer PEDIDOS_CAMBIO_BATERIA. Se ha definido una variable denominada N_dscrg que contabiliza el número de descargas de cada vehículo, puesto que cada descarga se considera un movimiento completo dado que conlleva un desplazamiento hasta la zona de carga, una carga de material, un desplazamiento hasta la zona de dejada y una descarga de producto.

En el sistema real los vehículos cambian la batería cuando llevan una media de 80 movimientos. El cambio de batería real no se rige por el tiempo que lleva el AGV funcionando puesto que si se encuentra aparcado el consumo de batería es mucho menor. En este caso se ha realizado una simplificación, independientemente del tiempo que esté parado en el parking o de lo largos que sean los movimientos, se realiza el cambio de la batería cada 80 movimientos.

Se ha gestionado el cambio de batería como un pedido más donde al vehículo se le asigna un destino de carga y uno de descarga, simulando la acción de coger una batería nueva y dejar la batería vieja. En el momento en que la máquina de cambio de batería contabiliza que se ha llegado a esa media de movimientos coge un pedido (“*carta*”), lo rellena con los atributos del producto (en este caso *swp_bat*, *agv*, *track* de carga y *track* de descarga), indicando que se trata de un pedido de cambio de batería, qué carro debe ir a cambiar la batería y dónde realizar este cambio. Este pedido se envía a un buffer denominado PEDIDOS_PARKING, donde la centralita le dará prioridad frente a los pedidos normales. La centralita gestiona este pedido y envía al carro.

En el sistema real se envía una petición a un operario encargado del mantenimiento que recibe una notificación y acude al lugar de cambio de batería para realizar dicho cambio. En el modelo no se ha simulado esto, simplemente se establece un tiempo medio de espera en el track de cambio de batería a través de una distribución lognormal. La máquina cambio de batería se ha representado a través del siguiente icono (Figura 3.24):

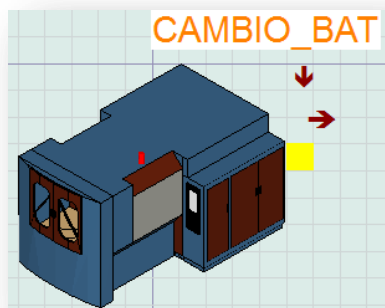


Figura 3.24 Representación gráfica de la máquina de cambio de batería

Se trata de una máquina de procesamiento de productos tipo *simple* dado que tiene una pieza de entrada y una de salida (el pedido) y, además, se ha configurado de forma que tenga un tiempo de ciclo cero. Se muestra a continuación su ventana de configuración (Figura 3.25):

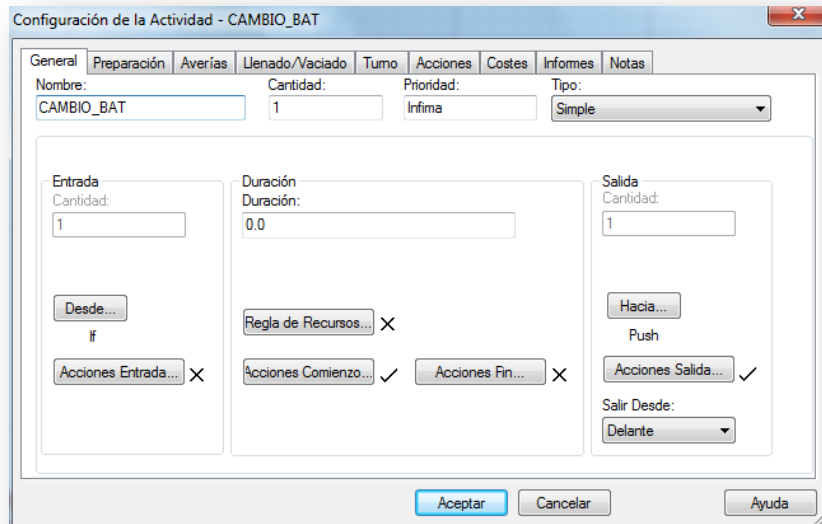


Figura 3.25 Ventana de configuración de la máquina de cambio de batería

En reglas de entrada se ha configurado lo siguiente (Figura 3.26):

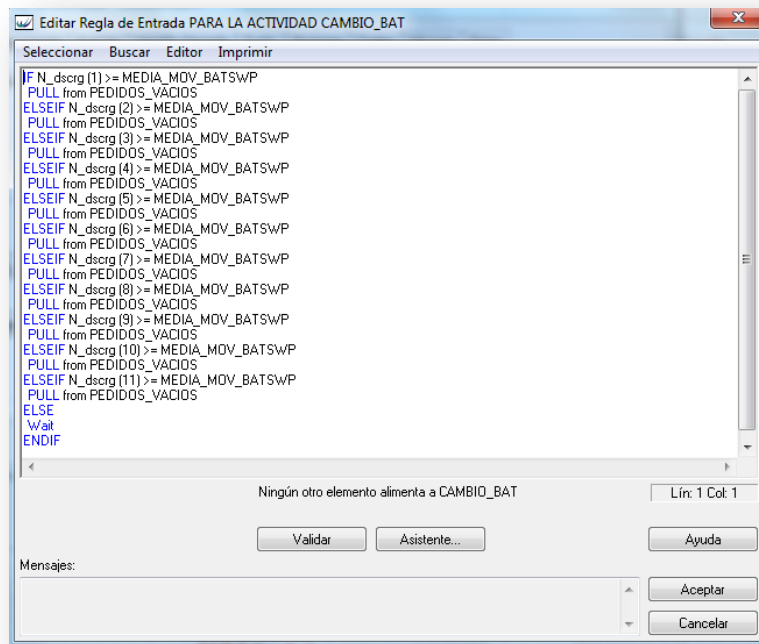


Figura 3.26 Regla de entrada de la máquina de cambio de batería

De forma que se evalúa el valor de la variable $N_dscrg()$ que almacena el número de descargas de cada vehículo para comprobar si se ha llegado al valor indicado por la variable

MEDIA_MOV_BATSWP, que registra la media de movimientos con la que debe enviarse al cambio de batería y que importa su valor desde un archivo Excel. Una vez alcanzado el valor indicado por esta variable se procede a coger un pedido vacío a través del comando *PULL from nombre_buffer*. Una vez hecho esto se procede al relleno del pedido. En acciones de comienzo se ha establecido lo siguiente (Figura 3.27):

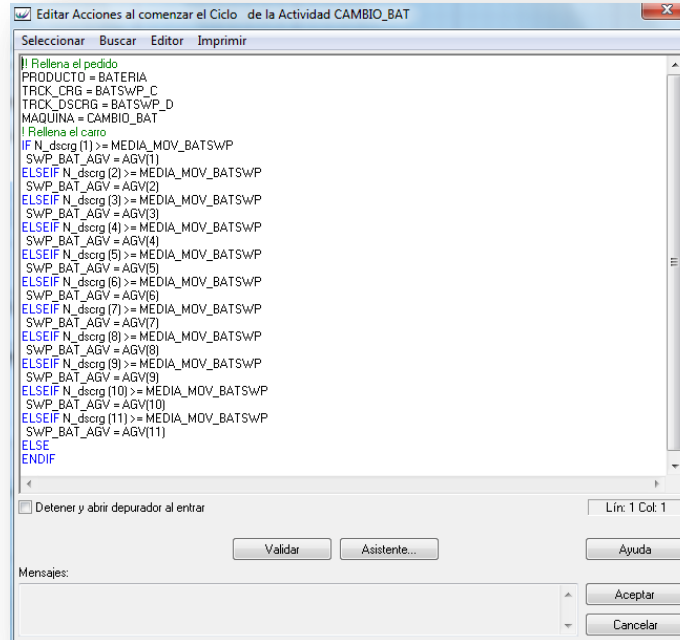


Figura 3.27 Acciones de comienzo de la máquina de cambio de batería

En primer lugar, se rellenan los atributos asociados al pedido con los valores correspondientes, tales como tipo de producto (*BATERÍA*), track de carga (*BATSWP_C*), track de descarga (*BATSWP_D*) y máquina que realiza la petición (*CAMIO_BAT*). En segundo lugar se almacena en la variable *SWP_BAT_AGV* el nombre del vehículo que precisa del cambio de batería.

Una vez hecho esto se procede al envío del pedido al buffer correspondiente a la espera de que lo gestione la centralita. Para ello se ha configurado la siguiente **regla de salida** (Figura 3.28):

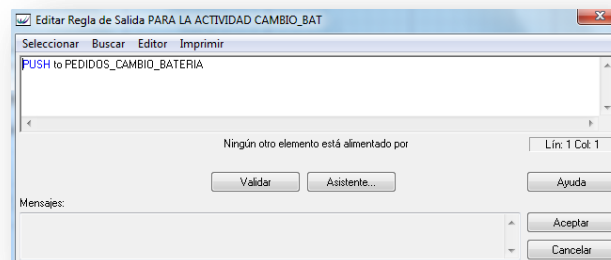


Figura 3.28 Regla de salida de la máquina de cambio de batería

Por último, en **acciones de salida** se ha configurado lo siguiente (**Figura 3.29**):

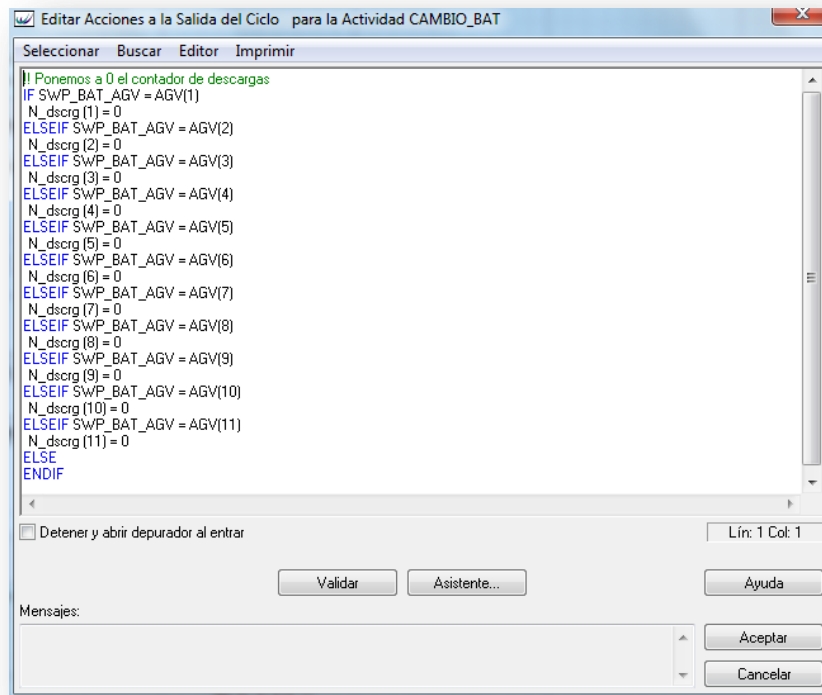


Figura 3.29 Acciones de salida de la máquina de cambio de batería

De esta forma se ha configurado que, una vez que se ha gestionado el pedido de cambio de batería del vehículo correspondiente, se actualice el valor de la variable que registra su número de movimientos a cero. El tiempo de cambio de batería se ha configurado como un tiempo de parada antes de abandonar el track donde se realiza la descarga de la siguiente manera (**Figura 3.30**):

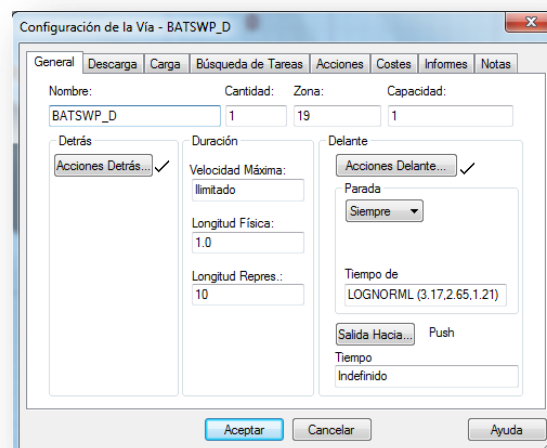


Figura 3.30 Ventana de configuración de la vía BATSWP_D

De esta forma, el vehículo debe permanecer en el track un tiempo establecido en función de una distribución lognormal. Dicha distribución se ha obtenido a través del programa Stat-Fit que a partir de unos datos dados los asemeja a una distribución conocida. Su funcionamiento viene detallado en el apartado *Stat-Fit*.

3.2.4 Centralita

Es una máquina un tanto diferente respecto a las demás, ya que, esta máquina no procesa productos: simplemente coge los pedidos que le llegan, los lee y en función de eso realiza unas acciones u otras. Es la central encargada de la gestión de los pedidos.

En el momento en que detecta que hay algún carro libre para realizar pedidos coge uno de los dos almacenes que existen donde se acumulan todos los pedidos que aún están sin procesar. Los dos almacenes previos a la centralita que existen son *PEDIDOS_PENDIENTES* y *PEDIDOS_CAMBIO_BATERIA*: en el primero se almacenan los pedidos enviados por las diferentes máquinas, mientras que en el segundo se almacenan las peticiones de cambio de batería.

En caso de haber algún pedido de cambio de batería envía al carro correspondiente a cargar; en caso de no haber pedidos de cambio de batería coge el primer pedido de la lista de los pedidos pendientes. La orden de envío se realiza a través de la función *CALL/VSEARCH*. A través del comando *CALL (nombre_vehículo, track_carga, track_descarga)* se asigna a un vehículo determinado el track donde debe dirigirse a realizar la carga material para posteriormente depositarlo en el track de descarga. Con el comando *VSEARCH (track1, track2, track3)* se indica en qué track debe buscarse el vehículo.

Una vez realizada la llamada deposita el pedido en un almacén denominado *PEDIDOS_ATENDIDOS* donde se encuentran todos los pedidos ya ejecutados. La centralita se ha representado de la siguiente manera (**Figura 3.31**):

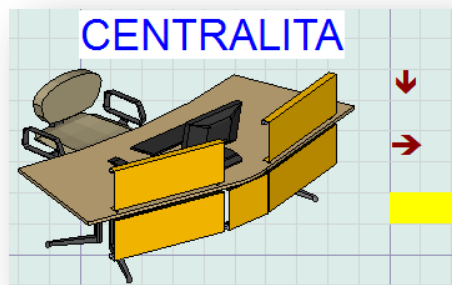


Figura 3.31 Representación gráfica de la máquina centralita

En la ventana de configuración pueden observarse las características principales de esta máquina (**Figura 3.32**):

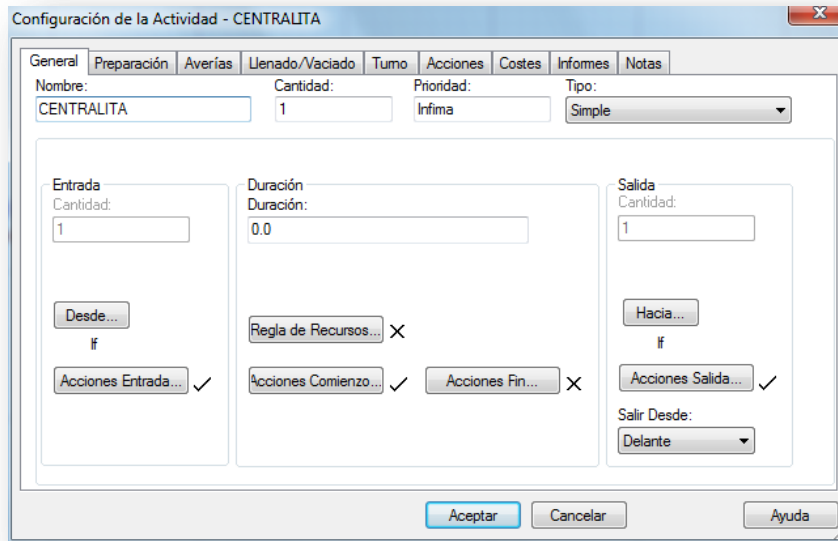


Figura 3.32 Ventana de configuración de la máquina centralita

Se trata de una máquina activa simple, es decir, coge una pieza, la procesa y la envía. Las piezas que recibe son los pedidos y el procesamiento que hace son las llamadas a los carros asignándoles su destino. Se ha establecido un tiempo de ciclo igual a 0,0 dado que la asignación de los pedidos a los vehículos se realiza de forma instantánea. En **regla de entrada** encontramos la siguiente sintaxis (Figura 3.33):

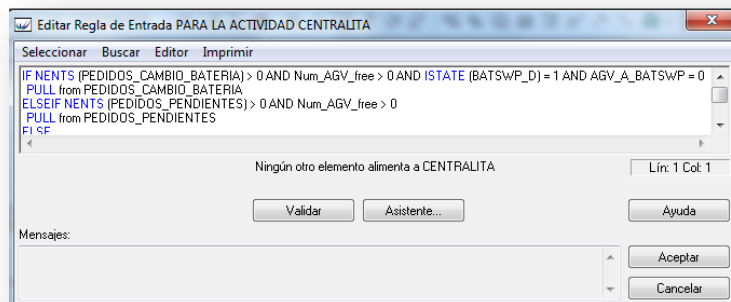


Figura 3.33 Regla de entrada de la máquina centralita

A través de la sintaxis anterior se da prioridad a los pedidos de cambio de batería. Si contamos con carros libres, con algún pedido de cambio de batería en el buffer *PEDIDOS_CAMBIO_BATERIA*, y no hay ningún carro cambiando la batería en ese momento (*ISTATE(BATSWP_D)=1*) y además no hay ningún carro que se disponga a cambiar la batería (*AGV_A_BATSWP=0*) se coge un pedido de cambio de batería.

En caso de no ser así, pero contar con carros libres y con algún pedido de evacuación o de aprovisionamiento en el buffer *PEDIDOS_PENDIENTES* se coge dicho pedido. En caso de no existir pedidos la centralita espera hasta que haya. En **acciones de entrada** encontramos lo siguiente (Figura 3.34):

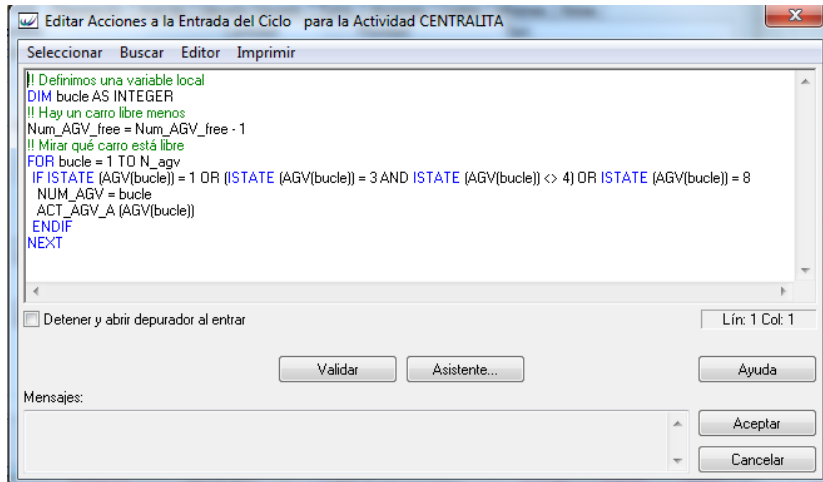


Figura 3.34 Acciones de entrada de la máquina centralita

En primer lugar, al haberse cogido un pedido del buffer de pendientes significa que se va a proceder a la llamada de un carro, por lo que la variable *Num_AGV_free*, que contabiliza el número de vehículos libres, debe decrecer en una unidad.

En segundo lugar, a través de la observación de los estados del carro miramos qué carro se encuentra disponible con la función *ISTATE*. Si *ISTATE* del vehículo es igual a 1 (el carro se encuentra ocioso, sin trabajo), si es igual a 3 e igual a 4 (el carro está bloqueado y sin carga) o si es igual a 8 (el carro está aparcado), el carro está libre de trabajo y podemos asignarle un pedido. Esta comprobación se realiza con todos los carros de la simulación y se asigna a la variable *NUM_AGV* el número del carro que está libre.

A continuación se hace la llamada a la función *ACT_AGV_A(nombre_vehículo)* enviándose como parámetro el nombre del vehículo. Esta función actualiza los valores de las variables de información de los vehículos de forma que se muestra por pantalla la ubicación, el material que transporta, el track de carga o el track de descarga. La función viene detallada en el capítulo *Funciones* y las variables de información se explican con detenimiento en el apartado *Variables*.

Una vez hecho esto comienza el ciclo de la máquina y en **acciones de comienzo** se ha establecido lo que sigue:

```
LLAMADA_CENTRALITA (NUM_AGV,TRCK_CRG,TRCK_DSCRG)
```

De forma que se hace una llamada a la función *LLAMADA_CENTRALITA* enviando los parámetros *NUM_AGV*, *TRCK_CRG* y *TRCK_DSCRG*; es decir, a qué carro se le asigna el pedido y el track de carga y de descarga que vienen asociados al pedido que ha cogido la centralita a través de los atributos. El funcionamiento de *LLAMADA_CENTRALITA()* se detalla en el capítulo *Funciones*. Una vez ejecutado el ciclo se procede a la salida del pedido de la centralita, en la **regla de salida** aparece (Figura 3.35):

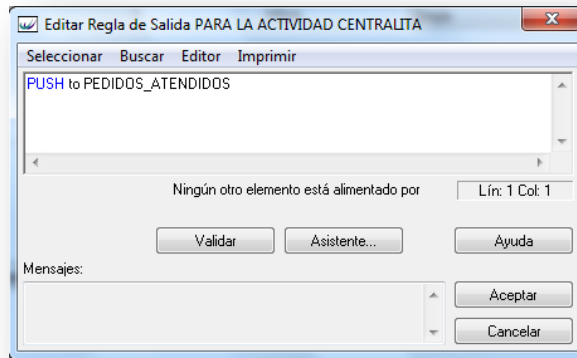


Figura 3.35 Regla de salida de la máquina centralita

Es decir, una vez asignado el pedido a un vehículo es enviado a un buffer llamado *PEDIDOS_ATENDIDOS*. Por último, en **acciones de salida** se ha programado lo que se explica a continuación:

```

IF PRODUCTO <> BATERIA
PRINT "\n"
PRINT "CENTRALITA ENVIANDO PEDIDO A AGV"
PRINT "MAQUINA:",MAQUINA
PRINT "CARRO:","\t",NUM_AGV
PRINT "PRODUCTO:",PRODUCTO
PRINT "TRACK CARGA:",TRCK_CRG
PRINT "TRACK DESCARGA:",TRCK_DSCRG
ELSEIF PRODUCTO = BATERIA
PRINT "\n"
PRINT "CENTRALITA ENVIANDO AGV A CAMBIAR BATERIA"
PRINT "MAQUINA:",MAQUINA
PRINT "CARRO:",SWP_BAT_AGV
PRINT "PRODUCTO:",PRODUCTO
PRINT "TRACK CARGA:",TRCK_CRG
PRINT "TRACK DESCARGA:",TRCK_DSCRG
ENDIF
    
```

De forma que en caso de tratarse de un pedido normal por parte de una máquina se muestra en la ventana de interacción un mensaje con el siguiente aspecto (Figura 3.36):

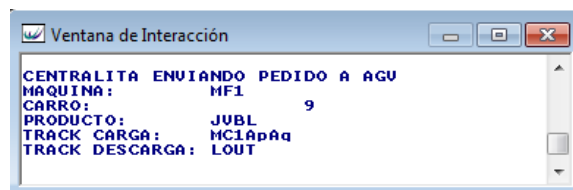


Figura 3.36 Mensaje de asignación de un pedido en la ventana de interacción

En caso de tratarse de un pedido de cambio de batería se muestra lo siguiente (Figura 3.37):

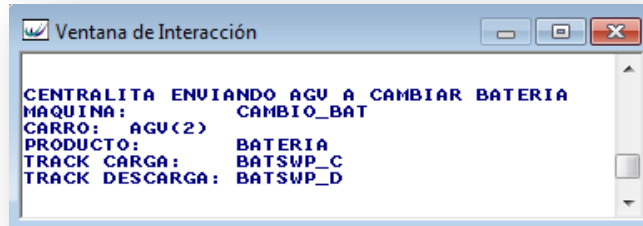


Figura 3.37 Mensaje de asignación de cambio de batería en la ventana de interacción

A través de este código se muestra en la ventana de interacción la información correspondiente de forma que aparece información distinta si se trata de un pedido normal o de un pedido de cambio de batería. Si es un pedido normal aparece el mensaje “CENTRALITA ENVIANDO PEDIDO A AGV” seguido de la máquina que ha realizado la petición, del número de carro que se encarga del pedido, el producto que transporta, el track de carga y el track de descarga.

Si se trata de un pedido de cambio de batería aparece el siguiente mensaje: “CENTRALITA ENVIANDO AGV A CAMBIAR BATERÍA” seguido de la máquina que solicita el pedido (en este caso la máquina es *CAMBIO_BAT*), el carro que se dirige al cambio de batería, el producto (en este caso *BATERÍA*), el track de carga y el track de descarga, que serán los tracks donde se realiza el cambio de batería denominados *BATSWP_C* para el track de carga y *BATSWP_D* para el de descarga.

3.2.5 Operarios

Es un tipo de máquina que no procesa productos. Realiza dos acciones diferentes para cada uno de los tipos de pedido, ya sean de evacuación o de abastecimiento.

Pedidos de abastecimiento. El operario realiza dos acciones: por un lado, coge producto de los almacenes a pie de máquina y los deposita en la máquina que procesa productos y, por otro lado, coge pedidos “vacíos” y rellena los atributos con la información correspondiente, es decir, qué producto necesita, a qué almacén ir a buscar ese producto y en qué almacén a pie de máquina debe dejarlo. Una vez hecho esto, envía el pedido al almacén de *pedidos_pendientes* a la espera de ser gestionados de la centralita y abastece de producto a la máquina.

Pedidos de evacuación. Una vez la máquina ha procesado el producto el operario lo retira de la máquina y coge un pedido vacío, lo rellena con la información necesaria, como en el caso del pedido de abastecimiento, y envía el pedido al almacén de pedidos pendientes y el producto al stock a pie de máquina donde será retirado por los vehículos.

Para cada producto que procesa una máquina se ha asignado un operario. Es importante destacar que el pedido de abastecimiento debe realizarse en el momento que entra producto a la máquina y el de evacuación en el momento que sale producto de la máquina. Se representa la máquina operario de la siguiente manera (Figura 3.38):

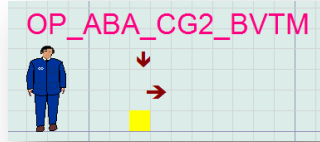


Figura 3.38 Representación gráfica del operario de abastecimiento de la máquina CG2

A continuación se van a detallar las reglas lógicas que gobiernan el funcionamiento de un operario; en concreto el operario de la máquina CG2 que abastece a la máquina del producto BVTM. La ventana de configuración del operario OP_ABA_CG2_BVTM es la que sigue (Figura 3.39):

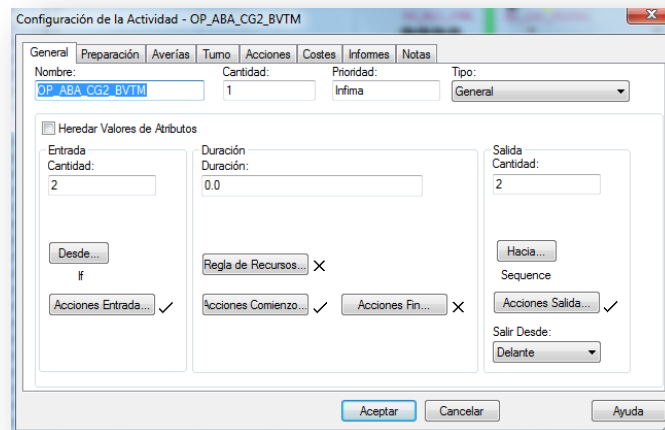


Figura 3.39 Ventana de configuración del operario OP_ABA_CG2_BVTM

Se trata de una máquina tipo *General* dado que tiene dos productos de entrada y dos productos de salida, el producto con el que abastece la máquina y el pedido que coge para rellenar y enviar la petición. El ciclo de duración se ha establecido como 0,0 porque en el sistema real este funcionamiento es automático. Las **reglas de entrada** que rigen al operario son las siguientes (Figura 3.40):

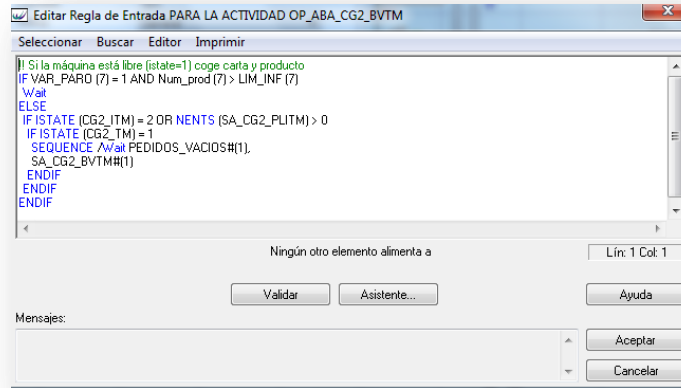


Figura 3.40 Regla de entrada del operario OP_ABA_CG2_BVTM

En primer lugar, se comprueba el valor de la variable $VAR_PARO()$ para ese producto y el nivel de stock actual a través de $Num_prod() > LIM_INF()$. Es decir, si se cumple que la variable $VAR_PARO()=1$ y que $Num_prod() > LIM_INF()$ no se produce aporte de material a la máquina por parte del operario. El funcionamiento de estas variables se explica en el apartado *Variables*.

En segundo lugar, se comprueba el estado de la otra máquina que forma parte del conjunto, para saber si está procesando material ($ISTATE=2$) o tiene material en el stock para poder trabajar ($NENTS(SA_CG2_PLITM) > 0$). En caso afirmativo se procede a comprobar la última condición: con el comando *ISTATE* se detecta si la máquina está libre para aceptar más material o no; en caso de estar libre ($ISTATE=1$) se puede proceder al aprovisionamiento de material.

Con el comando *SEQUENCE* se controla que el operario coja un pedido vacío y el producto que la máquina precisa del stock avanzado. En caso de que no pueda coger alguna de las dos cosas esperará y si la máquina no se encuentra disponible para recibir material, ya sea porque está procesando producto o por avería, esperará a retirar producto del stock avanzado. En acciones a la entrada para el operario se ha establecido lo siguiente (Figura 3.41):

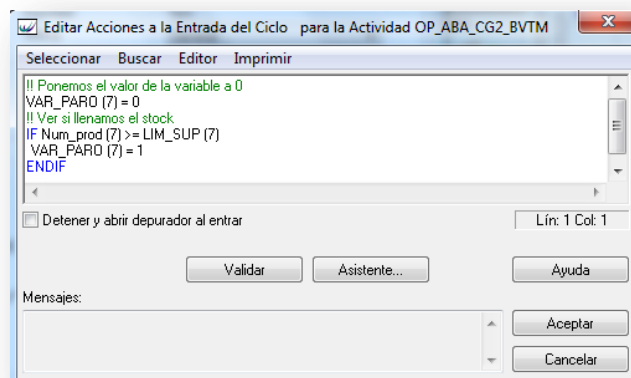


Figura 3.41 Acciones a la entrada del operario OP_ABA_CG2_BVTM

De esta forma se actualiza la variable VAR_PARO() como corresponda en función de los niveles de stock. Se explica más detalladamente en el apartado *Variables*. En **acciones de comienzo** para este operario se ha establecido la siguiente sintaxis (Figura 3.42):

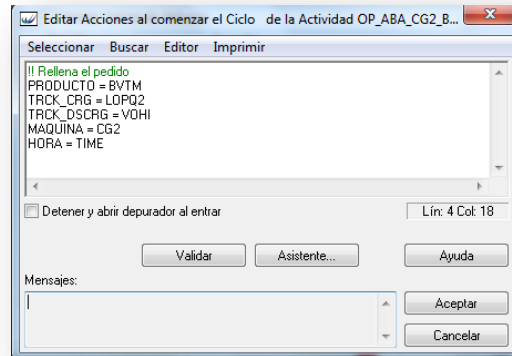


Figura 3.42 Acciones de comienzo del operario OP_ABA_CG2_BVTM

De esta forma se rellena el pedido y se le asigna el valor correspondiente a los atributos asociados al pedido. Se establece que la máquina CG2 precisa de producto BVTM, que debe ir a buscarlo al track de carga LOPQ2 y depositarlo en el track de descarga VOHI. Así mismo, se almacena en el atributo HORA la hora en que se ha realizado el pedido. Algunos productos, como por ejemplo JVBL, JLBL, BVTT y BLTT, cuentan con varias zonas donde se almacenan, de forma que se coge producto del almacén que más material contenga. Se expone a continuación un ejemplo (Figura 3.43):

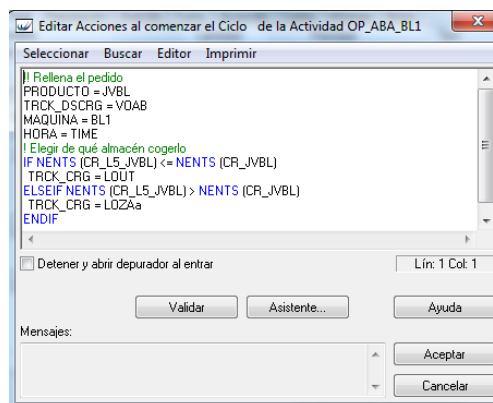


Figura 3.43 Acciones de comienzo del operario OP_ABA_BL1

De esta forma se establece que el almacén del producto JLBL es aquel con más número de productos JLBL a fin de mantener ambos almacenes equilibrados.

Volviendo al operario OP_ABA_CG2_BVTM, en **regla de salida** se ha establecido lo siguiente (Figura 3.44):

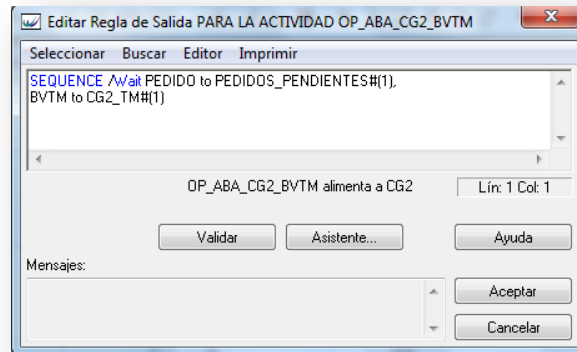


Figura 3.44 Regla de salida del operario OP_ABA_CG2_BVTM

Envía el pedido, la carta “rellenada” es enviada al almacén PEDIDOS_PENDIENTES donde espera a que la centralita lo gestione, y se envía el producto a la máquina para que se procese. En **acciones de salida** se ha establecido lo que se muestra a continuación (Figura 3.45):

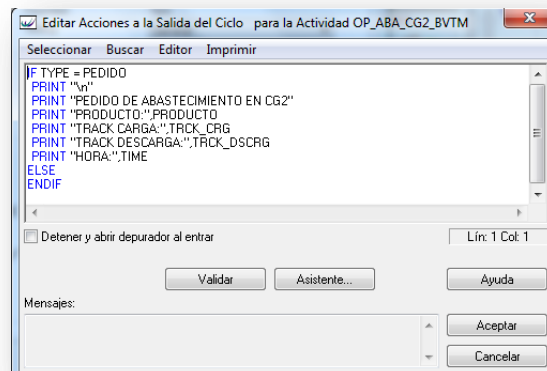


Figura 3.45 Acciones a la salida del operario OP_ABA_CG2_BVTM

Con la siguiente sintaxis se establece que, una vez que se produce el envío del pedido hacia el almacén de pedidos pendientes, se imprima en la ventana de interacción que se ha producido un pedido de abastecimiento en la máquina CG2, el producto que se necesita, dónde cogerlo, dónde dejarlo y la hora en que se ha producido este pedido. En la ventana de interacción aparece un mensaje con la siguiente forma (Figura 3.46):

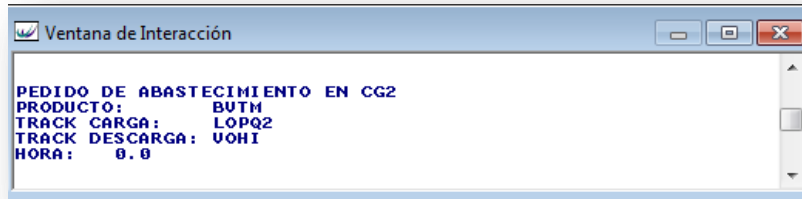


Figura 3.46 Mensaje de pedido de aprovisionamiento en la ventana de interacción

Una vez que se envía el pedido, la máquina coge el producto y lo procesa. Una vez acabado el proceso, son los operarios de evacuación los que realizan la retirada de material de la máquina. Se detalla a continuación la configuración del operario de evacuación de producto BLTM de la máquina CG2 que lleva por nombre *OP_EVA_CG2_BLTM*; la ventana de configuración del elemento es la que sigue (Figura 3.47):

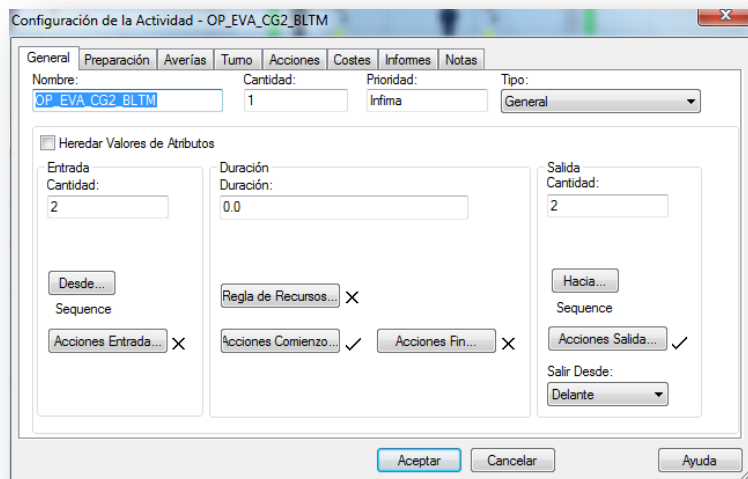


Figura 3.47 Ventana de configuración del operario OP_EVA_CG2_BLTM

Como los demás elementos operarios, procesa dos productos a la vez: los pedidos que rellena y los productos que transporta. En reglas de entrada del operario se establece la siguiente sintaxis:

```
SEQUENCE /Wait PEDIDOS_VACIOS#(1),
CG2_TM#(1)
```

De forma secuencial se procede a coger un pedido del almacén de pedidos vacíos y producto desde la máquina. En acciones de comienzo se ha establecido lo siguiente (Figura 3.48):

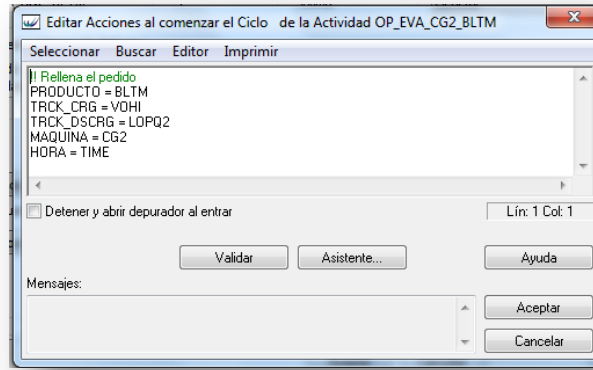


Figura 3.48 Acciones de comienzo del operario de evacuación OP_EVA_CG2_BLTM

De forma que se rellena el pedido con la información correspondiente. En el caso del producto JLBL se cuenta con más de un almacén, de manera que se envía el material al almacén que menor número de productos contenga. Se expone a continuación un ejemplo (Figura 3.49):

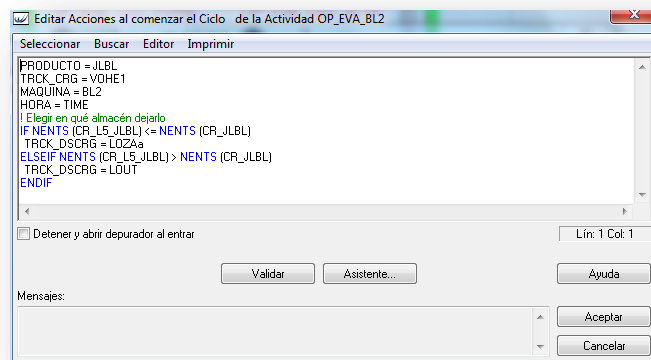


Figura 3.49 Acciones de comienzo del operario OP_EVA_BL2

En las **reglas de salida** se ha establecido:

SEQUENCE /Wait PEDIDOS_PENDIENTES#(1),
SA_CG2_BLTM#(1)

de forma que se produce el envío de forma secuencial del pedido relleno al almacén de pedidos pendientes y del producto al almacén a pie de máquina que corresponde. En **acciones de salida** se ha definido la siguiente sintaxis:

```

IF TYPE = PEDIDO
PRINT "\n"
PRINT "PEDIDO DE EVACUACIÓN EN CG2"
PRINT "PRODUCTO:",PRODUCTO
PRINT "TRACK CARGA:",TRCK_CRG
PRINT "TRACK DESCARGA:",TRCK_DSCRG
PRINT "HORA:",TIME
ELSE
ENDIF

```

de forma que se imprime por pantalla la información correspondiente, tal y como se muestra en la **Figura 3.50**:



Figura 3.50 Mensaje de pedido de evacuación en la ventana de interacción

3.2.6 Averías

Se ha insertado la máquina denominada *Averías* a fin de representar las paradas que tienen asociados los vehículos ya sea por fallo en el sistema, pérdida de la señal o algún otro tipo de fallo. La función de esta máquina es coger unas piezas denominadas paradas cada siete minutos, producir una parada de cuatro minutos del vehículo y devolver el vehículo a su estado normal. Se detalla a continuación su funcionamiento.

Esta máquina coge piezas desde *World* y las procesa. Durante el procesamiento se le asigna una avería al vehículo correspondiente. Una vez realizado el procesamiento de la pieza se procede a la reparación de la avería. Se presenta a continuación (**Figura 3.51**) la representación gráfica de esta máquina productora de avería y de la pieza *paradas*:



Figura 3.51 Representación gráfica de la máquina averías

En la **ventana de configuración** de la máquina (**Figura 3.52**) se muestra lo siguiente:

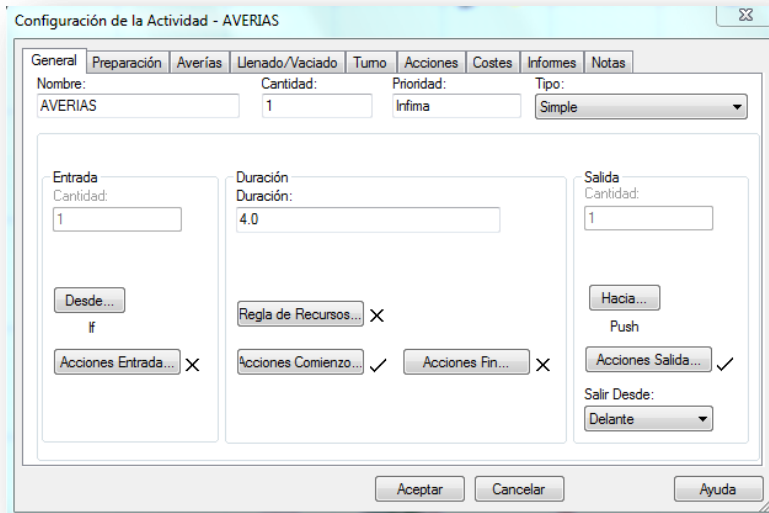


Figura 3.52 Ventana de configuración de la máquina averías

Se trata de una máquina tipo *simple* (un producto de entrada y un producto de salida) con un tiempo de ciclo fijo de cuatro minutos. Como **reglas de entrada** se ha configurado lo siguiente (Figura 3.53):

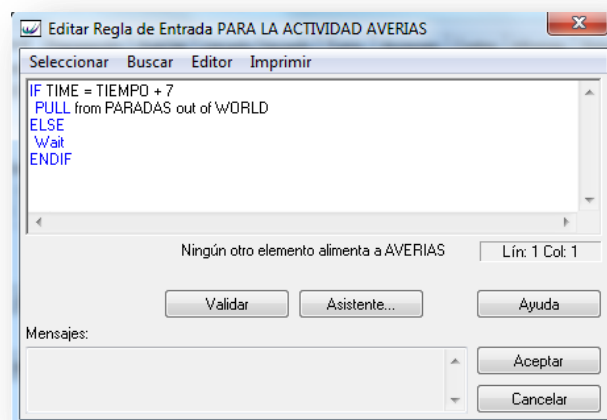


Figura 3.53 Regla de entrada de la máquina averías

De esta forma se garantiza la entrada de una pieza a la máquina cada siete minutos, dicha pieza es cogida desde *World*. En **acciones de comienzo** encontramos lo siguiente (Figura 3.54):

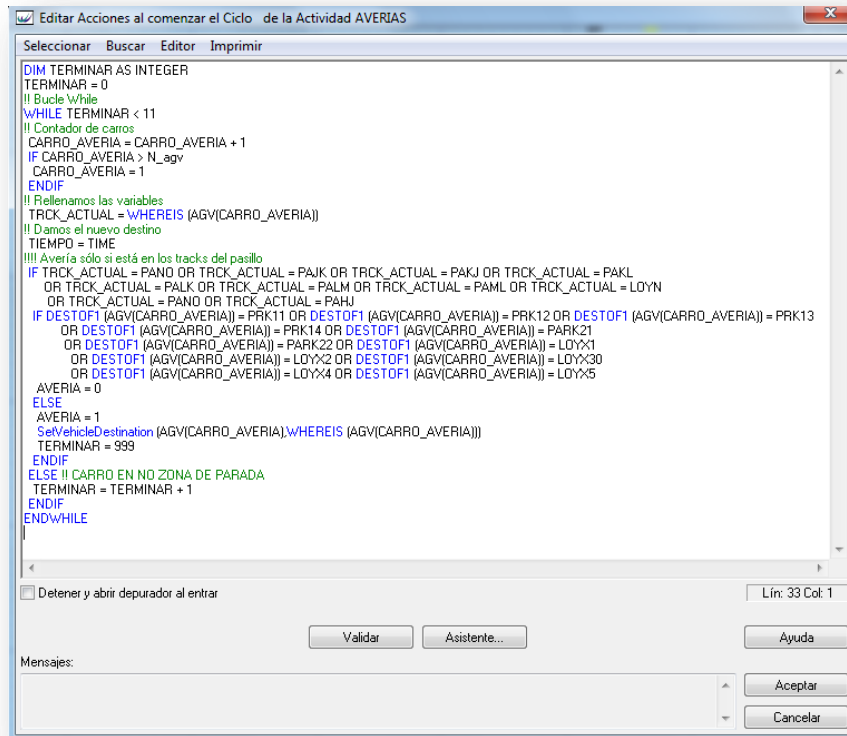


Figura 3.54 Acciones de comienzo de la máquina averías

En primer lugar, se define una variable local de tipo entero denominada *terminar*. A continuación, se entra en el bucle while en el que no se sale hasta que la variable *terminar* sea mayor que 11. Seguidamente, la variable *carro_averia*, que almacena el número del vehículo que debe averiarse, se incrementa en uno. Después, se almacena en la variable *trck_actual* el nombre del track en el que se encuentra el vehículo en el momento de la avería y se comprueba que se trata de uno de los tracks del pasillo y que, además, dicho carro no se dirige a un aparcamiento.

Si se cumplen estas condiciones la variable denominada *avería* pasa a valer 1, en caso contrario su valor será 0. Además de otorgar el valor 1 a la variable *avería* se cambia momentáneamente el destino inmediato al vehículo que está a punto de sufrir la avería a través del comando *setdestination* (*nombredelcarro, trackdedestino*) y se cambia el valor de la variable *terminar* a 999 a fin de salir del bucle while. Todos los tracks donde se pueden averiar los vehículos están configurados de forma que si su *destination* es el propio track donde se encuentran los vehículos deben esperar hasta que se cambie su destino inmediato. En **reglas de salida** y en **acciones de salida** se ha configurado lo que se muestra a continuación (Figura 3.55 y Figura 3.56):

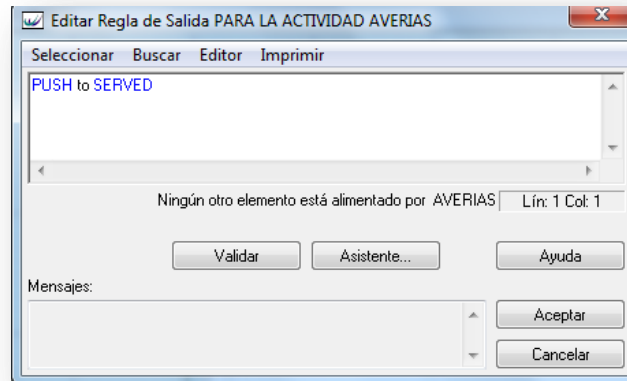


Figura 3.55 Regla de salida de la máquina averías

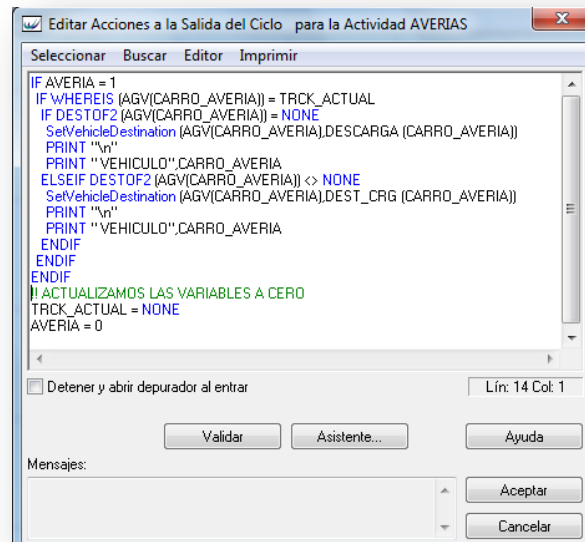


Figura 3.56 Acciones de salida de la máquina averías

De forma que una vez procesada la pieza se saca del sistema a través de las reglas del sistema. En las acciones de salida, en caso de haberse producido la avería, se le devuelve al vehículo averiado el destino que tenía previo a la avería y se imprime en la ventana de interacción un mensaje informando del vehículo que se ha averiado.

3.3 Almacenes

Se distinguen seis tipos de almacenes: los almacenes comunes donde se almacenan productos utilizados por todas las máquinas; los almacenes denominados almacén a pie de máquina o stock avanzado donde se acumula el material que se va a incorporar a la máquina; el almacén que acumula las piezas *batería* denominado *baterías_cambiadas*; el almacén de pedidos vacíos que acumula los pedidos sin rellenar; el almacén de pedidos pendientes; y el almacén de pedidos atendidos. Se detallan a continuación estos tipos de almacenes.

3.3.1 Almacenes comunes

El modelo cuenta con un total de 16 almacenes comunes, denominados CR_JLBL, CR_JVBL, CR_L2_NSTL, CR_L2_NSTV, CR_L2_PLITM, CR_L2_PVITM, CR_L4_GIL, CR_L4_GIV, CR_L4_NCL, CR_L4_NCV, CR_L5_JLBL, CR_L5_JVBL, CR_L5_PLIGI, CR_L5_PVIGI, CR_L6_NCL y CR_L6_NCV. Cada uno almacena un único tipo de producto. Los almacenes son, por definición, elementos pasivos y, por tanto, no cuentan con reglas de entrada ni de salida. La ventana de configuración del almacén CR_JVBL es la que sigue (**Figura 3.57**):

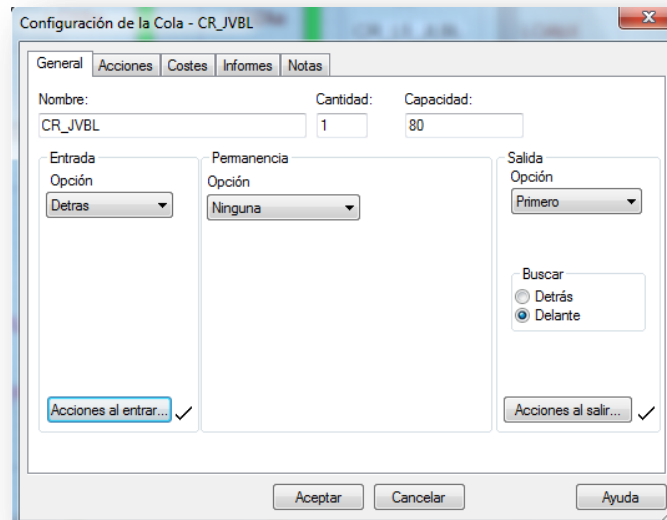


Figura 3.57 Ventana de configuración del almacén CR_JVBL

Se ha parametrizado este almacén con una capacidad de 80. En este caso no se ha configurado ninguna regla de entrada o salida dado que es un elemento pasivo. En **acciones de entrada** se ha establecido lo siguiente (**Figura 3.58**):

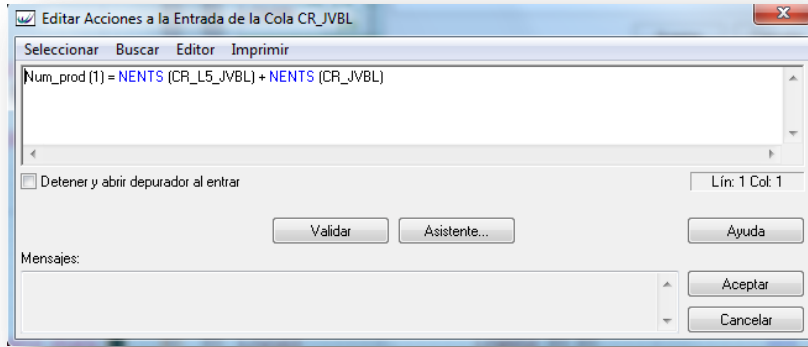


Figura 3.58 Acciones de entrada del almacén CR_JVBL

En las acciones de salida se ha configurado lo que se muestra a continuación (Figura 3.59):

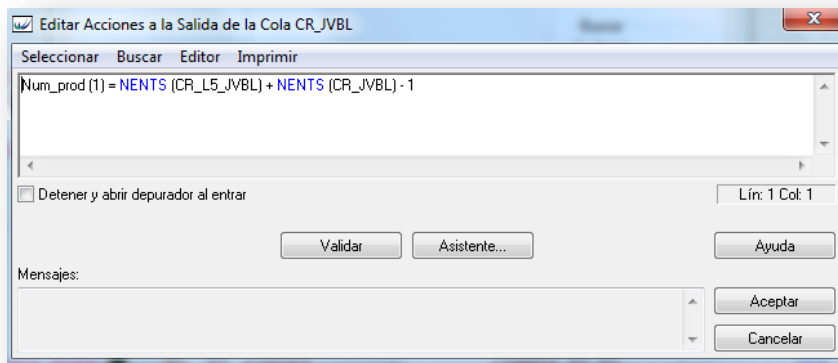


Figura 3.59 Acciones de salida del almacén CR_JVBL

Esta configuración en las acciones de entrada y de salida se utilizan a fin de actualizar la variable Num_Prod() con el número de productos de cada tipo. Su valor se actualiza cada vez que se produce la entrada o la salida de material del almacén.

3.3.2 Stocks avanzados

Los productos que cogen los operarios para la máquina proceden de los stocks avanzados, de la misma manera que es en los stocks avanzados donde los operarios dejan los productos ya procesados. Es el lugar donde los vehículos dejan los productos que cogen de los almacenes generales tras la petición de la centralita. El modelo cuenta con varios stocks avanzados, todos denominados con *SA_nombremáquina_nombreproducto*. A continuación se muestra un ejemplo (Figura 3.60), el stock avanzado del producto BLTM de la máquina CG1:

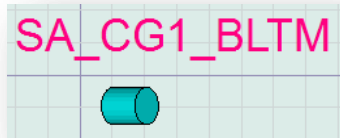


Figura 3.60 Representación gráfica del SA de la máquina CG1 del producto BLTM

En la siguiente imagen aparece la ventana de configuración de dicho almacén (Figura 3.61):

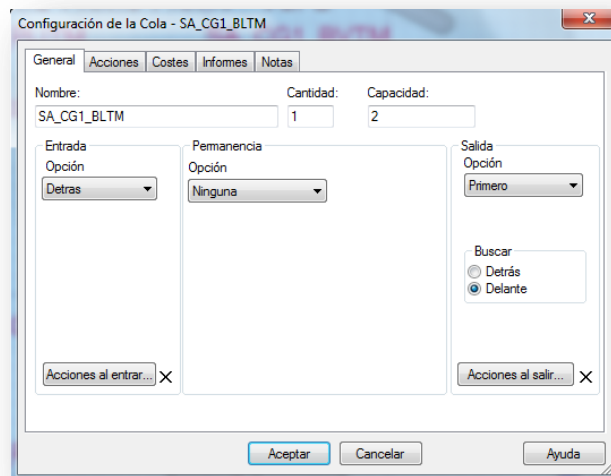


Figura 3.61 Ventana de configuración del buffer SA_CG1_BLTM

Los stock avanzados, al igual que todo almacén, son elementos pasivos y, por tanto, carecen de reglas de entrada y de salida. Se observa que este buffer tiene una capacidad de dos elementos y no hay ninguna regla de entrada ni de salida.

3.3.3 Almacén de baterías cambiadas

Dado que el cambio de batería se gestiona como un pedido normal, al lado de la zona de cambio de batería se ha representado un buffer donde se almacenan las baterías ya cambiadas. Sirve también para contabilizar el número de cambios de baterías que han tenido lugar. Como todo almacén, carece de reglas de entrada o de salida y no se han programado acciones de entrada ni de salida. Su representación gráfica se muestra a continuación (Figura 3.62):



Figura 3.62 Representación gráfica del almacén de aterías cambiadas

3.3.4 Almacén de pedidos vacíos

En el almacén *pedidos_vacios* se acumulan los productos *pedidos_vacios*, es decir, aquellos a los que aún no se ha asignado ningún valor a sus atributos. La ventana de configuración del almacén es la que aparece a continuación (Figura 3.63):

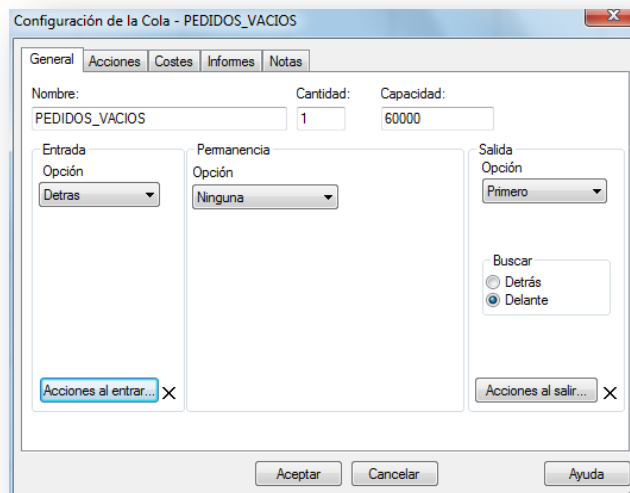


Figura 3.63 Ventana de configuración del almacén de pedidos vacíos

No se han configurado acciones de entrada ni de salida, se trata de un elemento pasivo donde esperan las “cartas” a ser requeridas por los operarios y cuenta con una capacidad de 60.000 unidades.

3.3.5 Almacén de pedidos pendientes

En este almacén se retienen los pedidos cuyos atributos han sido rellenados por los operarios y esperan a ser llamados por la centralita para su asignación a un vehículo. La ventana de configuración del almacén es la que sigue (Figura 3.64):

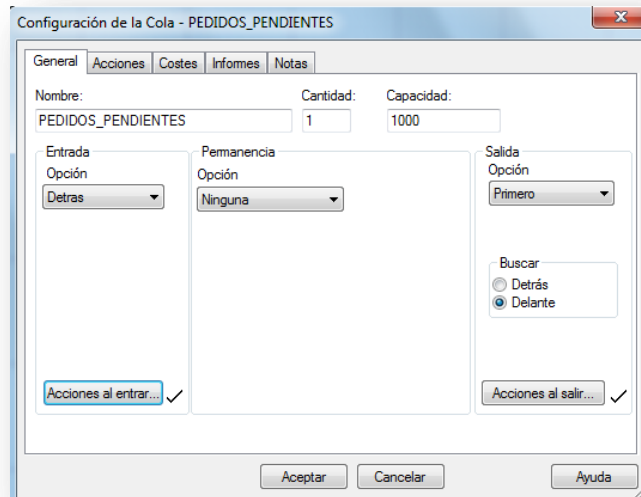


Figura 3.64 Ventana de configuración del almacén de pedidos pendientes

Dado que se trata de un buffer y, por tanto, de un elemento pasivo no cuenta con reglas de entrada ni de salida. En **acciones de entrada** se ha configurado lo siguiente (Figura 3.65):

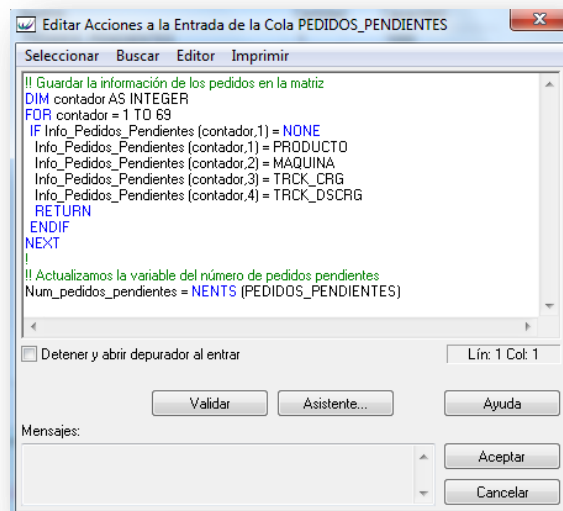


Figura 3.65 Acciones de entrada del buffer pedidos_pendientes

De esta forma se rellena la matriz Info_Pedidos_Pendientes con la información que contienen los atributos de los pedidos. La información se rellena de tal manera que el nuevo pedido rellena la primera fila libre de la matriz, es decir, la primera fila en la que aparezca NONE. Por último, se actualiza la variable que contabiliza el número de pedidos pendientes. En **acciones de salida** se ha establecido lo siguiente (Figura 3.66):

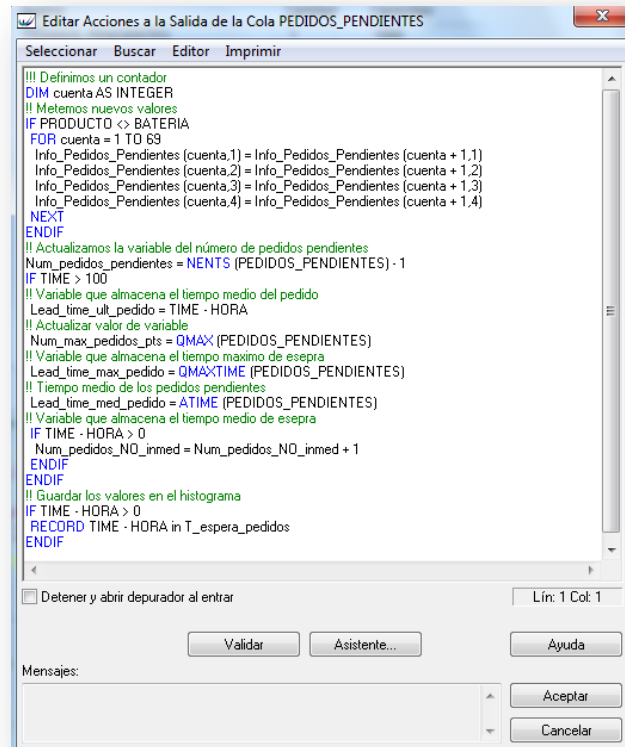


Figura 3.66 Acciones de salida del almacén pedidos_pendientes

De esta forma se consigue que la primera línea de la matriz sea borrada, dado que la centralita coge pedidos con un sistema FIFO el primer pedido saldrá del almacén y, por tanto, debe borrarse su información. Además se consigue que la información contenida en las sucesivas filas se desplace una posición hacia arriba.

Por otro lado, al salir un producto se resta a la variable que almacena el número de pedidos pendientes una unidad. Se actualizan los valores de una serie de variables como son, el tiempo de espera (tiempo desde que el operario hace el pedido hasta que sale de la cola de pedidos pendientes), el número máximo de pedidos que ha habido en cola, el tiempo máximo de espera de un pedido o el tiempo medio de espera de los pedidos pendientes.

En la variable Num_pedidos_NO_inmed se contabilizan aquellos pedidos que no han sido asignados inmediatamente a un vehículo, es decir, aquellos pedidos que han pasado un tiempo superior a cero en la cola. Por último, se registra en el histograma $T_espera_pedidos$ el tiempo de espera de los pedidos.

3.3.6 Almacén de pedidos atendidos

Una vez que los pedidos han sido asignados a un vehículo la centralita los envía al almacén de *pedidos_atendidos* donde quedan retenidos el resto de la simulación. La ventana de configuración es la que aparece en la **Figura 3.67**. Como en los casos anteriores, al ser un almacén no cuenta con reglas de entrada ni de salida. En este caso, además, no hay acciones de entrada ni de salida. Únicamente se utiliza para llevar una contabilidad de los pedidos atendidos.

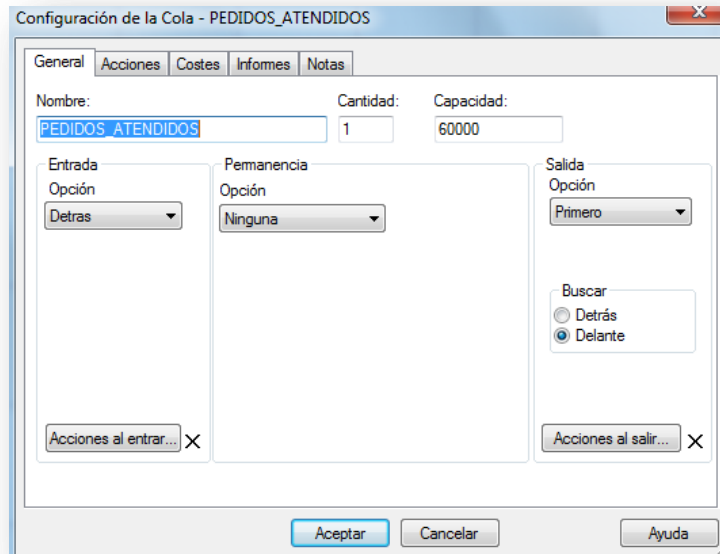


Figura 3.67 Ventana de configuración del almacén de pedidos_atendidos

3.4 Vehículos

Son los elementos que representan los AGV y que transportan los productos procesados por las máquinas. Están configurados de forma que sólo pueden transportar un único producto a la vez. Se han configurado con una velocidad media para todos los carros sin aceleraciones ni deceleraciones. Lo que sí tienen es un tiempo de carga y descarga, independientemente del track donde lo realicen.

El modelo original cuenta con once vehículos para la gestión de abastecimiento y evacuación de las máquinas y se han representado de la siguiente manera (Figura 3.68):

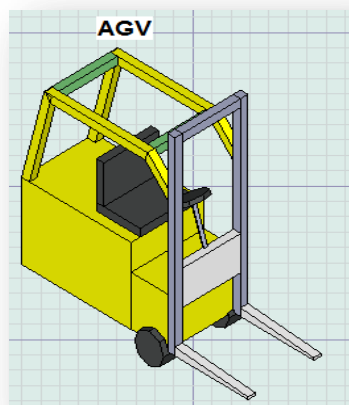


Figura 3.68 Representación gráfica del elemento vehículo

Durante la simulación los AGV que recorren las vías se representan mediante un número y un color: el número indica si el carro se encuentra cargado (numero=1) o descargado (número=0), mientras que los colores indican el estado del carro. Se presenta a continuación la leyenda de colores (**Figura 3.69**):



Figura 3.69 Leyenda de colores del elemento AGV

En la ventana de configuración del vehículo se ha establecido lo que sigue (**Figura 3.70**):

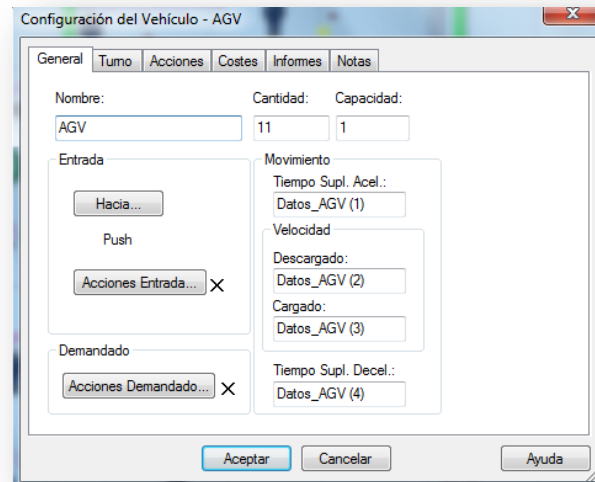


Figura 3.70 Ventana de configuración de AGV

De esta forma se han configurado once vehículos cuya capacidad es uno, haciendo referencia a la cantidad de productos que pueden transportar. Los datos referentes a tiempo de aceleración, velocidad descargado, velocidad cargado y tiempo de deceleración se introducen haciendo referencia a una variable denominada *Datos_AGV* que importa los datos del archivo Excel de datos del modelo. En **reglas de entrada** de los carros se ha establecido lo siguiente a fin de enviar cada vehículo a un track de aparcamiento en el momento en que se inicia la simulación (**Figura 3.71**):

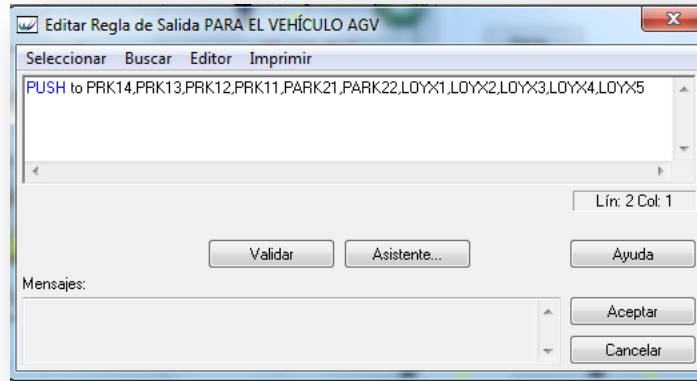


Figura 3.71 Regla de entrada de los vehículos

3.5 Tracks

Estos elementos son necesarios para la circulación de los vehículos. Representan los caminos físicos del sistema real por donde circulan los carros. Se han representado de la siguiente manera (Figura 3.72):

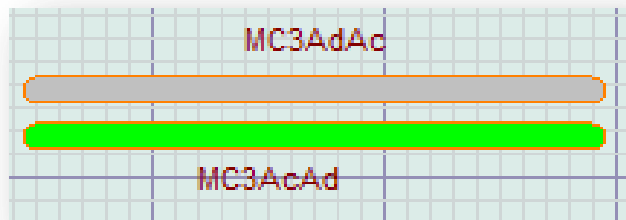


Figura 3.72 Representación gráfica del elemento track

En la imagen se encuentran representados los tracks MC3AdAc y MC3AcAd. En el programa Witness cuentan con una peculiaridad, para representar un camino de doble sentido deben utilizarse dos tracks, uno para cada sentido de circulación. Por ello, en la imagen se ha tenido que dividir lo que realmente es un único track de doble sentido. Los tracks coloreados en verde indican que son zonas de carga y descarga. El borde naranja indica que se trata de una zona. Se explica a continuación su significado.

Gracias a la opción de *zonas*, el conjunto de tracks que pertenezcan a la misma zona sólo permitirán la circulación simultánea de vehículos igual al número máximo de capacidad del track con menor capacidad. Es decir, si una zona está compuesta por tres tracks, el primero con capacidad cuatro, el segundo con capacidad dos y el tercero con capacidad tres, no podrá haber más de dos vehículos circulando de forma simultánea por esa zona. Esto resulta útil para representar vías de doble sentido con dos track de diferentes sentidos en el modelo. Para asignar una zona basta con numerar al

conjunto de tracks con ese mismo número; por defecto, todos los tracks vienen configurados con la numeración 0, lo que indica que no pertenecen a ninguna zona.

Los tracks permiten establecer velocidades máximas por tramos, la longitud real de la vía y la longitud de representación. Por ello, el mapa de las rutas de los vehículos no está a escala, no existe relación entre la longitud de representación y la longitud real. La ventana de configuración de los tracks es la siguiente (**Figura 3.73**):

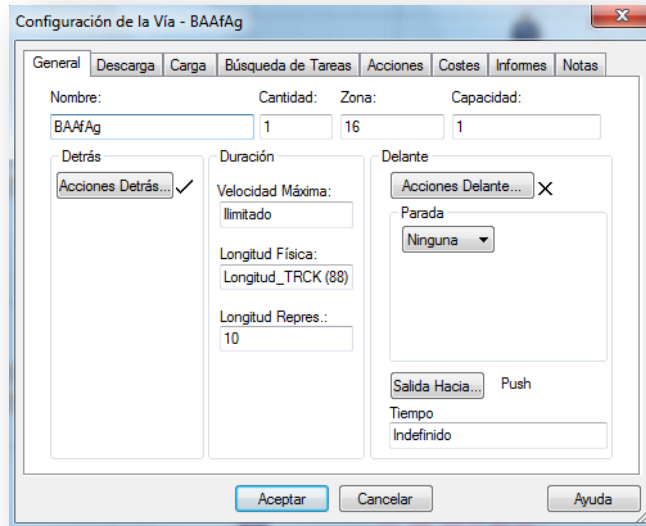


Figura 3.73 Ventana de configuración del track BAAfAg

Este ejemplo es para el track BAAfAg, donde se realiza la carga y descarga de los productos de las máquinas tipo BA. Cuenta con una capacidad de uno, es decir, sólo puede haber un único vehículo en el track. En zona se ha establecido la codificación 16, cada zona se registra con un número diferente. No se ha regulado una velocidad máxima, la longitud física viene referida con la variable *Longitud_TRCK(número_track)* que extrae los datos de un archivo Excel, y en la longitud de representación se ha configurado con valor diez. Se ha regulado una regla en el momento de entrada de vehículo al track (**Figura 3.74**):

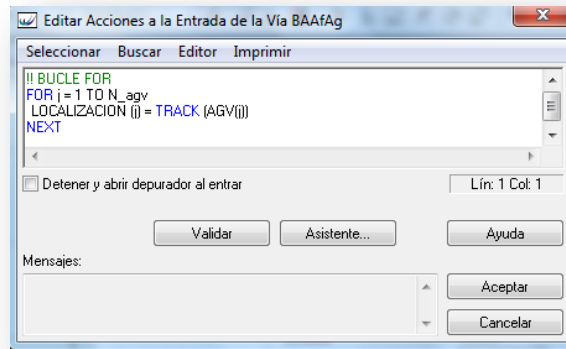


Figura 3.74 Acciones a la entrada del track BAafAg

A través de un bucle FOR, que va desde uno hasta el número de vehículos presentes en el modelo, se establece que cada vez que entre el vehículo en un track se actualice su localización de forma que se sepa la ubicación de los carros en todo momento. En **reglas de salida** se ha establecido lo que aparece a continuación (Figura 3.75):

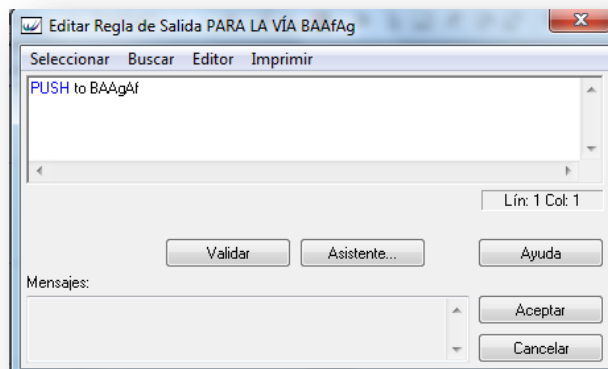


Figura 3.75 Regla de salida del track BAafAg

En este caso el único track al que puede dirigirse es el track BAafAf, en otros casos donde hay variedad de opciones, como el ejemplo del track PAML, se ha configurado lo siguiente (Figura 3.76):

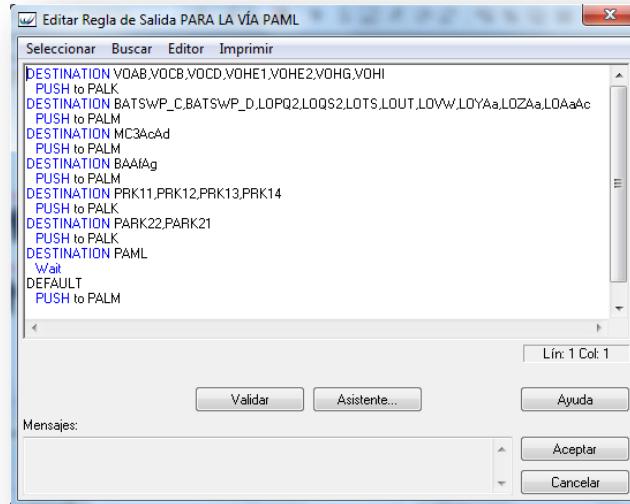


Figura 3.76 Regla de salida de la vía PAML

De esta forma, a través del comando *DESTINATION nombre_track* se evalúa el destino final del carro y en función de eso a través del comando *PUSH nombre_track* se envía al siguiente track. La carga y descarga del producto que transporta el vehículo se produce al final del track a través de la utilización de una serie de funciones. Se configura en la pestaña de carga y descarga de la ventana de configuración del track. En la ventana de descarga del track se ha configurado lo siguiente (Figura 3.77):

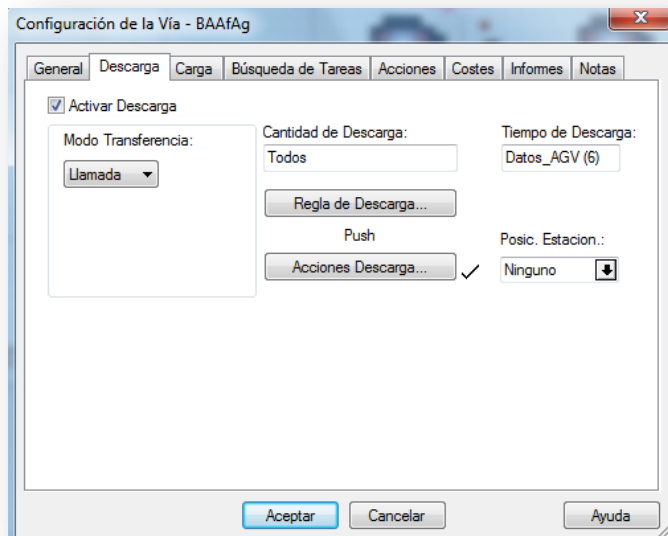


Figura 3.77 Ventana de configuración de descarga de la vía BAAfAg

Se ha configurado a través del modo de transferencia *Llamada* (existen otros tipos como son *Siempre* y *Condición*), de forma que únicamente se realiza la carga y la descarga si ha sido asignada previamente con el comando *CALL/VSEARCH*. En cantidad de descarga se ha configurado *Todos*, de forma que se descarga la totalidad del material transportado. En tiempo de descarga se hace referencia a la variable *Datos_AGV(6)* que extrae los datos de un archivo Excel. Ofrece la opción de enviarlo, en el momento que se ha realizado la descarga, al parking a través del menú desplegable *Posición Estacionamiento*. En este modelo no se utiliza esa opción, se trabaja con la función *APARCAR*, que viene detallada en el apartado *Funciones*. En la regla de descarga se ha configurado lo siguiente (**Figura 3.78**):

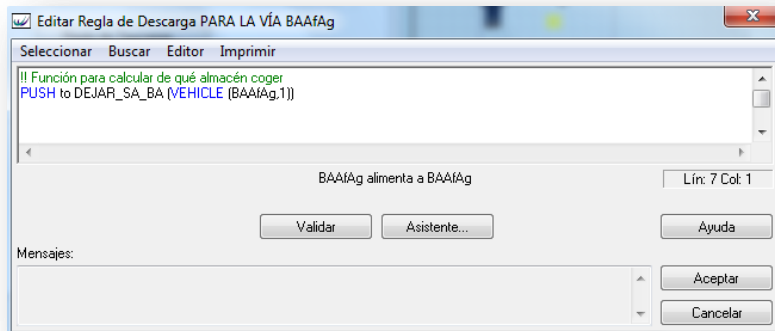


Figura 3.78 Regla de descarga del track BAAfAg

De forma que se realiza la llamada a la función *DEJAR_SA_BA(nombre_vehículo)* enviándose como parámetro a la función el nombre del vehículo, que a su vez nos devuelve el nombre del stock avanzado donde depositar el material (su funcionamiento se detalla en el apartado *Funciones*). En las **acciones de descarga** del track se ha establecido lo siguiente (**Figura 3.79**):

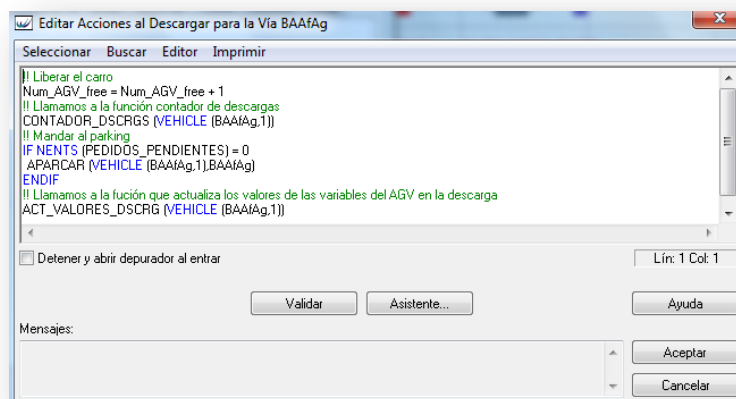


Figura 3.79 Acciones de descarga de la vía BAAfAg

En primer lugar, se actualiza el valor de la variable *Num_AGV_free*, al haber finalizado con el pedido pasa a haber un carro disponible más. En segundo lugar, se hace la llamada a la función *CONTADOR_DSCRGS(nombre_vehículo)* enviando como parámetro a la función el nombre del vehículo que realiza la descarga de forma que la función incrementa en uno el número de descargas efectuadas por ese vehículo (su funcionamiento se detalla en el apartado *Funciones*). En tercer lugar, y en caso de no haber pedidos pendientes, se realiza la llamada a la función *APARCAR(nombre_vehículo)* de forma que asigna un track de parking al vehículo que acaba de hacer la descarga (se detalla su funcionamiento en el apartado *Funciones*).

Por último, se realiza la llamada a la función *ACT_VALORES_DSCRG(nombre_vehículo)* donde se actualizan las variables de información de los vehículos tales como track de carga, track de descarga, material que transporta, etc. En caso de enviarse el vehículo al parking únicamente se muestra el destino, en las demás variables aparece NONE. El funcionamiento de esta función se explica en el apartado *Funciones*. La **Figura 3.80** muestra la configuración de la pestaña de carga del track:

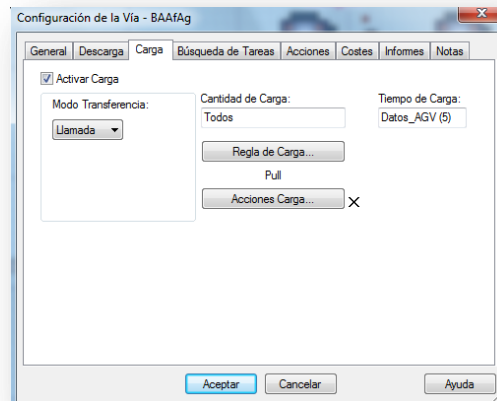


Figura 3.80 Ventana de configuración de carga del elemento BAAfAg

Al igual que en la descarga, se ha configurado con el tipo de transferencia *Llamada*. Se carga todo el material pero, dado que el vehículo se ha configurado para que sólo pueda cargar un producto cada vez, únicamente cogerá un producto. El tiempo de carga se establece a través del valor de la variable *Datos_AGV()*. No se han establecido acciones de carga; en cambio, en **reglas de carga** se ha configurado lo siguiente (**Figura 3.81**):

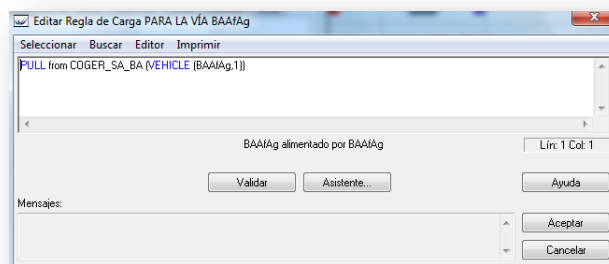


Figura 3.81 Regla de carga del elemento BAAfAg

De forma que, al igual que en la descarga, se hace la llamada a una función que devuelve el nombre de stock avanzado de donde coger el producto.

3.6 Recursos

Este elemento puede utilizarse para modelar tanto recursos humanos (operarios o inspectores) como recursos materiales (herramientas o accesorios) en tareas de reparación, limpieza, reparación o durante el funcionamiento de un proceso. Los recursos se han representado de la siguiente manera (Figura 3.82):

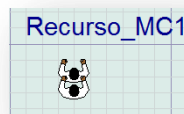


Figura 3.82 Representación gráfica del elemento recurso

En este modelo los recursos se utilizan a fin de enlazar el funcionamiento de unas máquinas con otras, para impedir que, en el grupo de máquinas que representa una sola máquina, algunas se encuentren funcionando mientras la máquina central se encuentra averiada. Dado que todas las máquinas del grupo deben funcionar en los mismos instantes de tiempo. La configuración de los recursos es la siguiente (Figura 3.83):

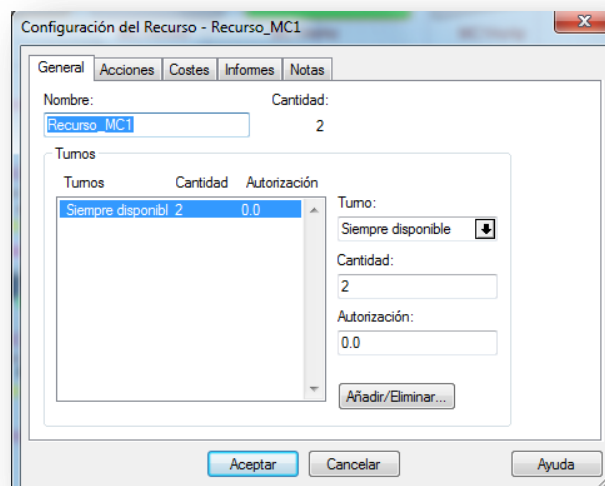


Figura 3.83 Ventana de configuración del elemento recurso

Las máquinas que están divididas en tres tienen asociados dos recursos (MC1, MC2, MC3, BA1, BA2, BA4, BA5, BA6, MF1 y MF2) mientras que las máquinas que están divididas en dos tienen asociado un único recurso (CG1 y CG2).

Como se ha explicado anteriormente, cada grupo de máquinas cuenta con una máquina central que lleva asociada la avería y con una o dos máquinas esclavas. La forma de relacionar las averías de unas con otras es a través de estos recursos. Las máquinas esclavas necesitan los recursos en su ciclo de funcionamiento (**Figura 3.84**), cada máquina un recurso; en cambio la máquina central precisa de todos los recursos asociados a ese grupo de máquinas en el momento de avería.

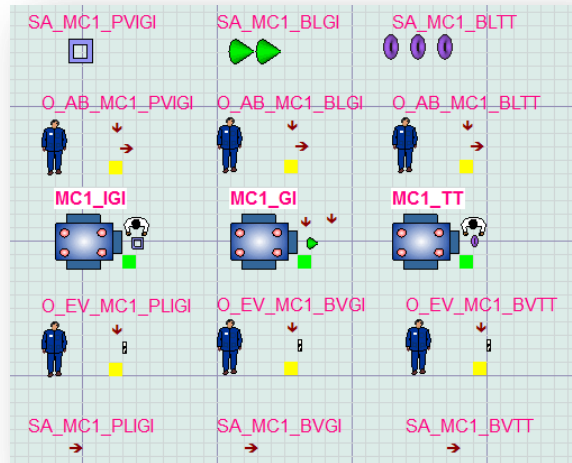


Figura 3.84 Recursos asociados a las máquinas esclavas en su ciclo de funcionamiento

De esta forma, cuando la máquina central se averíe, los recursos abandonarán las máquinas esclavas y se dirigirán hacia la máquina central, impidiendo a las máquinas esclavas seguir trabajando y, por tanto, estarán “averiadas” tanto tiempo como lo esté la máquina central, como se aprecia a continuación (**Figura 3.85**):

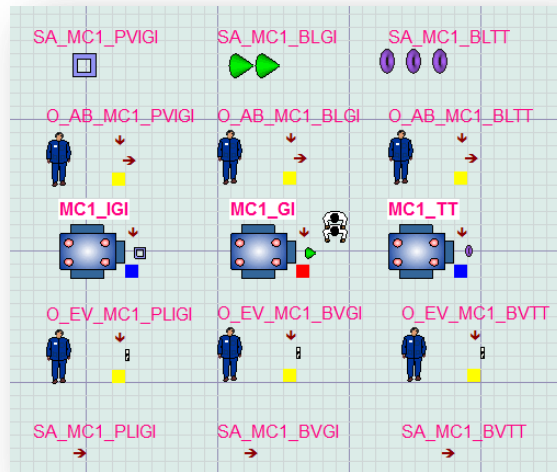


Figura 3.85 Recursos asociados a la máquina central durante avería

Una vez termine la avería de la máquina central los recursos se dirigirán de nuevo a las máquinas esclavas y continuarán con su ciclo de funcionamiento.

4 Implementación del modelo parte II: Elementos lógicos, distribuciones y elementos gráficos

En el presente capítulo se continúa explicando el modelo desarrollado. En concreto, se describe el conjunto de elementos lógicos (atributos, variables y funciones) que gobiernan el funcionamiento del modelo. Además, se detallan las distribuciones utilizadas en la inserción de tiempos de ciclo de las máquinas y los elementos gráficos que ofrecen la información útil que suministra la simulación.

4.1 Elementos lógicos

4.1.1 Atributos

Son características asociadas a las piezas que circulan por el sistema. En el modelo los pedidos llevan asociados una serie de atributos, que son rellenados con la información correspondiente por los operarios en las acciones de comienzo de su ciclo:

En el atributo **producto**, de tipo nombre, se almacena el tipo de producto que se solicita en el pedido. Por defecto todas las piezas llevan asociadas el atributo *TYPE* que indica el nombre del producto, como puede ser *JLBL* o *PVIGI*. La ventana de configuración del atributo pedido y de todos los demás atributos es similar a la que se muestra a continuación (**Figura 4.1**):

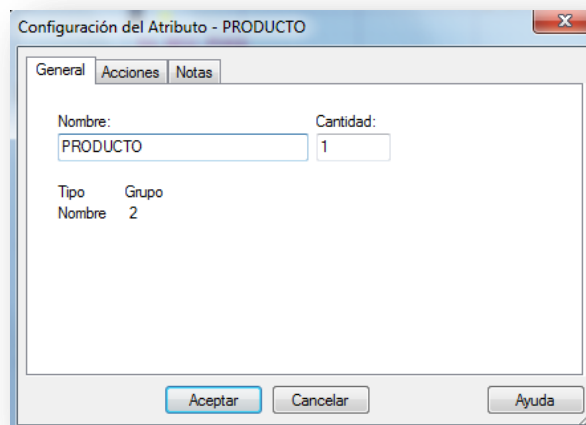


Figura 4.1 Ventana de configuración del atributo producto

En dicha ventana de configuración se asigna el nombre del atributo, la cantidad y el grupo, de forma que al asignar a todos los atributos el grupo dos y a al elemento pedidos el grupo dos automáticamente todos los pedidos llevan asociados todos los atributos pertenecientes al grupo dos.

En el atributo **máquina** se almacena el nombre de la máquina que realiza la petición. De forma similar en el atributo **track de carga** se almacena el track donde se realiza la carga del pedido, mientras que en el **track de descarga**, también de tipo nombre, se almacena el nombre del track donde se realiza la descarga del pedido. Por último, encontramos el atributo **hora**, de tipo real, donde se almacena el instante de tiempo en el que se realiza el pedido.

4.1.2 Variables

Se han insertado una serie de variables que cambian su valor a lo largo del tiempo de la simulación. Se detallan a continuación:

AGV_A_nombre del track

Este conjunto de variables está formada por las variables: AGV_A_BATSWP, AGV_A_LOYX1, AGV_A_LOYX2, AGV_A_LOYX3, AGV_A_LOYX4, AGV_A_LOYX5, AGV_A_PARK11, AGV_A_PARK12, AGV_A_PARK13, AGV_A_PARK14, AGV_A_PARK21 y AGV_A_PARK22. Se utilizan para evitar que en el momento de asignación de un parking que se encuentra vacío, pero que ya ha sido asignado a un vehículo, pueda asignarse a otro vehículo, lo que produciría el bloqueo de los carros.

Estas variables toman valores 0 y 1: si toma valor cero significa que ningún vehículo ha sido asignado a ese track, mientras que si toma el valor uno significa que ese parking ya es el destino de algún vehículo. Toma el valor uno en la función *APARCAR* que asigna el parking correspondiente al vehículo que lo solicita (se explica en detalle en el apartado *Funciones, Grupo 4: Función Aparcar*) y su valor se actualiza a cero en las acciones de salida del parking a través de la expresión: *AGV_A_nombre del parking=0*

Se utiliza la variable AGV_A_BATSWP para evitar que se envíe un carro a cambiar batería cuando ya hay uno que se encuentra cargando, de esta forma se evita el bloqueo del track PANO. Funciona de la misma manera que las variables explicadas en el párrafo anterior y la actualización de valores se detalla en el apartado *Funciones, en el Grupo 2: Función LLAMADA_CENTRALITA*.

Avería

Esta variable de tipo entero se utiliza en la máquina averías y toma el valor 0 ó 1 en función de si no se han cumplido las condiciones para la avería o si sí se han cumplido, respectivamente. Si se cumplen las condiciones se procede a la avería o se pasa al siguiente vehículo en caso contrario.

Carro

Esta variable se utiliza para designar el número de cada carro, se muestra a continuación su representación gráfica (**Figura 4.2**):

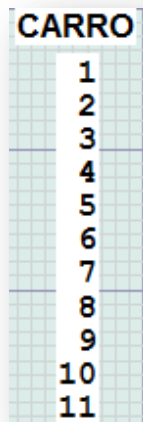


Figura 4.2 Representación gráfica de los valores de la variable carro

Carro_avería

En esta variable tipo entero se almacena el número del carro que se va a averiar.

Datos_AGV

En esta variable se almacenan los valores exportados del Excel tales como la velocidad del vehículo cargado o en vacío, el tiempo de aceleración y el tiempo de deceleración.

Demand_list

Esta variable aparece de forma automática asociada a los carros. En ella se almacenan todos los pedidos que se han emitido a los carros pero que todavía no han sido asumidos por alguno porque están todos ocupados. Tal y como está configurado el modelo esta variable siempre debería ser 0, puesto que no se emiten pedidos a los carros hasta que no se detecta que hay uno libre; por ello, se utiliza esta variable para detectar que algún pedido se ha asignado a un carro por error estando éste ya ocupado o que se ha emitido algún pedido a un carro y no se ha ejecutado. Se representa en el modelo de color rojo para resaltar que se trata de una variable de detección de errores.

Descarga

Indica el track donde se produce la descarga a través del comando *DESTOF2*. Funciona igual que la variable *carga* en cuanto a su actualización.

Dest_CRG

Indica, para cada carro, el próximo destino inmediato asignado al carro mediante el comando *DESTOF1*. En caso de ser un pedido normal se informará del punto de carga del material. En caso de ser un pedido de batería se notificará el track de cambio de batería. Por otro lado, si no hay pedidos pendientes se informará del parking donde va a aparcar dicho vehículo. A diferencia de las demás variables su valor no se vacía en el momento de la descarga, sólo se actualiza.

Info_pedidos_pendientes

En esta variable matriz de tipo nombre se almacena el valor de los atributos de aquellos pedidos que se encuentran en el almacén *pedidos_pendientes*, a excepción del atributo *hora*.

J

Esta variable global se utiliza como contador a la hora de actualizar, en la entrada de todos los tracks, el valor de la variable localización.

Lead_time_max_pedido

En esta variable se almacena el tiempo máximo que ha permanecido un pedido en la cola de *pedidos_pendientes*, ese tiempo corresponde a la diferencia de instantes de tiempo en que se produce el pedido por parte de una máquina hasta que la centralita asigna dicho pedido a un vehículo. Su valor se actualiza en las acciones de salida del almacén de pedidos pendientes mediante la expresión:

$$\text{Lead_time_max_pedido} = \text{QMAXTIME}(\text{PEDIDOS_PENDIENTES})$$

El valor se almacena en la variable a través de la función *QMAXTIME(nombre_almacen)* propia del sistema.

Lead_time_med_pedido

En esta variable de tipo real se almacena el tiempo medio que pasan los pedidos en la cola *pedidos_pendientes*. Al igual que la variable anterior, su valor se actualiza en las acciones de salida del buffer a través de la siguiente expresión:

Lead_time_med_pedido = **ATIME** (PEDIDOS_PENDIENTES)

ATIME(nombre_almacen) es también una función definida de serie por el programa. Cabe destacar que para el cálculo de la media de los tiempos de espera de los pedidos se utiliza la variable *Num_pedidos_NO_inmed* y a través de una expresión que se detalla en el apartado *Limites del sistema*.

Lead_time_ult_pedido

En esta variable, de tipo entero, se almacena el tiempo que ha pasado en la cola el último pedido que ha salido del buffer *pedidos_pendientes*. Al igual que en las anteriores, se actualiza a la salida de la cola a través de la siguiente expresión:

Lead_time_ult_pedido = TIME – HORA

De esta forma se obtiene el valor de la diferencia entre el tiempo actual de la simulación, es decir, el instante de tiempo en que el pedido sale del buffer, y el instante de tiempo en que se realizó el pedido.

LIM_SUP

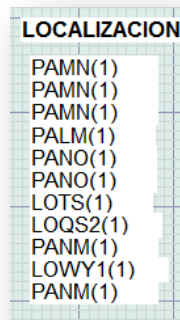
Esta variable extrae su valor de la hoja Excel de datos y tiene un valor fijo. Indica para qué nivel de stock las máquinas del conjunto preparación deben parar su producción.

LIM_INF

Esta variable es fija y toma el valor que extrae de la hoja Excel de datos. Es la variable que contabiliza para qué nivel de stock deben volver a producir las máquinas del bloque preparación.

Localización

A través de esta variable se muestra en todo momento la localización de los carros. El valor de esta variable se actualiza cada vez que entra un carro a un track a través de la sintaxis mostrada en el apartado *tracks*. Localización es una variable que coincide en número con el número de vehículos con los que cuenta el modelo. La variable presenta la siguiente interfaz (**Figura 4.3**):



LOCALIZACION
PAMN(1)
PAMN(1)
PAMN(1)
PALM(1)
PANO(1)
PANO(1)
LOTS(1)
LOQS2(1)
PANM(1)
LOWY1(1)
PANM(1)

Figura 4.3 Representación gráfica de la variable localización

Longitud_TRCK

En esta variable, de tipo real, se almacena la longitud de los noventa tracks que componen el modelo. Estos valores se exportan del archivo Excel de datos de entrada al modelo.

Maq

Esta variable indica la máquina a la cual está transportando material el vehículo; al igual que las anteriores su número coincide con el número de AGV del modelo. Se actualiza su valor al igual que la variable *material*. Se muestra a continuación su representación gráfica (**Figura 4.4**):

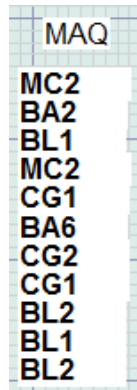


Figura 4.4 Representación gráfica de la variable maq

Material

Esta variable indica, para cada carro, el producto que está gestionando; por tanto, su número es igual al número de carros presentes en el modelo. Su valor se actualiza en cada llamada a través de la función denominada *LLAMADA_CENTRALITA* (*NUM_AGV,TRCK_CRG,TRCK_DS CRG*) cuyo funcionamiento se explica en el apartado *Funciones*. La variable se muestra de la siguiente forma (**Figura 4.5**):

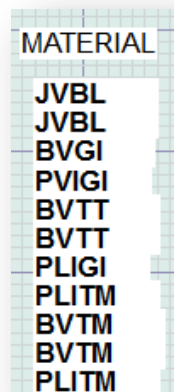


Figura 4.5 Representación gráfica de la variable material

MEDIA_MOV_BATSWP

Esta variable indica el número de movimientos que debe realizar un carro antes de ir al cambio de batería. Su valor es fijo durante la simulación y se exporta del archivo Excel que contiene los datos de entrada de la simulación.

N_agv

En esta variable, de tipo entero, se almacena el número de AGV que existen en el modelo. Su valor se exporta de un archivo Excel.

N_dscrg

Esta variable es un contador del número de movimientos para cada carro. Su valor se inicializa a 0 y en cada descarga se incrementa en uno a través de la expresión: $N_dscrg=N_dscrg+1$. Es la variable utilizada por la máquina de cambio de batería para enviar el pedido. Cuando se envía el pedido la variable se inicializa a 0 y vuelve a empezar.

N_ops_nombremáquina

En esta variable tipo entero se almacena el número de operaciones de cada máquina. A través del número de operaciones se realiza el cálculo de la producción diaria, fundamental en la validación del modelo.

Nom_TRACK

En esta variable, de tipo cadena de caracteres, se almacena el nombre de todos los tracks que componen el modelo. Su ventana de configuración es la que sigue (**Figura 4.6**):

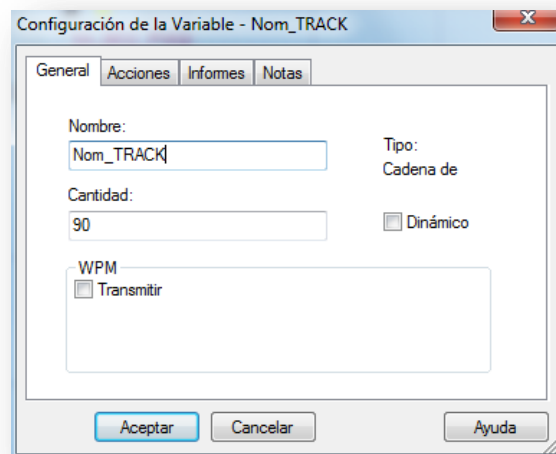


Figura 4.6 Ventana de configuración de la variable Nom_TRACK

Num_AGV

Esta variable se utiliza en la centralita a fin de contabilizar qué vehículo se encuentra disponible para realizar un pedido.

Num

Esta variable de tipo entero se utiliza para designar a cada track con un número, va del 1 al 90.

Num_AGV_free

Esta variable nos informa del número de vehículos que están disponibles en cada momento. En el momento que hay una llamada por parte de la centralita se actualiza el valor por medio de la expresión: $Num_AGV_free=Num_AGV_free-1$, reduciendo su valor en una unidad dado que se acaba de asignar un pedido a un carro. En el momento de la descarga el vehículo ha terminado el pedido y,

por tanto, pasa a estar libre de forma que se actualiza el valor de esta variable a través de la expresión: $\text{Num_AGV_free} = \text{Num_AGV_free} + 1$.

Num_max_pedidos_pts

Esta variable, de tipo entero, almacena el número máximo de pedidos que ha habido en la cola *pedidos_pendientes*. Su valor se actualiza a la salida del buffer de *pedidos_pendientes* a través de la siguiente expresión:

$$\text{Num_max_pedidos_pts} = \text{QMAX}(\text{PEDIDOS_PENDIENTES})$$

La función QMAX(nombredelalmacén) es una función propia del sistema.

Num_pedidos_NO_inmed

Esta variable almacena el número de pedidos que no son asignados inmediatamente, es decir, tienen un tiempo de permanencia en la cola de espera. En estos pedidos la diferencia entre el instante de tiempo de salida de la cola de *pedidos_pendientes* y la hora en que se realizó la petición es mayor que cero ($\text{TIME} - \text{HORA} > 0$). Esta variable se utiliza en el cálculo del tiempo medio de espera y su valor se actualiza en las acciones de salida del buffer a través de la expresión:

```
IF TIME - HORA > 0
  Num_pedidos_NO_inmed = Num_pedidos_NO_inmed + 1
ENDIF
ENDIF
```

Num_pedidos_pendientes

Esta variable almacena el número de pedidos en cola esperando a ser asignados a un vehículo.

Num_Prod

Esta variable se utiliza para contabilizar el número de productos que existen en los almacenes del modelo. Su valor se actualiza cada vez que un producto entra o sale de un almacén. Cumple un papel importante en la regulación de la variable VAR_PARO() que es la encargada de arrancar y parar las máquinas de preparación.

Prod

Se trata de una variable que almacena el nombre de los productos presentes en la simulación. Se utiliza para el control de la producción a través del nivel de estos.

Semilla

A fin de aumentar la variabilidad del sistema se introduce una variable semilla. En función de su valor se obtienen unos resultados u otros en cuanto a tiempos de ciclo de las máquinas o porcentaje de averías.

SWP_BAT_AGV

Esta variable se utiliza en la máquina de cambio de batería para almacenar el nombre del vehículo que debe cambiar su batería por haber alcanzado el número de movimientos establecidos en la variable *media_mov_batswp*.

Tiempo

Esta variable de tipo real se utiliza en la máquina avería para almacenar el tiempo de la simulación, de forma que se consigue que cada siete minutos entre una pieza a la máquina.

Track_actual

Esta variable de tipo nombre se utiliza también en el elemento máquina averías y en ella se almacena el valor del destino inmediato (*DESTOF1*) del vehículo que se va a proceder a averiar.

T_entre_parada_ale_dsv

Esta variable almacena la desviación del tiempo entre paradas para las averías tipo aleas.

T_entre_parada_ale_media

Esta variable almacena la media del tiempo entre paradas para las averías tipo aleas.

T_entre_parada_dsv

Esta variable almacena la desviación del tiempo entre paradas para las averías generales.

T_entre_parada_media

Esta variable almacena la media del tiempo entre paradas para las averías generales.

T_entre_parada_pnn_dsv

Esta variable almacena la desviación del tiempo entre paradas para las averías tipo pnn.

T_entre_parada_pnn_media

Esta variable almacena la media del tiempo entre paradas para las averías tipo pnn.

T_parada_ale_desviacion

Esta variable almacena la desviación del tiempo de parada para las averías tipo aleas.

T_parada_ale_media

Esta variable almacena la media del tiempo de parada para las averías tipo aleas.

T_parada_dsv

Esta variable almacena la desviación del tiempo de parada para las averías tipo general.

T_parada_media

Esta variable almacena la media del tiempo de parada para las averías tipo general.

T_parada_pnn_desviacion

Esta variable almacena la desviación del tiempo de parada para las averías tipo pnn.

T_parada_pnn_media

Esta variable almacena la media del tiempo de parada para las averías tipo pnn.

TIEMPO_CICLO_BL1

En la máquina BL1 el tiempo de ciclo es fijo y no viene dado a través de una distribución como ocurre con la mayoría de las máquinas. Esta variable, de tipo real, almacena el valor del tiempo de ciclo para la máquina BL1. Se hace referencia a esta variable en la ventana de configuración de la máquina en el apartado de tiempo de ciclo. Dicho valor se extrae del archivo Excel de datos de entrada.

TIEMPO_CICLO_CG1_ITM

Al igual que en la máquina BL1, esta variable almacena el tiempo fijo para la máquina CG1_ITM.

TIEMPO_CICLO_CG1_TM

Lo mismo ocurre para la máquina CG1_TM.

VAR_PARO

Se utiliza esta variable para regular la producción de las máquinas de preparación, dado que el modelo funciona con un sistema kanban: cuando esta variable toma el valor uno las máquinas dejan de producir, y cuando la variable toma el valor cero vuelven a producir.

En las acciones de entrada de algunas de los operarios que abastecen las máquinas del grupo preparación se ha establecido la expresión que aparece en la **Figura 4.7**. De esta manera, en primer lugar se actualiza su valor a cero por defecto y, a continuación, si el número de productos en el almacén es mayor que el valor indicado en la variable `lim_sup` su valor cambia a uno de forma que se para la producción.

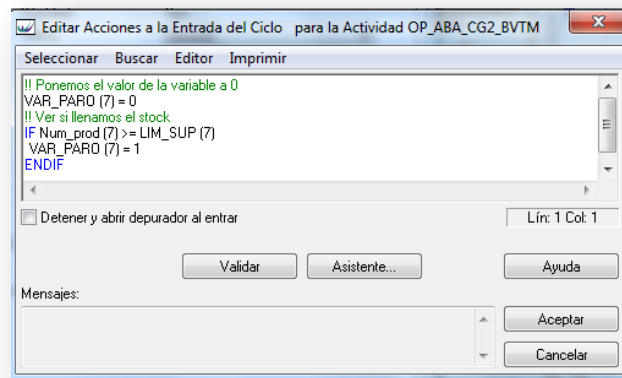


Figura 4.7 Actualización de la variable VAR_PARO en las máquinas de preparación

4.1.3 Funciones

Se han creado una serie de funciones que reducen de forma significativa las líneas de código necesarias en la programación. Se establecen cinco grandes grupos:

1. el primero lo constituye el conjunto de funciones que se utilizan para la carga y descarga de material como pueden ser *COGER_CR_JXBL* o *DEJAR_SA_BA*;
2. en el segundo grupo se encuentra la función denominada *LLAMADA_CENTRALITA (NUM_AGV,TRCK_CRG,TRCK_DSCRG)* que realiza la asignación de los pedidos al carro correspondiente;
3. el tercer grupo lo forman las funciones denominadas de actualización, cuya función es refrescar los datos asociados a los vehículos como pueden ser Material, track de carga o track de descarga, este grupo está compuesto por las funciones *ACT_VALORES_DSCRG (nombre_vehiculo)* y *ACT_AGV_A(nombre_vehiculo)*;
4. en el cuarto grupo se encuentra la función denominada *APARCAR* cuyo objetivo es asignar el parking adecuado a un vehículo cuando realiza la descarga y no hay pedidos que atender;
5. y por último, en el grupo cinco se encuentra la función denominada *CONTADOR_DSCRGS*, encargada de llevar la contabilidad y actualizar en cada ocasión el número de descargas de cada vehículo.

Se detalla a continuación un ejemplo de cada grupo.

Grupo 1: Función DEJAR_SA_BA

La llamada a esta función se realiza en el momento de descarga a través de las reglas de descarga del vehículo en el track BAAfAg a través de la siguiente expresión:

PUSH to DEJAR_SA_BA (**VEHICLE** (BAAfAg,1))

Aquí se realiza la llamada a la función y se envía el parámetro nombre del vehículo a través de la función *VEHICLE* (*track_vehículo, posición_del_vehículo*). La función devuelve el nombre del stock avanzado donde se debe descargar. La ventana de configuración de la función es la que sigue (**Figura 4.8**).

Se trata de una función tipo nombre que devuelve el nombre del almacén correspondiente y el único parámetro de entrada a la función, denominado como veh, es el nombre del vehículo que realiza la descarga. En acciones, que corresponde con el cuerpo de la función se establece lo que sigue (**Figura 4.9**).

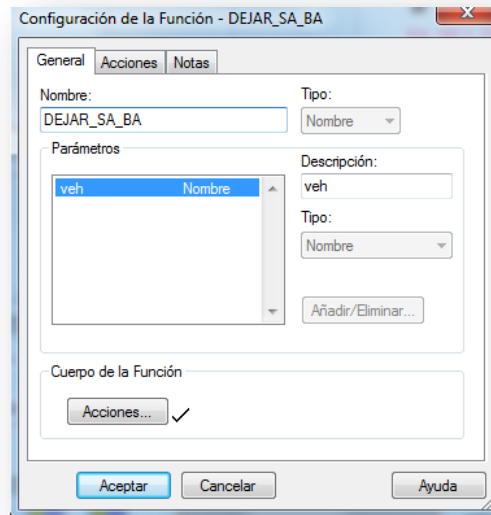


Figura 4.8 Ventana de configuración de la función DEJAR_SA_BA


```

DIM contador AS INTEGER
contador = INDEX (veh)
IF MAQ (contador) = BA1
  IF MATERIAL (contador) = JVBL
    RETURN SA_BA1_JVBL
  ELSEIF MATERIAL (contador) = BVTM
    RETURN SA_BA1_BVTM
  ELSEIF MATERIAL (contador) = PLITM
    RETURN SA_BA1_PLITM
  ENDIF
ELSEIF MAQ (contador) = BA2
  IF MATERIAL (contador) = JVBL
    RETURN SA_BA2_JVBL
  ELSEIF MATERIAL (contador) = BVTM
    RETURN SA_BA2_BVTM
  ELSEIF MATERIAL (contador) = PLITM
    RETURN SA_BA2_PLITM
  ENDIF
ELSEIF MAQ (contador) = BA4
  IF MATERIAL (contador) = JVBL
    RETURN SA_BA4_JVBL
  ELSEIF MATERIAL (contador) = BVTM
    RETURN SA_BA4_BVTM
  ELSEIF MATERIAL (contador) = PLITM
    RETURN SA_BA4_PLITM
  ENDIF
ELSEIF MAQ (contador) = BA5
  IF MATERIAL (contador) = JVBL
    RETURN SA_BA5_JVBL
  ELSEIF MATERIAL (contador) = BVTM
    RETURN SA_BA5_BVTM
  ELSEIF MATERIAL (contador) = PLITM
    RETURN SA_BA5_PLITM
  ENDIF
ELSEIF MAQ (contador) = BA6
  IF MATERIAL (contador) = JVBL
    RETURN SA_BA6_JVBL
  ELSEIF MATERIAL (contador) = BVTM
    RETURN SA_BA6_BVTM
  ELSEIF MATERIAL (contador) = PLITM
    RETURN SA_BA6_PLITM
  ENDIF
ENDIF
RETURN NONE

```

Figura 4.9 Cuerpo de la función COGER_SA_BA

En la primera línea de código se define una variable tipo entero denominada contador. En la siguiente línea se le asigna a la variable contador el valor del índice que corresponde con el número del vehículo. De esta forma se accede, en primer lugar, al valor de la variable máquina correspondiente al vehículo que realiza la descarga para comprobar qué máquina lleva asignada; una vez hecho esto, se comprueba qué producto transporta ese vehículo y en función de estos dos valores se devuelve el nombre del stock avanzado donde debe depositarse el producto.

Grupo 2: Función LLAMADA_CENTRALITA

La llamada a esta función se realiza en las acciones de comienzo de la máquina *CENTRALITA* cuando una vez que se ha cogido un pedido se procede a la asignación al carro correspondiente. La llamada a la función se realiza a través de la siguiente sintaxis:

LLAMADA_CENTRALITA (NUM_AGV,TRCK_CRG,TRCK_DSCRG)

A la hora de realizar la llamada se envían a la función tres parámetros distintos: el número del carro al que se le va a asignar pedido, el track de carga y el track de descarga del material. Los dos últimos valores vienen especificados por los atributos asociados al pedido que se encuentra gestionando la CENTRALITA. La ventana de configuración de la función es la que sigue (**Figura 4.10**):

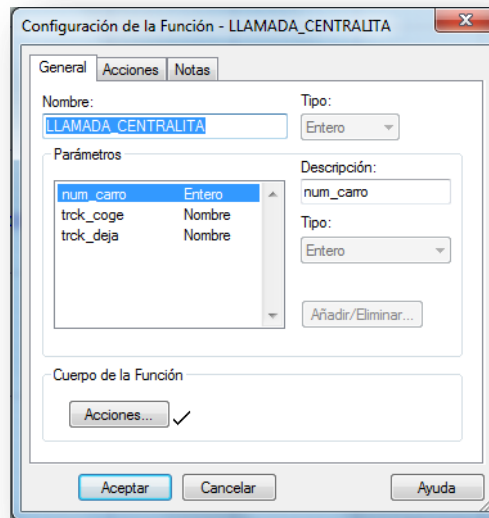


Figura 4.10 Ventana de configuración de la función LLAMADA_CENTRALITA

La función es de tipo entero, pero realmente no devuelve ningún valor al lugar de llamada. Los parámetros enviados a la función son tipo entero, nombre y nombre, respectivamente. A continuación se expone el cuerpo de la función (**Figura 4.11**):

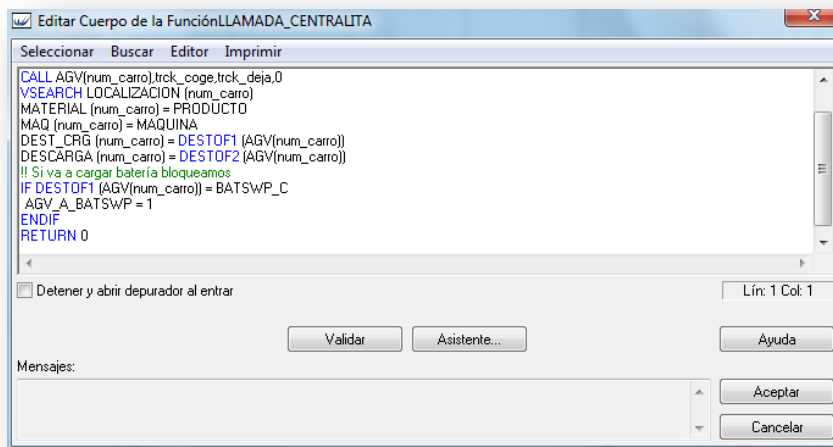


Figura 4.11 Cuerpo de la función LLAMADA_CENTRALITA

En primer lugar, se realiza el *CALL* o llamada al carro correspondiente asignando los valores de los atributos asociados al pedido y que se han enviado como parámetros a la función. En segundo lugar, se realiza *VSEARCH* necesario para encontrar al carro que se va a llamar; se realiza *VSEARCH* en el track que indica la variable localización para el carro correspondiente.

A continuación, se actualizan las variables de información del vehículo con los nuevos datos asociados al pedido tales como el material que transporta, la máquina productora de la petición, el track de carga y el track de descarga. Por último, en caso de tratarse de un pedido de cambio de batería, se actualiza el valor de la variable *AGV_A_BATSWP* a uno de forma que se evite enviar un vehículo a cargar cuando ya hay uno que se dirige a ello. De esta forma se actualizan los datos que se muestran a continuación (**Figura 4.12**):

CARRO	LOCALIZACION	MATERIAL	MAQ	DEST_CRG	DESCARGA	N_dscrg
1	PALM(1)	JLBL	BL2	VOHE1	LOUT	57
2	PANM(1)	JVBL	BL2	LOUT	VOHE1	61
3	PAOP(1)	JVBL	BA6	BAAfAg	LOZAa	60
4	LOZAa(1)	JLBL	MF1	LOZAa	MC1ApAq	59
5	LOUV(1)	BVTM	MF2	MC2AkAl	LOPQ2	59
6	LOPQ2(1)	BLTM	MF2	LOPQ2	MC2AkAl	60
7	VOHG(1)	BLTM	CG1	VOHG	LOPQ2	57
8	VOHE2(1)	PVITM	CG1	VOHE2	LOQS2	54
9	PAOP(1)	BVTM	CG1	LOPQ2	VOHG	55
10	PAOP(1)	PLITM	CG1	LOQS2	VOHE2	56
11	MC1AnAm(1)	JVBL	MF1	MC1ApAq	LOZAa	59

Figura 4.12 Variables de información de los vehículos

Grupo 3: Función *ACT_VALORES_DSCRG*

La llamada a esta función se realiza en las acciones de descarga de los tracks a través de la siguiente expresión (**Figura 4.13**):

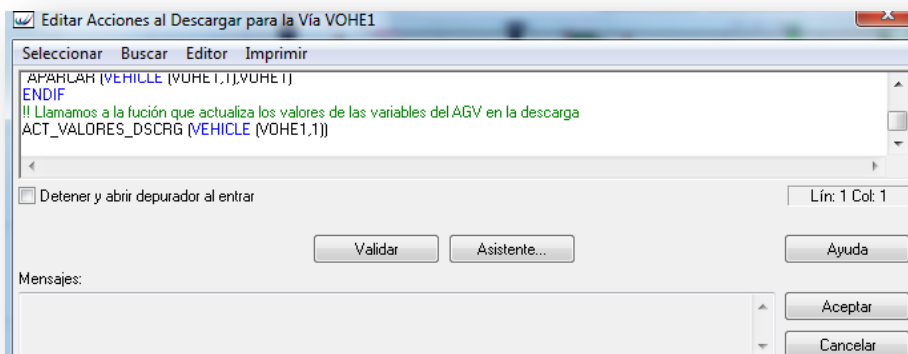


Figura 4.13 Llamada a la función *ACT_VALORES_DSCRG*

En la llamada a la función únicamente se envía un parámetro, el nombre del vehículo que realiza la descarga a través de la función *VEHICLE(track_descarga,posición_vehiculo)* ya predefinida por Witness. La configuración de la función se presenta a continuación (**Figura 4.14**):

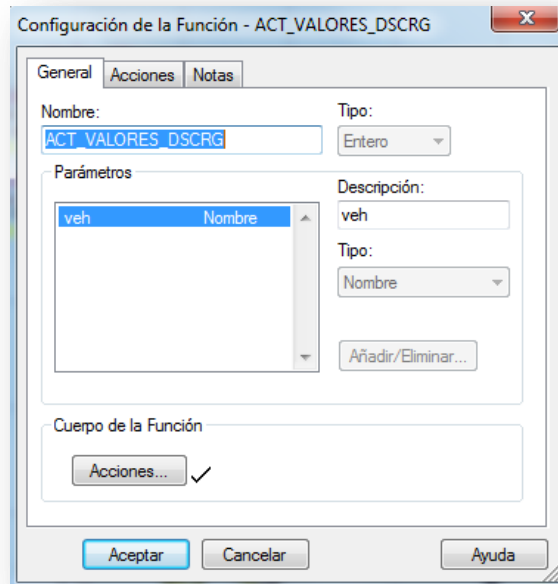


Figura 4.14 Ventana de configuración de la función ACT_VALORES_DSCRG

Se trata de una función de tipo nombre, aunque no devuelve ningún valor al lugar de llamada. El parámetro enviado es de tipo nombre. Se muestra a continuación la configuración del cuerpo de la función (**Figura 4.15**):

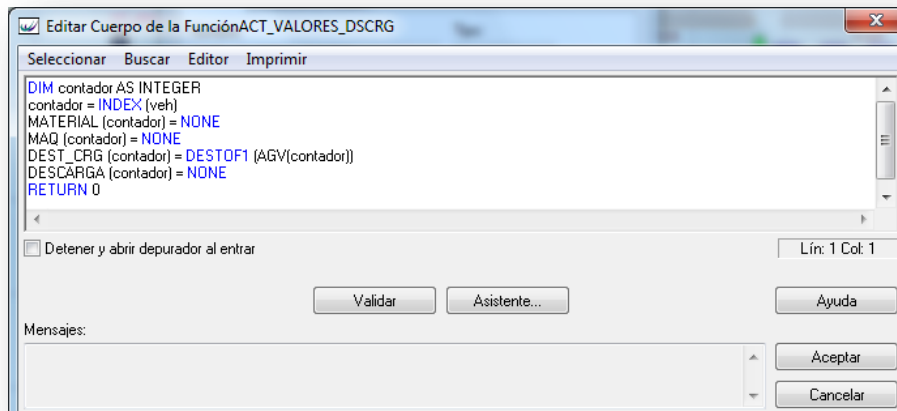


Figura 4.15 Cuerpo de la función ACT_VALORES_DSCRG

En la primera línea de código se define una variable local, de tipo entero, denominada contador. En la segunda línea se le asigna a la variable el valor correspondiente con el índice del vehículo. A continuación se actualiza el valor de las variables de información del vehículo al valor NONE, a excepción de la variable DEST_CRG a la que se asignará el valor almacenado en *DESTOF1(nombre del vehículo)*, correspondiente al destino inmediato del vehículo. Los valores se volverán a actualizar cuando se realice la llamada al carro en la *CENTRALITA*.

Grupo 4: Función APARCAR

A través de esta variable se asigna al carro que realiza la descarga, en caso de no haber pedidos pendientes, el parking donde debe permanecer hasta que se produzca su llamada. La llamada a esta función se realiza en las acciones de descarga de todos los tracks a través de la siguiente expresión (Figura 4.16):

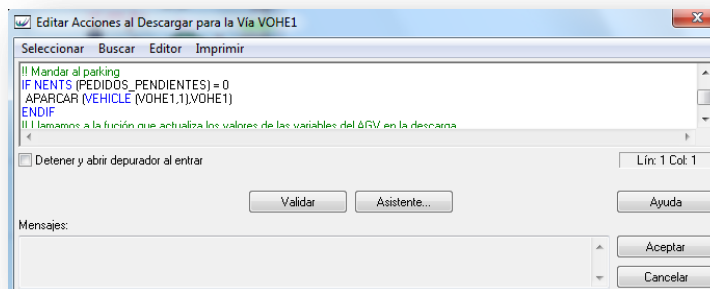


Figura 4.16 Llamada a la función APARCAR

Únicamente en caso de no haber pedidos (*NENTES(PEDIDOS_PENDIENTES)=0*) se procede a la llamada a la función enviando dos parámetros: en primer lugar, el nombre del vehículo a través de la función *VEHICLE(nombre_track,posición_track)* y, en segundo lugar, el nombre del track donde se realiza la descarga. Esta función no devuelve ningún valor al lugar de llamada. La ventana de configuración de la función *APARCAR* es la que aparece en la Figura 4.17:

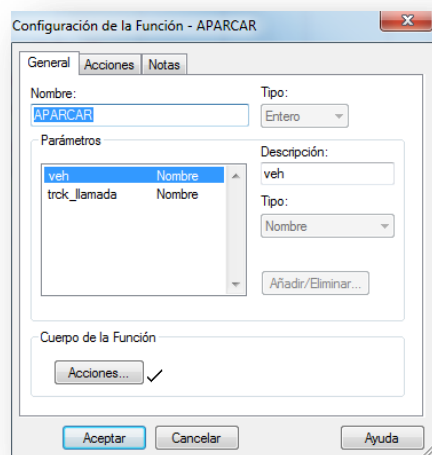


Figura 4.17 Ventana de configuración de la función APARCAR

Se trata de una función tipo nombre, al igual que los parámetros enviados (vehículo y track de descarga). La sintaxis que rige el funcionamiento de la función es la que se presenta a continuación:

```

IF trck_llamada = VOAB OR trck_llamada = VOCB OR trck_llamada = VOCD OR trck_llamada = VOHE1 OR
trck_llamada = VOHE2 OR trck_llamada = VOHG OR trck_llamada = VOHI
IF ISTATE (PRK14) = 1 AND AGV_A_PARK14 = 0
  DESTV veh,PRK14
  AGV_A_PARK14 = 1
ELSEIF ISTATE (PRK13) = 1 AND AGV_A_PARK13 = 0
  DESTV veh,PRK13
  AGV_A_PARK13 = 1
ELSEIF ISTATE (PRK12) = 1 AND AGV_A_PARK12 = 0
  DESTV veh,PRK12
  AGV_A_PARK12 = 1
ELSEIF ISTATE (PRK11) = 1 AND AGV_A_PARK11 = 0
  DESTV veh,PRK11
  AGV_A_PARK11 = 1
ELSEIF ISTATE (PARK22) = 1 AND AGV_A_PARK22 = 0
  DESTV veh,PARK22
  AGV_A_PARK22 = 1
ELSEIF ISTATE (PARK21) = 1 AND AGV_A_PARK21 = 0
  DESTV veh,PARK21
  AGV_A_PARK21 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX5) = 1 AND AGV_A_LOYX5 = 0
  DESTV veh,LOYX5
  AGV_A_LOYX5 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX4) = 1 AND AGV_A_LOYX4 = 0
  DESTV veh,LOYX4
  AGV_A_LOYX4 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX3) = 1 AND AGV_A_LOYX3 = 0
  DESTV veh,LOYX3
  AGV_A_LOYX3 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX2) = 1 AND AGV_A_LOYX2 = 0
  DESTV veh,LOYX2
  AGV_A_LOYX2 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX1) = 1 AND AGV_A_LOYX1 = 0
  DESTV veh,LOYX1
  AGV_A_LOYX1 = 1
ENDIF
ELSE IF ISTATE (LOYX5) = 1 AND AGV_A_LOYX5 = 0
  DESTV veh,LOYX5
  AGV_A_LOYX5 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX4) = 1 AND AGV_A_LOYX4 = 0
  DESTV veh,LOYX4
  AGV_A_LOYX4 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX3) = 1 AND AGV_A_LOYX3 = 0
  DESTV veh,LOYX3
  AGV_A_LOYX3 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX2) = 1 AND AGV_A_LOYX2 = 0
  DESTV veh,LOYX2
  AGV_A_LOYX2 = 1
ELSEIF ISTATE (LOYX1) = 1 AND AGV_A_LOYX1 = 0
  DESTV veh,LOYX1
  AGV_A_LOYX1 = 1
ELSEIF ISTATE (PRK14) = 1 AND AGV_A_PARK14 = 0
  DESTV veh,PRK14
  AGV_A_PARK14 = 1
ELSEIF ISTATE (PRK13) = 1 AND AGV_A_PARK13 = 0
  DESTV veh,PRK13
  AGV_A_PARK13 = 1
ELSEIF ISTATE (PRK12) = 1 AND AGV_A_PARK12 = 0
  DESTV veh,PRK12
  AGV_A_PARK12 = 1
ELSEIF ISTATE (PRK11) = 1 AND AGV_A_PARK11 = 0
  DESTV veh,PRK11
  AGV_A_PARK11 = 1
ELSEIF ISTATE (PARK22) = 1 AND AGV_A_PARK22 = 0
  DESTV veh,PARK22

```

```

AGV_A_PARK22 = 1
ELSEIF ISTATE (PARK21) = 1 AND AGV_A_PARK21 = 0
  DESTV veh,PARK21
  AGV_A_PARK21 = 1
ENDIF
ENDIF
PRINT "ENVIO A PARKING",veh
RETURN 0

```

En primer lugar, se comprueba en qué zona del taller se encuentra el vehículo que ha realizado la descarga. El taller cuenta con dos zonas bien diferenciadas y a través de este código se pretende enviar el vehículo al parking libre más cercano a él. Por tanto, se va comprobando parking por parking si se encuentra libre y si la variable `AGV_A_nombredelparking`, que gobierna si algún carro ya ha sido destinado a él, vale cero.

Una vez comprobado esto se asigna el nuevo destino al carro a través de la función `DESTV nombre_vehículo,track_destino` y se actualiza la variable `AGV_A_nombredelparking` de forma que se bloquee dicho parking y no se pueda enviar dos vehículos al mismo parking. En la penúltima línea de código a través de la sintaxis:

```
PRINT "ENVIO A PARKING",veh
```

se procede a la emisión de un mensaje en la ventana de interacción que informa del vehículo que se está enviando a aparcar. El mensaje presenta la siguiente interface (**Figura 4.18**):

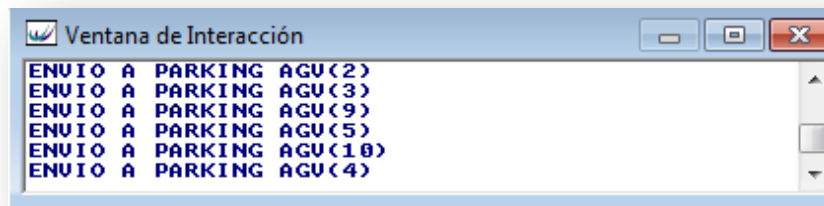


Figura 4.18 Mensaje de envío a parking en la ventana de interacción

Grupo 5: Función `CONTADOR_DSCRGs`

Esta función registra el número de descargas que acumula cada carro a fin de enviar el AGV a cambiar batería en el momento adecuado. La llamada a la función se realiza en cada track en las acciones de descarga, para que contabilice esta nueva descarga. La llamada se realiza a través de la expresión:

```
CONTADOR_DSCRGs (VEHICLE (VOHE1,1))
```

Como se aprecia, tan sólo se envía un único parámetro a la función, el nombre del vehículo que realiza la descarga a través de la función `VEHICLE(nombre_track,posición_track)`. La ventana de configuración de la función se muestra en la **Figura 4.19**:

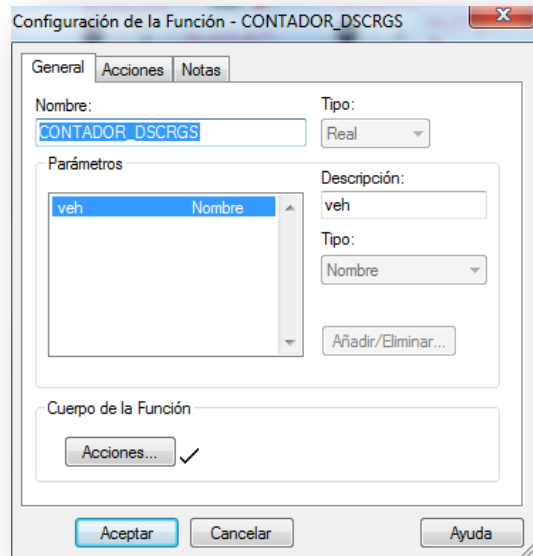


Figura 4.19 Ventana de configuración de la función CONTADOR_DSCRGS

Se trata de una función tipo nombre, al igual que el parámetro que se envía a la función. El cuerpo que rige la lógica de la función es el que sigue (Figura 4.20):

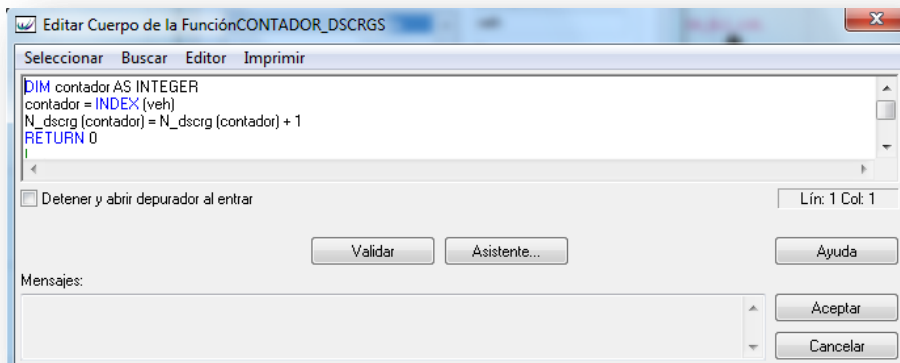


Figura 4.20 Cuerpo de la función CONTADOR_DSCRGS

En la primera línea de código se define una variable local denominada contador de tipo entero. A continuación se le asigna como valor el índice numérico del vehículo que realiza la descarga y se aumenta el valor de la variable que almacena el número de descargas de ese vehículo en uno. Por último se devuelve al lugar de llamada el valor 0.

4.2 Distribuciones

Los tiempos de ciclo de todas las máquinas, exceptuando BL1, CG1_ITM y CG1_TM, no tienen un tiempo fijo y se utilizan una serie de distribuciones para el cálculo del tiempo de ciclo. La nomenclatura de los tiempos de ciclo es la que sigue *TIEMPO_CICLO_nombremáquina_nombreproducto*. La distribución puede tener una forma similar a la que se muestra en la **Figura 4.21**:

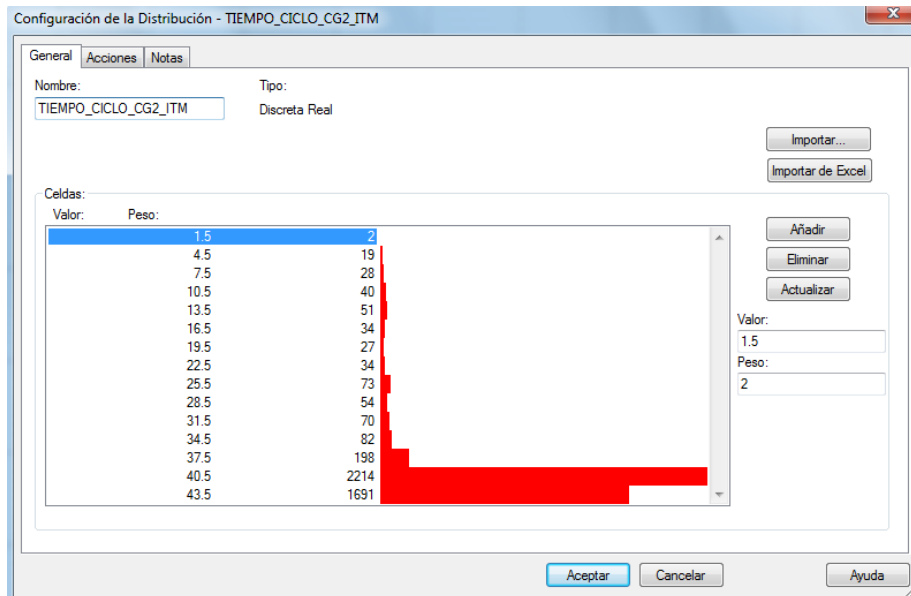


Figura 4.21 Tiempo de ciclo de la máquina CG2_ITM

De esta manera, a cada tiempo de ciclo se le asigna un peso de forma que se le asocia una probabilidad de ocurrencia a cada valor.

4.3 Elementos gráficos

En este apartado se muestra el conjunto de elementos que se utilizan a fin de facilitar y hacer más visual el conjunto de la información que suministra la simulación.

4.3.1 Gráficos de tarta

Se han insertado una serie de gráficos de tarta a fin de representar variables como el porcentaje de utilización de las máquinas, el porcentaje de averías o el porcentaje de esperas. Se utiliza así mismo en la representación de los porcentajes de tiempo referentes al vehículo como pueden ser el porcentaje de tiempo que el vehículo se encuentra cargado, el tiempo que se encuentra bloqueado o el porcentaje disponible. Dichos gráficos se representan de forma similar a como se muestra en la **Figura 4.22**:



Figura 4.22 Gráfico de tarta de la utilización de los vehículos

4.3.2 Series temporales

Se han insertado en el modelo dos series temporales: una de ellas refleja el nivel de stock de cada producto de forma que se estudia su evolución en el tiempo y la otra muestra la evolución del nivel de pedidos en cola. El nivel de stock se representa de la siguiente forma (Figura 4.23):

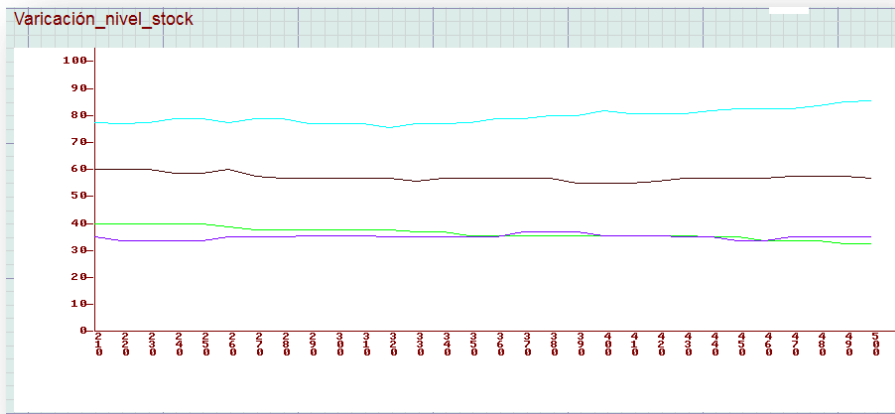


Figura 4.23 Serie temporal del nivel de stock

4.3.3 Histogramas

También se ha insertado en el modelo un histograma a fin de realizar un control del tiempo medio de espera de un pedido en cola, es decir, el tiempo que permanece un pedido en la cola de pedidos pendientes desde que es enviado por una máquina hasta que es asignado a un AGV. Este histograma se muestra en la Figura 4.24:

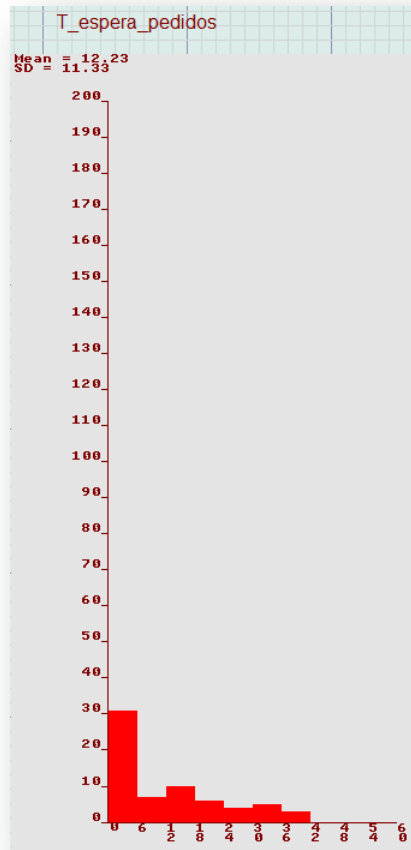


Figura 4.24 Histograma del tiempo de espera de los pedidos

5 Explotación del modelo

En el presente capítulo se procede al estudio de la respuesta del sistema en los diferentes escenarios ficticios objeto de interés. Para ello, es necesario realizar, en primer lugar, la verificación y validación del modelo a fin de comprobar que el modelo construido sigue la lógica programada y que ofrece datos comparables a los ofrecidos por el sistema real.

5.1 Verificación

El cometido de esta etapa es comprobar que no existan errores de programación en el modelo. La fase de verificación es un proceso continuo que se desarrolla dentro de la etapa de concepción del sistema más que tratarse de una etapa en sí misma. Para cada elemento presente en el modelo se comprueba su funcionamiento. Existen varias formas para verificar el comportamiento del sistema: a través del análisis de la traza, provocando el fallo o realizando la simulación de distintos escenarios.

Análisis de la traza.

El sistema permite almacenar todos los eventos que suceden durante la simulación en un archivo de texto *.trc. A través de este archivo pueden detectarse interrupciones no esperadas, flujos de elementos incorrectos, etc. Puede observarse a continuación un ejemplo de traza exportada de la simulación (Figura 5.1):

```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
BLTM entrando al elemento M_ini_BLM desde WORLD
BLTM entrando al elemento M_ini_BLM desde WORLD
BLTM entrando al elemento M_ini_BLM desde WORLD
BLTM entrando al elemento M_ini_BLM desde WORLD
AGV(1) saliendo hacia PRK14
AGV(2) saliendo hacia PRK13
AGV(3) saliendo hacia PRK12
AGV(4) saliendo hacia PRK11
AGV(5) saliendo hacia PARK21
AGV(6) saliendo hacia PARK22
AGV(7) saliendo hacia LOYX1
AGV(8) saliendo hacia LOYX2
AGV(9) saliendo hacia LOYX3
AGV(10) saliendo hacia LOYX4
AGV(11) saliendo hacia LOYX5
0.000 : JVL(s) llegando
JVL saliendo hacia CR_JVL
0.000 : JLBL(s) llegando
JLBL saliendo hacia CR_JLBL
0.000 : PEDIDO(s) llegando
PEDIDO saliendo hacia PEDIDOS_VACIOS
0.000 : BGI(s) llegando
BGI saliendo hacia CR_L4_GIL
0.000 : BVTT(s) llegando
BVTT saliendo hacia CR_L6_NCV
0.000 : BLTT(s) llegando
BLTT saliendo hacia CR_L4_NCL
0.000 : BVGM(s) llegando
BVGM saliendo hacia CR_L2_GIV
0.000 : BVTM(s) llegando
BVTM saliendo hacia CR_L2_NSTV
0.000 : BLTM(s) llegando
BLTM saliendo hacia CR_L2_NSTL
0.000 : PVITM(s) llegando
PVITM saliendo hacia CR_L2_PVITM
0.000 : PLITM(s) llegando
PLITM saliendo hacia CR_L2_PLITM
0.000 : PVI(s) llegando
PVI saliendo hacia CR_L5_PVI
0.000 : PLIGI(s) llegando
PLIGI saliendo hacia CR_L5_PLIGI
0.000 : La máquina M_ini_BVGI está tratando de salir del estado ocupado
BVGI saliendo del elemento M_ini_BVGI hacia SA_BD2_BVGI
0.000 : La máquina M_ini_PLIGI está tratando de salir del estado ocupado
PLIGI saliendo del elemento M_ini_PLIGI hacia SA_BD2_PLIGI
0.000 : La máquina M_ini_BGI está tratando de salir del estado ocupado
BGI saliendo del elemento M_ini_BGI hacia SA_MCI_BGI

```

Figura 5.1 Ejemplo de traza exportada de Witness

También se puede **provocar el fallo** a través de la programación o de la interrupción durante la simulación, a fin de facilitar la detección del modo de fallo del elemento causante. De esta manera se puede comprobar si el funcionamiento del sistema es acorde a lo esperado.

La **simulación de distintos escenarios** permite comprobar la no relación de unas variables con otras (por ejemplo, no existe relación entre el tiempo de ciclo de las máquinas y el número de vehículos) o verificar la correcta relación entre ellas (por ejemplo, un aumento del número de vehículos se traduce en una disminución del tiempo de espera de los pedidos en cola).

Existen otras técnicas de verificación como son el desarrollo del modelo, escritura y depuración del programa por módulos o subprogramas. De esta forma, la localización de los fallos se hace de forma rápida, además de facilitar el aumento del detalle de forma gradual a través de la inserción de módulos más complejos. En grandes modelos conviene que no sea una única persona la que compruebe la programación, dado que el trabajo rutinario y tedioso provoca multitud de fallos en la escritura. La **animación** ayuda de manera significativa en la comprensión de los flujos del sistema así como en su comprobación.

5.2 Validación

En esta etapa se comprueba la exactitud del modelo frente al sistema real. Esto se realiza a través de la comparativa entre los datos reales o históricos y las predicciones que realiza el modelo. Fruto de esta comparativa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o la adición de datos extra. Para proceder a la validación del sistema se ejecuta una primera simulación con los datos iniciales de partida. Se comparan los resultados obtenidos de la simulación con los datos reales del sistema teniendo en cuenta una serie de hipótesis de partida:

- Los porcentajes de funcionamiento de las máquinas y las tasas de avería se han obtenido de un histórico mensual promediado a 24 horas.
- No se incluyen paradas por cambio de dimensión en las máquinas.
- Estas paradas llevan asociadas una serie de movimientos de evacuación de las máquinas de confección/terminación a medio vaciar que no se consideran en la instalación.
- Fruto de la convivencia entre el personal de la planta y los AGV se producen una serie de paradas de seguridad por parte de los vehículos que retrasan sus operaciones. Estas interferencias no se han tenido en cuenta debido a ser mínimas y por tanto despreciables.
- Los productos llevan asociados un tiempo de caducidad de forma que tienen un intervalo de tiempo óptimo para su utilización; de esta forma algunos pedidos tendrían prioridad frente a otros. Dado que sólo un número reducido de productos cuentan con esta fecha de caducidad no se ha tenido en cuenta esta particularidad en la simulación.
- No se ha considerado en el modelo la relación del ciclo de frecuencia entre las máquinas MC1, MC2 y MC3 con el resto de máquina de la confección/terminación.
- No se incluye en la simulación el cierre de la instalación debido a problemas externos (faltas de energía u otros eventos excepcionales).

Dato que el principal objetivo de una simulación es su fidelidad a fin de servir como base en la toma de decisiones, ésta resulta ser una etapa vital. La dificultad para validar un modelo depende de la

complejidad del sistema a simular; resultará incluso más difícil validar un prototipo dado que aún no se ha realizado y no se cuenta con un gran histórico de datos.

Pese a tratar de minimizar el número de simplificaciones durante la implementación del modelo, nunca llegará a obtenerse un modelo completamente válido. Una mayor complejidad del modelo a fin de acercarlo a la realidad llevará asociados unos gastos de tiempo, dinero y recursos que darán lugar a una mayor aproximación a la realidad pero hasta un punto en el que la inversión realizada no es justificada por los resultados obtenidos. Existen una serie de técnicas de validación de modelos que se exponen a continuación:

5.2.1 Comparación simulación-estimación

A fin de dar validez al modelo se ejecuta la simulación de un escenario de referencia. Se procede después a la comparación entre los datos obtenidos mediante simulación y los obtenidos a través de un estudio de organización realizado sobre la instalación. Por razones de confidencialidad se ha omitido la incursión de datos en la presente memoria.

Tabla 5.1 Comparación simulación-estimación

Concepto	Simulación	Estimación	Diferencia
Número de movimientos diarios			
Producción diaria máquina MC1 producto BL			
TRS máquina MC2			
Porcentaje avería máquina MC3			
Tiempo medio de movimiento			

Los valores obtenidos por ambos métodos únicamente son comparables en términos globales. Por tanto, se concluye que el modelo es lo suficientemente fiel al sistema real como para considerarse válido. No obstante, no debe olvidarse que la simulación es una herramienta de ayuda en la toma de decisiones y no la base sobre la que se toman las decisiones; por tanto, todos los estudios de simulación deben ir acompañados de otra serie de estudios que corroboren los resultados obtenidos por ésta.

5.2.2 Comparación de las salidas del modelo con el sistema real

Si se cuenta con datos suficientes suele ser el método más utilizado, dado que a través de ciertas técnicas estadísticas es posible comprobar si los resultados obtenidos se consideran semejantes o no.

5.2.3 Test de Turing

Creado por Alan Turing, se basa en la comparativa de resultados por parte de un experto de los datos obtenidos en la simulación y los datos reales. Si el experto no es capaz de distinguir qué datos pertenecen a la simulación y cuáles al histórico real se considera al modelo creíble. Este test requiere de la realización de una serie de análisis estadísticos a fin de determinar si las diferencias entre los datos reales y aquellos frutos de la simulación son estadísticamente significativos.

5.2.4 Método Delphi

Se trata de un método con una gran cantidad de aplicaciones. Su metodología consiste en la realización de una serie de cuestionarios a un grupo de expertos en la materia a fin de llegar a un

consenso en sus respuestas. En este proyecto los expertos son el director y los usuarios del sistema y el cuestionario versa sobre el comportamiento del modelo ante diferentes situaciones de funcionamiento.

5.2.5 Validación mediante el comportamiento en extremos

En determinadas ocasiones resulta más sencillo obtener resultados en condiciones extremas que en situaciones normales. Este método utiliza la comparativa de resultados o la consulta de expertos en dichas condiciones extremas. Si en los extremos de funcionamiento la simulación resulta válida puede considerarse como creíble al modelo. Si bien esta validación no es total, salvo que se trate de un sistema con un comportamiento lineal o con una tendencia conocida.

5.3 Vías de explotación y experimentación

En este apartado se exponen los diferentes escenarios a los que se ha sometido la simulación a fin de estudiar su respuesta. Los resultados son suministrados directamente por el propio programa en la categoría de estadísticas de cada elemento. Ha de destacarse que estos datos se encuentran modificados por motivos de seguridad. En el siguiente apartado *Interpretación* se expondrán las conclusiones, en este apartado simplemente se mostrarán los resultados obtenidos.

Cabe destacar lo siguiente: el porcentaje ocioso representa el tiempo que el vehículo se encuentra moviéndose sin pedido asignado más el tiempo que el vehículo pasa en el parking estacionado. El porcentaje demandado corresponde al porcentaje de tiempo que el vehículo se encuentra demandado, es decir, viajando en vacío hacia la zona de carga del pedido que le ha sido asignado. El porcentaje de transferencia se corresponde con el porcentaje del tiempo que el vehículo ha dedicado en la carga y descarga de material. El porcentaje cargado corresponde con el porcentaje de tiempo que un vehículo ha estado viajando en lleno. El porcentaje de parada corresponde con el tiempo que el vehículo ha estado parado por cambio de batería. El porcentaje de bloqueado corresponde al tiempo que el vehículo ha estado bloqueado, las causas pueden ser dos, la primera por avería del vehículo y la segunda por el propio código de circulación de las vías, zonas donde no cabe más de un vehículo y debe esperarse a que desaloje la vía. Debe señalarse que el porcentaje ocioso, el de transferencia, el de carga y el porcentaje de paro suman el 100%, el porcentaje bloqueado es medido de forma separada.

5.3.1 Disminución del número de vehículos

Se ha experimentado a través de una disminución secuencial del número de vehículos a fin de estudiar el sobredimensionado de su capacidad. Se busca encontrar el número mínimo de vehículos con los que el sistema funcione a ritmo normal, es decir, no se produce saturación del sistema ni parada de máquinas por falta de producto, a fin de prever las consecuencias que supondría una avería de los vehículos. Para cada número de AGV considerado se han realizado tres experimentos. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Nº AGV:11

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (**Tabla 5.2** y **Tabla 5.3**):

Tabla 5.2 Resultado experimento 1 con 11 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	34,33	65,67	10,29	28,88	0,19	8,42	24.272
	Semilla		333	Tiempo de simulación		43.200	

En la tabla se muestran los porcentajes de distintos estados del vehículo como son el tiempo que ha estado disponible (no realizando un pedido), demandado (realizando un pedido pero descargado), transferencia (el tiempo durante el cual ha estado cargando o descargando), el porcentaje de tiempo parado (por cambio de batería), bloqueado (ya sea por interferencia con otros vehículos o por avería) y el número de cargas que ha realizado el vehículo.

Tabla 5.3 Resultado de experimento 1 con 11 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	5,59	39,01	12,85

En esta tabla se observa: el número máximo de pedidos que ha habido en el buffer de pedidos pendientes, el tiempo medio de espera de los pedidos en cola, el tiempo máximo del pedido en cola y el tiempo medio de movimiento de un vehículo a la hora de satisfacer un pedido.

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.4 y Tabla 5.5):

Tabla 5.4 Resultado de experimento 2 con 11 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	33	26,94	10,48	29,39	0,2	8,55	24.723
	Semilla		951	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.5 Resultado de experimento 2 con 11 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	4,99	39,01	12,87

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.6 y Tabla 5.7):

Tabla 5.6 Resultado de experimento 3 con 11 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	33,11	27,01	10,45	29,23	0,2	8,43	24.659
	Semilla		753	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.7 Resultado de experimento 3 con 11 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	5,39	39,01	12,8

Nº AGV: 10

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.8 y Tabla 5.9):

Tabla 5.8 Resultado de experimento 1 con 10 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	27,29	28,94	11,42	32,14	0,22	8,94	24.489
	Semilla		333	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.9 Resultado de experimento 1 con 10 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	8,05	43,49	12,82

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.10 y Tabla 5.11):

Tabla 5.10 Resultado de experimento 2 con 10 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	27,37	28,89	11,4	32,04	0,21	8,82	24.430
	Semilla		777	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.11 Resultado de experimento 2 con 10 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	7,89	43,49	12,84

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.12 y Tabla 5.13):

Tabla 5.12 Resultado de experimento 3 con 10 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	27,11	29,06	11,42	32,19	0,22	8,88	24.477
	Semilla		753	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.13 Resultado de experimento 3 con 10 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	8,92	43,49	12,86

Nº AGV:9

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.14 y Tabla 5.15):

Tabla 5.14 Resultado de experimento 1 con 9 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	18,35	32,31	12,91	36,18	0,24	9,49	24.921
	Semilla		357	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.15 Resultado de experimento 1 con 9 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	46	17,29	70,71	12,73

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.16 y Tabla 5.17):

Tabla 5.16 Resultado de experimento 2 con 9 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	19,14	32,16	12,75	35,71	0,24	9,41	24.610
	Semilla		951	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.17 Resultado de experimento 2 con 9 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	47	16,77	68,35	12,77

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados (Tabla 5.18 y Tabla 5.19):

Tabla 5.18 Resultado de experimento 3 con 9 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	19,89	31,69	12,7	35,48	0,24	9,3	24.501
	Semilla		555	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.19 Resultado de experimento 3 con 9 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	45	15,96	64,37	12,71

Nº AGV:8

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.20 ,Tabla 5.21 y Figura 5.2):

Tabla 5.20 Resultado de experimento 1 con 8 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	10,95	35,3	14,08	39,45	0,23	10	4.026
	Semilla		555	Tiempo de simulación		7.200	

Tabla 5.21 Resultado de experimento 1 con 8 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	56	30,49	96,88	12,74

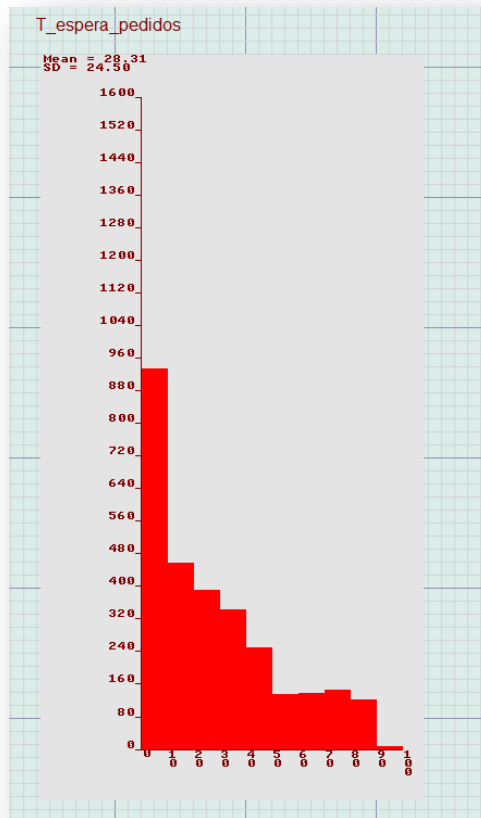


Figura 5.2 Resultado de experimento 1 con 8 AGV III

En la figura se observa un histograma del tiempo medio de espera de los pedidos en el buffer de *pedidos_pendientes*.

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados (Tabla 5.22 y Tabla 5.23):

Tabla 5.22 Resultado de experimento 2 con 8 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	10,05	35,56	14,19	39,96	0,24	10,11	4.058
	Semilla		777	Tiempo de simulación		7.200	

Tabla 5.23 Resultado de experimento 2 con 8 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	53	24,04	83,23	12,77

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados (Tabla 5.24 y Tabla 5.25):

Tabla 5.24 Resultado de experimento 3 con 8 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	7,25	36,67	14,52	41,32	0,24	10,34	4.153
	Semilla		753	Tiempo de simulación		7.200	

Tabla 5.25 Resultado de experimento 3 con 8 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	57	31,69	98,08	12,86

5.3.2 Aumento del número de vehículos

Se procede a continuación a la exposición de los resultados obtenidos a través de la inserción de un vehículo (doce en total) en la flota de vehículos que operan actualmente en la fábrica. En un primer momento es de suponer que a mayor número de vehículos menor será el tiempo de respuesta y, por tanto, habrá un mayor rendimiento de las máquinas.

Nº AGV:12

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.26 y Tabla 5.27):

Tabla 5.26 Resultado de experimento 1 con 12 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	38,46	25,38	9,42	26,58	0,16	8,43	4.043
	Semilla		753	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.27 Resultado de experimento 1 con 12 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	4,48	37,1	12,91

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.28 y Tabla 5.29):

Tabla 5.28 Resultado de experimento 2 con 12 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	40,60	24,09	9,16	25,97	0,17	6,53	7.856
	Semilla		951	Tiempo de simulación		14.400	

Tabla 5.29 Resultado de experimento 2 con 12 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	4,91	35,53	13,07

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.30 y Tabla 5.31):

Tabla 5.30 Resultado de experimento 3 con 12 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	38,04	25,14	9,68	26,96	0,17	6,39	8.302
	Semilla		777	Tiempo de simulación		14.400	

Tabla 5.31 Resultado de experimento 3 con 12 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	39	4,55	35,53	12,90

5.3.3 Modificación de la velocidad de los vehículos

A continuación se muestran los resultados obtenidos a través de cambios en la velocidad de los vehículos. En un primer instante es de suponer que a mayor velocidad menor tiempo de recorrido y menor tiempo de espera de los pedidos en cola. Se han estudiado los resultados con la velocidad actual, con un aumento de la velocidad de un 10%, con un aumento del 25% y con una reducción del 10%, todo ello respecto a la velocidad actual.

Velocidad actual

Se han realizado diferentes experimentos a través de la variación del valor de la semilla.

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados (Tabla 5.32):

Tabla 5.32 Resultado experimento 1 con velocidad actual

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	33	67	24.723	4,99	12,88
10	43.200	29,1	70,9	23.952	7,94	12,79
9	43.200	19,14	80,86	24.610	16,77	12,77

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.33**):

Tabla 5.33 Resultado experimento 2 con velocidad actual

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	34,64	65,36	24.007	5,41	12,94
10	43.200	27,37	72,36	24.430	7,90	12,84
9	43.200	18,3	81,7	24.962	17,04	12,73

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.34**):

Tabla 5.34 Resultado de experimento 3 con velocidad actual

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	34,3	65,7	24.091	5,55	12,96
10	43.200	27,29	72,71	24.489	8,05	12,83
9	43.200	18,62	81,38	24.903	17,40	12,71

Aumento de un 10% de la velocidad

Se procede a la exposición de los resultados obtenidos a través del aumento de la velocidad un 10%.

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.35**):

Tabla 5.35 Resultado experimento 1 con aumento de velocidad un 10%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	35,74	64,26	23.691	5,98	12,90
10	43.200	28,55	71,45	24.092	7,95	12,81
9	43.200	19,39	80,61	24.540	17,03	12,77

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.36**):

Tabla 5.36 Resultado experimento 2 con aumento de velocidad un 10%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	33,6	66,4	24.527	5,41	12,86
10	43.200	26,67	73,33	24.706	8,04	12,82
9	43.200	17,85	82,15	25.087	15,59	12,73

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.37**):

Tabla 5.37 Resultado experimento 3 con aumento de velocidad un 10%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	34,58	65,42	24.149	6,01	12,87
10	43.200	28,25	71,75	24.072	8,20	12,88
9	43.200	22,42	77,58	23.783	12,23	12,68

Aumento 25% de la velocidad

Se procede a la exposición de los resultados obtenidos a través del aumento de la velocidad un 25% respecto a la actual.

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.38**):

Tabla 5.38 Resultado de experimento 1 con aumento de velocidad un 25%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	33,34	66,66	24.486	5,86	12,94
10	43.200	28,58	71,42	24.150	7,09	12,77
9	43.200	20,6	79,4	24.231	15,50	12,74

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.39**):

Tabla 5.39 Resultado de experimento 2 con aumento de velocidad un 25%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	34,1	65,9	24.294	6,02	12,89
10	43.200	27,09	72,91	24.430	11,08	12,89
9	43.200	21,42	78,58	24.019	12,72	12,72

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.40**):

Tabla 5.40 Resultado de experimento 3 con aumento de velocidad un 25%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	32,99	67,01	24.657	5,62	12,91
10	43.200	27,83	72,17	24.367	7,95	12,79
9	43.200	21	79	24.017	16,71	12,79

Dado que se observa que con una flota de nueve vehículos se mejoran los tiempos de servicio y se cuenta con una disponibilidad suficiente se procede al estudio de la respuesta del sistema con ocho vehículos. Estos han sido los resultados obtenidos (**Tabla 5.41**):

Tabla 5.41 Resultado de aumento de velocidad un 25% con 8 AGV

Experimento	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
1	43.200	6,99	93,01	2.499	38,05	12,86
2	43.200	7,06	92,94	2.487	36,61	12,92
3	43.200	7,28	92,72	2.473	29,86	12,96

Reducción de un 10% de la velocidad

Se procede a la exposición de los resultados obtenidos a través de la reducción de la velocidad un 10% respecto a la actual.

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.42**):

Tabla 5.42 Resultado de experimento 1 con reducción de la velocidad un 10%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	36,69	63,31	23.072	4,86	13,04
10	43.200	27,61	72,39	24.464	7,40	12,78
9	43.200	20,3	79,7	24.306	14,46	12,75

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.43**):

Tabla 5.43 Resultado de experimento 2 con reducción de la velocidad un 10%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	34,91	65,09	23.869	5,82	12,96
10	43.200	28,46	71,54	24.180	8,27	12,78
9	43.200	19,28	80,72	24.583	15,35	12,77

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados (**Tabla 5.44**):

Tabla 5.44 Resultado de experimento 3 con reducción de la velocidad un 10%

Nº AGV	Tiempo simulación	% libre	% ocupado	Nº pedidos atendidos	Tiempo medio espera	Tiempo medio movimiento
11	43.200	33,88	66,12	24.367	5,63	12,89
10	43.200	28	72	24.264	9,28	12,82
9	43.200	18,56	81,44	24.839	18,56	12,75

5.3.4 Adición de nuevas máquinas

En este escenario se incorporan dos nuevas máquinas a fin de comprobar la capacidad del sistema de transporte: BD5 y BA3. Veamos cada una de ellas en detalle.

BA3

Se prevé la inserción de una nueva máquina a fin de mejorar la producción. La nueva máquina tiene las siguientes características (**Tabla 5.45**):

Tabla 5.45 Características máquina BA3

Máquina	Producto entrada 1	Producto entrada 2	Intercalador entrada 1	Producto salida 1	Producto salida 2	Intercalador salida 1
18	-	BLTM	PVITM	-	BVTM	PLITM

Tiene un funcionamiento muy similar a las otras máquinas BA: trabaja con los mismos productos, cada uno con un tiempo de ciclo pero diferentes al del resto del conjunto de máquinas BA. Su porcentaje de averías es también diferente, tiene un peor rendimiento que las demás.

BD5

Se trata de una máquina que ya existe en el taller pero que su abastecimiento de productos es gestionado de forma manual. El objetivo es incorporar el transporte de los materiales que usa esta máquina a la carga de trabajo de los AGV a fin de comprobar si es capaz de soportar el aumento de pedidos. Esta máquina procesa un único producto. Las características de la máquina son las siguientes (**Tabla 5.46**):

Tabla 5.46 Características de la máquina BD5

Máquina	Producto entrada 1	Producto entrada 2	Intercalador entrada 1	Producto salida 1	Producto salida 2	Intercalador salida 1
19	PVB74	-	-	PLB74	-	-

Este nuevo producto que sirve como alimento a la máquina BD5 es generado por las máquinas CG1 y CG2 y, por tanto, se ha tenido que realizar alguna modificación sobre ellas.

Adición de BD5 y BA3

Se procede ahora al estudio de la respuesta del sistema de transporte con la inclusión de ambas máquinas. Se expone a continuación un mapa donde se localiza la situación de las nuevas máquinas (**Figura 5.3**) y los resultados obtenidos en los diferentes experimentos.

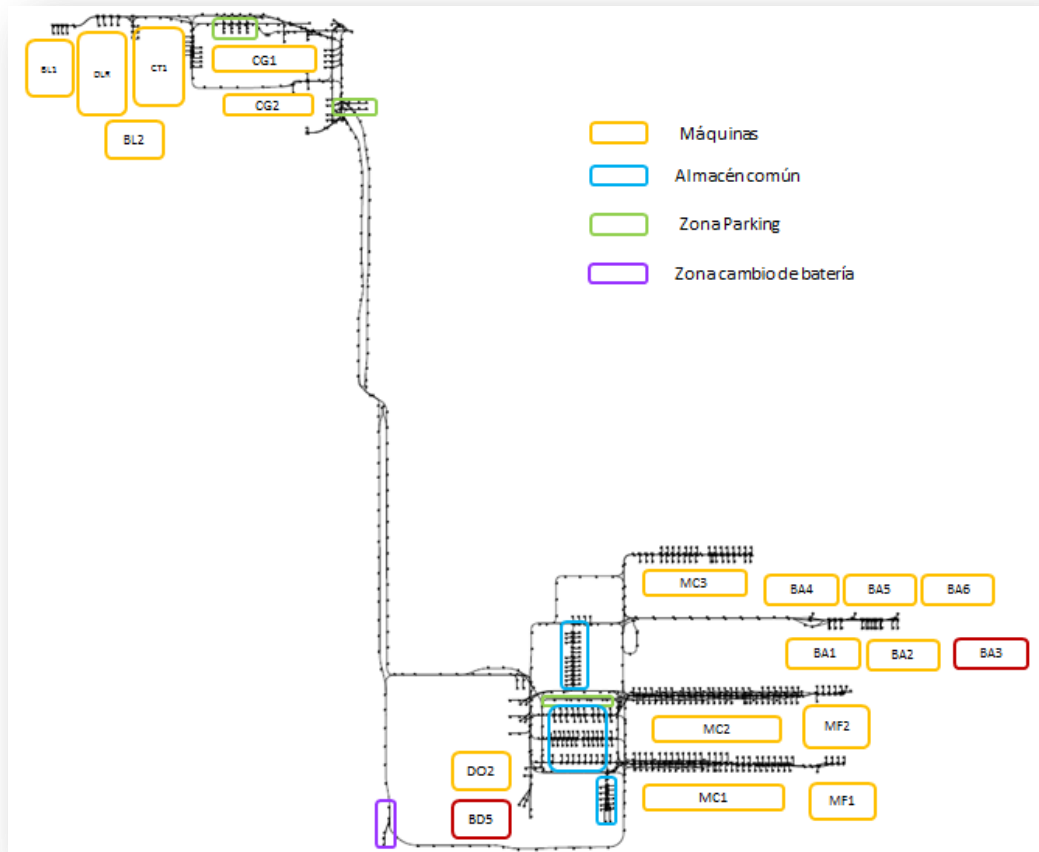


Figura 5.3 Localización de las nuevas máquinas

Nº AGV:11

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.47 y Tabla 5.48):

Tabla 5.47 Resultado experimento 1 adición máquinas I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	27,61	29,19	11,20	31,78	0,22	9,41	26.424
	Semilla		777	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.48 Resultado experimento 1 adición máquinas II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	44	8,36	45,27	13,02

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.49 y Tabla 5.50):

Tabla 5.49 Resultado experimento 2 adición máquinas I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	26,97	29,47	11,32	32,02	0,22	9,31	26.694
	Semilla		555	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.50 Resultado experimento 2 adición máquinas II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	44	8,48	47,53	13,00

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.51 y Tabla 5.52):

Tabla 5.51 Resultado experimento 3 adición máquinas I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	26,68	29,38	11,39	32,32	0,22	9,51	26.870
	Semilla		951	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.52 Resultado experimento 3 adición máquinas II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	44	7,20	45,27	12,97

Se comprueba que el sistema cuenta con la capacidad suficiente para soportar este aumento de la demanda con los once vehículos que trabajan actualmente.

5.3.5 Disminución del número de vehículos + nuevas máquinas

En este escenario se procede al estudio del número óptimo de vehículos en un sistema que cuenta con la incorporación de las dos máquinas anteriormente mencionadas (BA3 y BD5). En el apartado anterior se han obtenido esos resultados trabajando con once vehículos; se procede ahora a una disminución progresiva de la flota para determinar el número óptimo.

Nº AGV:10

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.53 y Tabla 5.54):

Tabla 5.53 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 10 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	19,31	32,12	12,66	35,66	0,25	9,75	27.150
	Semilla		777	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.54 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 10 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	44	12,6	55,51	12,84

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.55 y Tabla 5.56):

Tabla 5.55 Resultado experimento 2 adición nuevas máquinas y 10 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	21,05	31,44	12,39	34,88	0,24	9,71	26.557
	Semilla		555	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.56 Resultado experimento 2 adición de nuevas máquinas y 10 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	44	14,08	58,71	12,84

Experimento 3

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.57 y Tabla 5.58):

Tabla 5.57 Resultado experimento 3 adición nuevas máquinas y 10 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	21,63	31,27	12,27	34,59	0,24	9,67	26.312
	Semilla		951	Tiempo de simulación		43.200	

Tabla 5.58 Resultado experimento 3 adición nuevas máquinas y 10 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	44	11,57	61,58	12,87

Nº AGV:9

Experimento 1

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.59 y Tabla 5.60):

Tabla 5.59 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 9 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	10,4	35,76	13,96	39,61	0,26	10,72	8.982
	Semilla		951	Tiempo de simulación		14.400	

Tabla 5.60 Resultado experimento 1 adición nuevas máquinas y 9 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	53	29,04	80,59	12,93

Experimento 2

Se muestran a continuación los resultados obtenidos (Tabla 5.61 y Tabla 5.62):

Tabla 5.61 Resultado experimento 2 adición nuevas máquinas y 9 AGV I

Nombre	% Disponible	% Demand.	% Transf.	% Cargado	% Parado	% Bloq.	Cargas
AGV	4.66	38,84	14,54	41,82	0,14	11,69	934
	Semilla		555	Tiempo de simulación		1.440	

Tabla 5.62 Resultado experimento 2 adición nuevas máquinas y 9 AGV II

Nombre	Nº max pedidos pts	Tiempo medio de espera	Tiempo máximo de espera	Tiempo medio de movimiento
Pedidos pendientes	52	38,83	77,89	13,23

5.3.6 Límites del sistema

En este experimento se ha aumentado el rendimiento de las máquinas de confección terminación y, si fuera necesario, el rendimiento del grupo de preparación, a fin de establecer en qué momento se satura el sistema de transporte. En un primer momento, como se ha visto antes, el sistema de once vehículos funciona adecuadamente y sin saturación. A fin de mejorar la producción de la fábrica se mejora el rendimiento de las máquinas MC1, MC2 y MC3 un 10% a través de la reducción de su porcentaje de averías disminuyendo la media del tiempo de parada por avería. A través de la simulación de un mes se comprueba que la máquina DO2 no es capaz de satisfacer el aumento de producción demandado por las máquinas MC1, MC2 y MC3 y por ello se realiza una mejora en su tiempo de ciclo de un 10%.

Se comprueba que esta mejora del 10% en la máquina DO2 es excesiva y que las máquinas MC1, MC2 y MC3 no precisan de tanto material. Por ello, se rebaja la mejora hasta únicamente un 4% de mejora del tiempo de ciclo de la máquina DO2. Se comprueba que con estos valores el sistema se encuentra en equilibrio y contamos con una disponibilidad de los AGV del 24% (no debe olvidarse el margen del 15% que se deja para aquellos movimientos que no se han simulado). Se observa que aún hay capacidad de mejora en las máquinas dado que el sistema AGV aún cuenta con disponibilidad suficiente; por ello, se realiza una mejora del 5% en su TRS en todas las máquinas del taller a través de la reducción de la media del tiempo de parada en las averías tipo pnn. Se obtiene una disponibilidad de AGV del 20,76%, de manera que aún tenemos un pequeño margen de mejora.

Se hace una mejora global de todas las máquinas otro 5% a través de la reducción del porcentaje de averías y se obtiene una disponibilidad del vehículo del 18,87%; sin embargo se comprueba que la máquina DO2 no es capaz de abastecer la demanda. Con esto podría suponerse que la máquina DO2 necesita una reducción del tiempo de ciclo o una mejora del TRS sin embargo se comprueba que la máquina cuenta con una disponibilidad del 10%, es decir, no hay suficiente producto de la DO2 y sin

embargo hay espacios de tiempo donde la DO2 no produce. En las series temporales del nivel de stocks y de número de pedidos pendientes (**Figura 5.4**) puede observarse lo siguiente:

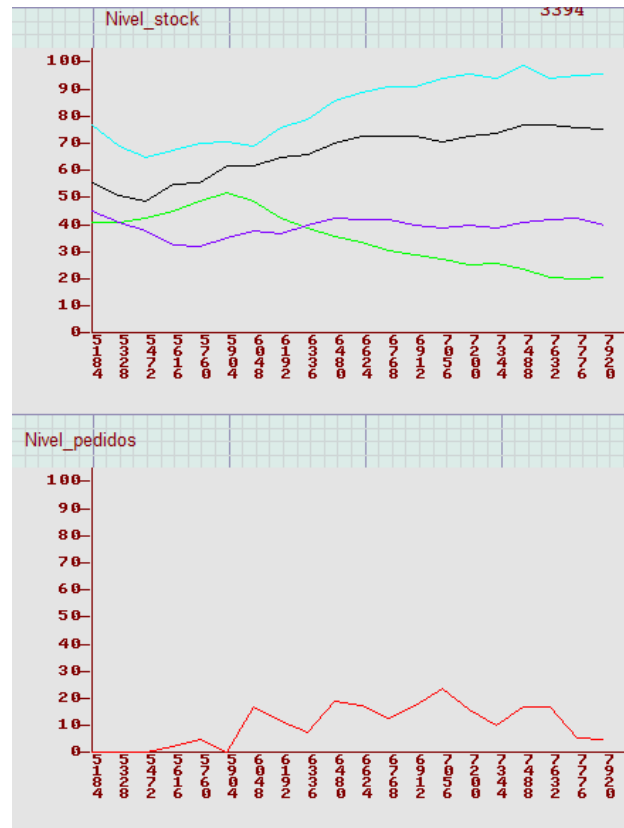


Figura 5.4 Gráfico del nivel de stock y del nivel de pedidos I

Lo que se observa es que con un nivel de pedidos pendientes bajo la máquina DO2 es capaz de recuperarse (línea verde); es decir, se llega al nivel mínimo de stock, se produce el arranque de la máquina, se alcanza el nivel superior y la máquina para. Pero en el momento en que la máquina tiene que volver a arrancar hay una cantidad de pedidos pendientes elevada de forma que la máquina DO2 no es capaz de volver a recuperar el nivel de stock necesario como se observa en la siguiente gráfica (**Figura 5.5**), registrada 300 minutos después de la gráfica anterior:

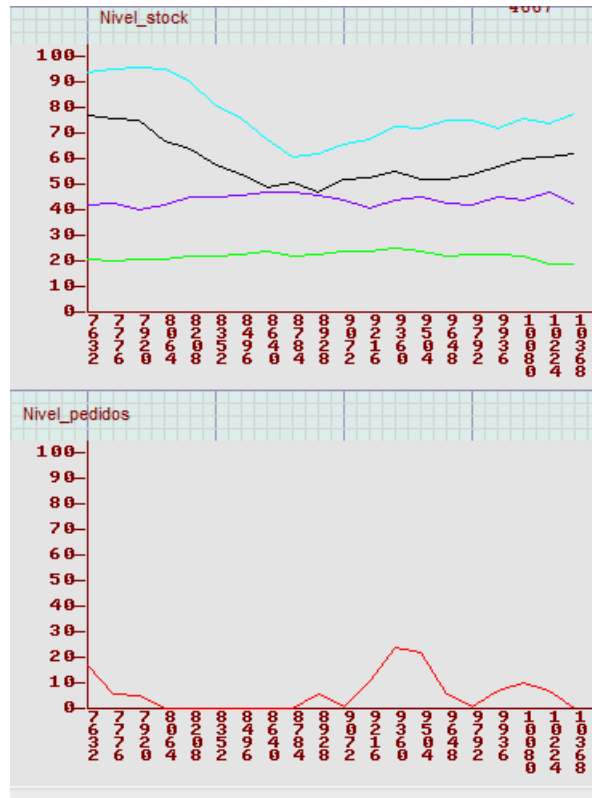


Figura 5.5 Gráfico del nivel de stock y del nivel de pedidos II

Se observa que el nivel del producto generado por la máquina DO2 (línea verde) se mantiene bajo demasiado tiempo. Esto se produce, no debido a que la máquina no tenga el rendimiento adecuado, porque se comprueba que ante un número bajo de pedidos la máquina es capaz de remontar el nivel de stock, si no a que esta máquina cuenta con un solo puesto de aprovisionamiento y otro puesto de evacuación. De esta manera, cuando la máquina consume el producto del puesto de aprovisionamiento y lo evacúa no tiene otro producto con el que ir trabajando y en momentos determinados tiene que pararse por falta de material. En el histograma que registra el tiempo de espera de los pedidos en cola (**Figura 5.6**) se observa que la distribución del tiempo medio de espera es muy plana, es decir, existen muchos pedidos que se retienen en la cola demasiado tiempo superando los tiempos de ciclo de algunas máquinas de forma que se produce la parada de éstas.

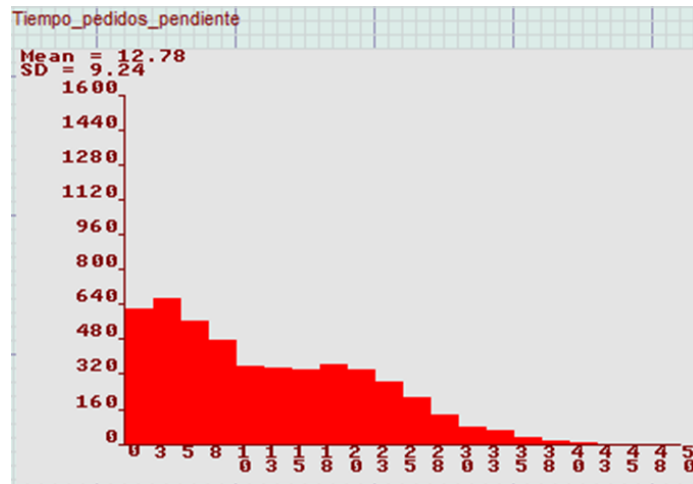


Figura 5.6 Histograma de pedidos I

Aunque el sistema de transporte cuenta con una disponibilidad media suficiente, en momentos puntuales no es capaz de suministrar el producto a tiempo de forma que se produce la parada de la máquina DO2. Para el correcto funcionamiento del sistema en estas condiciones debería establecerse una prioridad de los pedidos de la máquina DO2 frente a los demás. Se observa, por tanto, que con este rendimiento de las máquinas no se puede trabajar de forma que reducimos el rendimiento de las máquinas un 3% a través del aumento del porcentaje de avería. Se obtienen el siguiente gráfico (Figura 5.7):

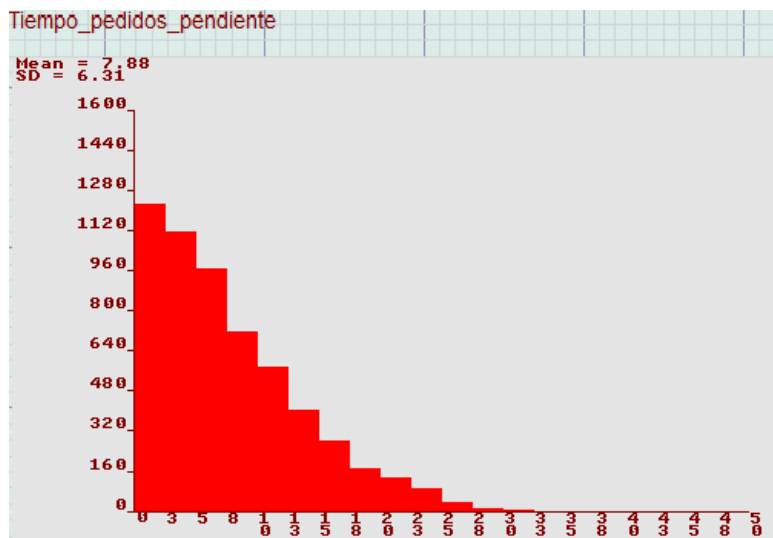


Figura 5.7 Histograma de pedidos II

Se observa que en este caso la gran mayoría de los tiempos de espera de los productos pasan entre cero y ocho minutos en la cola de espera, un tiempo bastante menor al tiempo de ciclo de las máquinas. Si bien el tiempo de suministro desde que se realiza el pedido hasta que se recibe no es únicamente el tiempo de espera en la cola de pedidos, debe tenerse en cuenta el tiempo de movimiento. Con una media de tiempo de espera de 7,88 minutos y un tiempo medio de movimiento de 11,56 minutos, en total un tiempo de aprovisionamiento de 19,44 minutos se comprueba que es

menor que el tiempo de ciclo de las máquinas y por tanto no hay riesgo de parada por falta de material. Como resumen, se ha realizado una mejora de la producción del 17% y se ha comprobado que se ha llegado a los límites del sistema de transporte AGV.

Nota:

$$\text{Tiempo medio de espera} = \frac{\text{Lead time medio} \times \text{número pedidos}}{\text{contador}}$$

$$\text{Tiempo medio de movimiento} = \frac{\text{tiempo simulado} \times (1 - \text{disponibilidad}) \times \text{número vehículos}}{\text{número de movimientos}}$$

Contador corresponde a una variable del sistema que contabiliza el número de pedidos no inmediatos, es decir, que permanecen cierto tiempo en la cola de pedidos.

5.4 Interpretación

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos de la experimentación realizada en el apartado previo.

Disminución del número de vehículos

Se ha comprobado que ante una disminución del número de vehículos se produce una reducción de su disponibilidad junto con un aumento del tiempo de espera de los pedidos en cola. Se ha realizado una disminución progresiva hasta los ocho vehículos, si bien cabe destacar que hay una serie de movimientos que no se han representado pero que deben tenerse en cuenta. La simulación representa el 85% de los movimientos realizados por el sistema; por tanto, debe tenerse en cuenta este 15% sobrante en la saturación del sistema. De esta manera, aunque en la simulación con ocho vehículos el sistema responde adecuadamente en la realidad no es así, por lo que el número mínimo de vehículos con los que el sistema funciona correctamente es de nueve. Por otro lado, aunque en la simulación con ocho vehículos se observe que funciona correctamente se producen paradas en las máquinas por falta de producto, de manera que no es factible su funcionamiento con un número tan reducido de vehículos.

Cabe destacar que ante una disminución de vehículos se mejora el tiempo medio de movimiento: es decir, los vehículos tardan menos tiempo en su recorrido, si bien los pedidos en cola permanezcan más tiempo a la espera. El aumento del tiempo de espera es lógico pues el sistema cuenta con menos carros a la hora de satisfacer la misma cantidad de pedidos. En cambio, llama la atención esa reducción del tiempo medio de movimiento, fruto de la menor interacción que sufre los vehículos entre ellos y, por tanto, se genera un menor número paradas.

Debe darse prioridad a un criterio u otro, al aumento del tiempo de espera o a la disminución del tiempo de recorrido. Recurriendo al histograma que registra el tiempo de espera de los pedidos en cola puede observarse que hasta con nueve vehículos, aun siendo el tiempo de espera mayor, se encuentra dentro de los límites, esto es, el tiempo de espera es menor al tiempo de ciclo de las máquinas, de forma que no se produce su parada por falta de producto.

Puede concluirse que el sistema opera más eficientemente con nueve vehículos que con los once que utiliza actualmente. Si bien siempre conviene contar con un carro reserva para que en caso de avería de uno de ellos, no se produzca la saturación del sistema de transporte.

Se presenta a continuación una gráfica (**Figura 5.8**) comparativa de los resultados numéricos obtenidos anteriormente:

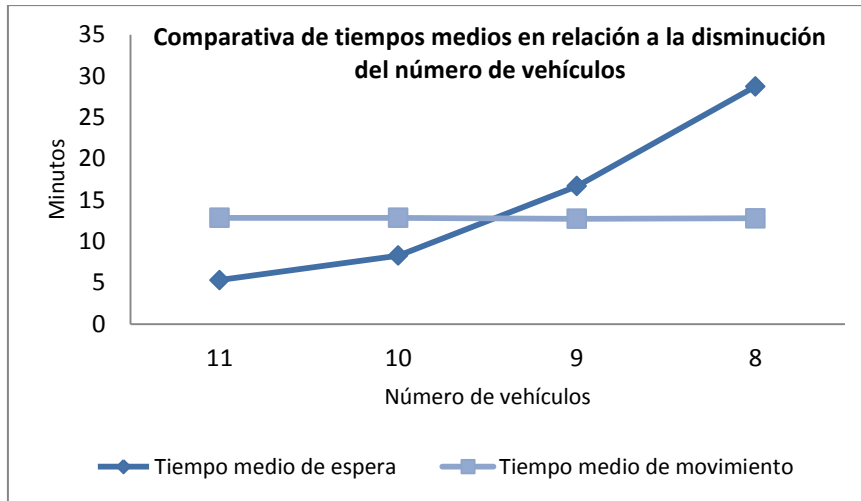


Figura 5.8 Comparativa de tiempos en relación a la disminución del número de vehículos

Aumento del número de vehículos

En un primer instante puede pensarse que con un mayor número de vehículos el tiempo de respuesta será menor y que, por tanto, se asegura un mejor funcionamiento del sistema y se garantiza la no parada de las máquinas por falta de material. Sin embargo, se ha comprobado que al aumentar el número de vehículos se produce una mayor interacción entre ellos, de forma que aumentan sus paradas e interferencias. Al haber zonas de gran conflicto, como puede ser las calles donde se abastece a la MC1, MC2, MC3 y sobre todo la calle donde se abastece a las diferentes BA, se produce una mayor interferencia en sus movimientos, aumentando sus tiempos de recorrido y disminuyendo la fluidez del sistema.

Además, el aumento del número de vehículos supondría el acondicionamiento de una zona extra de parking, la compra del propio vehículo, el aumento del número de intervenciones de los operarios de mantenimiento y la compra de una batería de recambio. Como se ha comentado anteriormente, los tiempos de espera del sistema con nueve vehículos están dentro de los límites aceptables dados por los tiempos de ciclo de las máquinas, de forma que se consigue un funcionamiento correcto del taller. Es decir, el aumento de la flota de vehículos conlleva una serie de gastos y no aporta ningún beneficio al funcionamiento del sistema. Se presenta a continuación una gráfica (**Figura 5.9**) a fin de dar simplicidad en los resultados obtenidos:

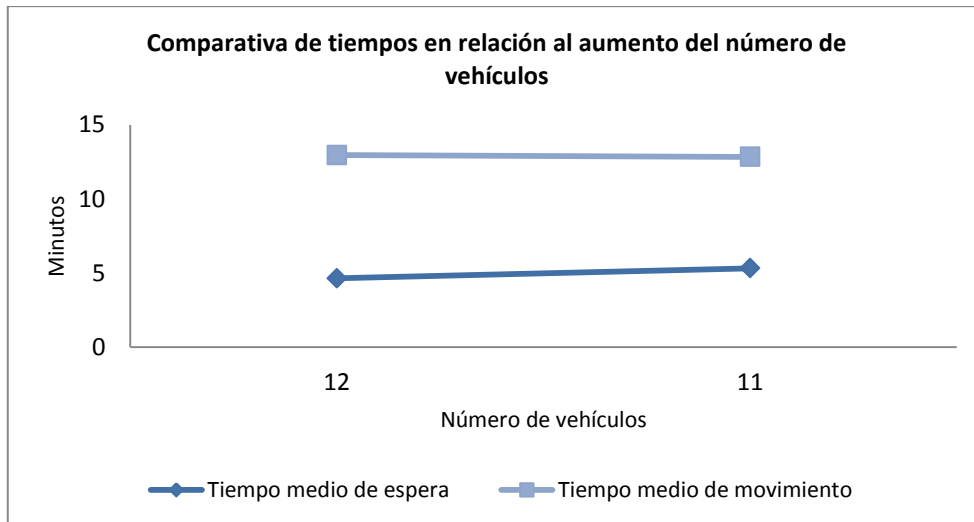


Figura 5.9 Comparativa de tiempos en relación al aumento del número de vehículos

Modificación de la velocidad de los vehículos

En primera instancia puede deducirse que ante un aumento de la velocidad de los vehículos se producirá una mejora del servicio. Ante un aumento de la velocidad del 10% y una flota de diez y once vehículos se observa que, además del aumento del tiempo medio de movimiento, se produce un aumento del tiempo de espera de los pedidos en cola. El aumento de velocidad de los vehículos genera una mayor interacción entre ellos de forma que se empeora el tiempo medio de movimiento; además, las interacciones aumentan tan significativamente que incluso se produce un empeoramiento de los tiempos medio de espera de los pedidos en cola.

Sin embargo se observa una ligera mejora con una flota de nueve vehículos; la disminución de vehículos aporta una reducción de interferencias que compensa el aumento que genera una velocidad mayor. En consecuencia puede afirmarse que con un aumento de la velocidad del 10% sobre la actual, únicamente en una flota de nueve vehículos se produce una mejora, si bien se trata de mejoras no lo suficientemente significativas para llevarse a cabo dado que la velocidad de los vehículos está establecida de forma que se deje un amplio margen a la seguridad de resto de elementos que componen el sistema. Estos resultados pueden observarse en el siguiente gráfico (Figura 5.10):

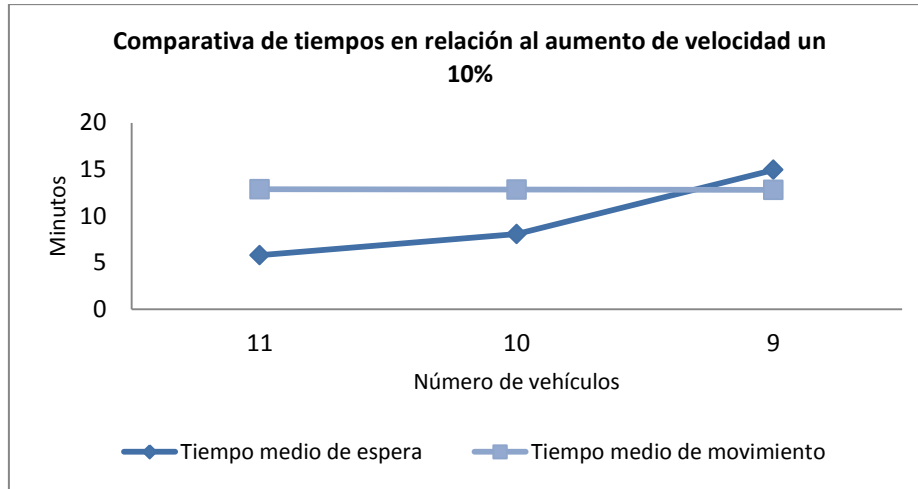


Figura 5.10 Comparativa de tiempos en relación al aumento de velocidad del 10%

Ante un aumento de la velocidad del 25%, una vez visto lo anterior, puede deducirse que se producirán mayor número de interferencias y, por tanto, un peor rendimiento del sistema. Comparando los datos obtenidos con la nueva velocidad frente a la velocidad con la que cuenta el sistema actual se observa que con once vehículos el sistema funciona peor; sin embargo, si se compara con un aumento de velocidad del 10% se comprueba que tiene un mejor funcionamiento. Es decir, con un aumento de velocidad del 25% se comporta peor que con la velocidad actual pero mejor que con un aumento del 10%. Estudiando un sistema con diez vehículos se comprueba que con el aumento del 25% se tiene un mejor rendimiento tanto frente al sistema con la velocidad actual como con un aumento del 10%.

En una flota de vehículos compuesta por nueve se observa que tiene un mejor rendimiento con un aumento de la velocidad del 25% frente a los dos escenarios anteriormente comentados. Se observa que sus porcentajes de disponibilidad aumentan considerablemente de forma que aun teniendo en cuenta ese 15% que no se ha simulado de forma que se ha simulado el funcionamiento con ocho vehículos. Puede observarse que el rendimiento de disponibilidad es inferior al 15% que debe dejarse como margen correspondientes a los movimientos no simulados en el sistema.

Si bien deben considerarse las mejoras que origina este aumento de velocidad en el sistema frente a la reducción de la seguridad que pueda suponer a los elementos restantes en el sistema.

Los resultados anteriormente expuestos pueden graficarse de la siguiente manera (Figura 5.11):

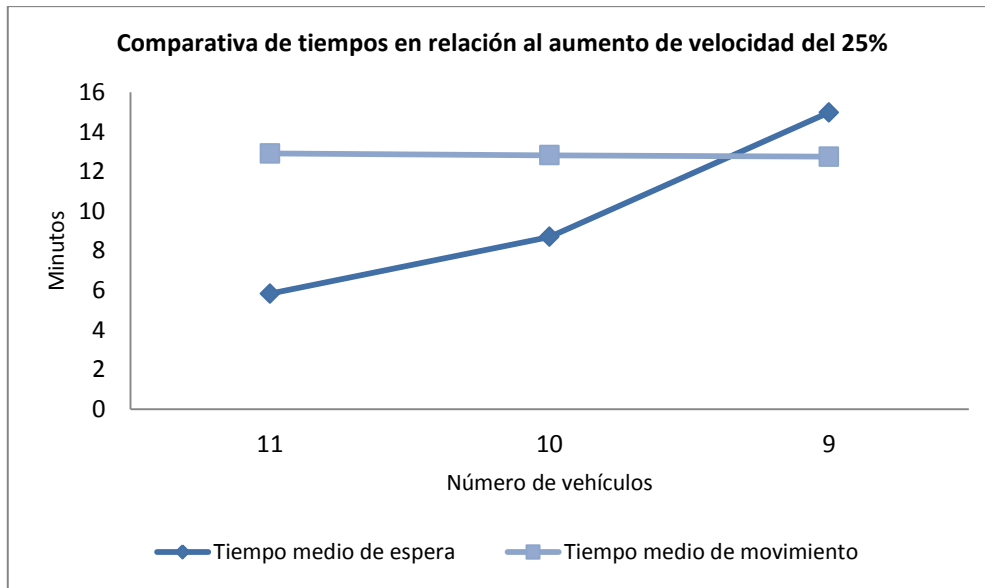


Figura 5.11 Comparativa de tiempos en relación al aumento de velocidad del 25%

Se realiza una reducción del 10% de la velocidad y los resultados obtenidos demuestran que sólo se produce una mejora en el caso de tener una flota de nueve vehículos. Por un lado, la reducción de vehículos genera una reducción de interferencias que se une a la disminución generada por la disminución de la velocidad, de forma que se consigue una mejora del sistema tanto en el tiempo medio de espera de los pedidos como en el tiempo medio de recorrido. Dado que el correcto funcionamiento del sistema radica no tanto en la disminución del tiempo de desplazamiento si no en la reducción del tiempo de espera de los pedidos para evitar las paradas por falta de producto en las máquinas, se considera una mejora a tener en cuenta la reducción de la velocidad de hasta un 10% para una flota de nueve vehículos. Estos resultados se aprecian en el gráfico que aparece a continuación (Figura 5.12):

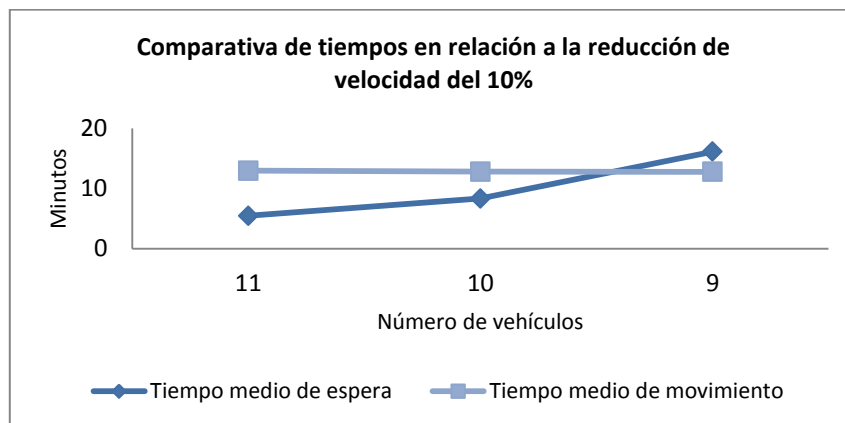


Figura 5.12 Comparativa de tiempos en relación a la reducción de velocidad del 10%

En las siguientes gráficas (Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15) se muestra la evolución del tiempo medio de espera y del tiempo medio de movimiento ante cambios en la velocidad en flotas de vehículos de distinto número:

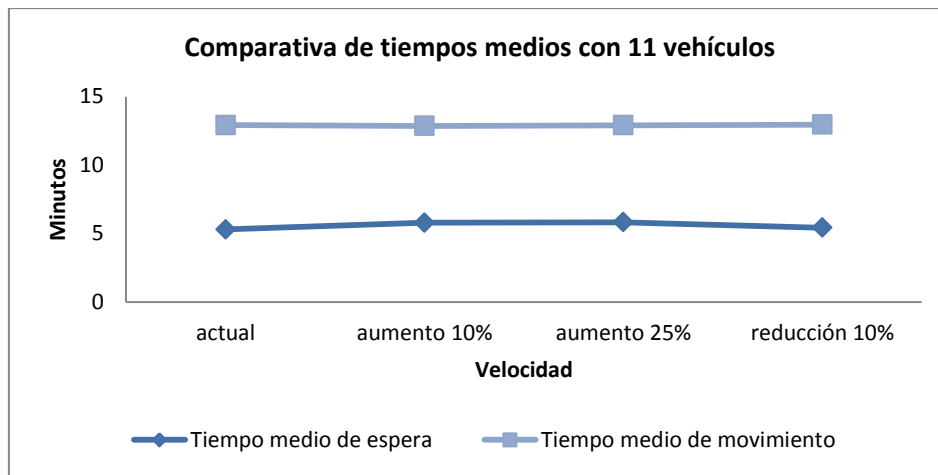


Figura 5.13 Comparativa de tiempos medios con 11 vehículos

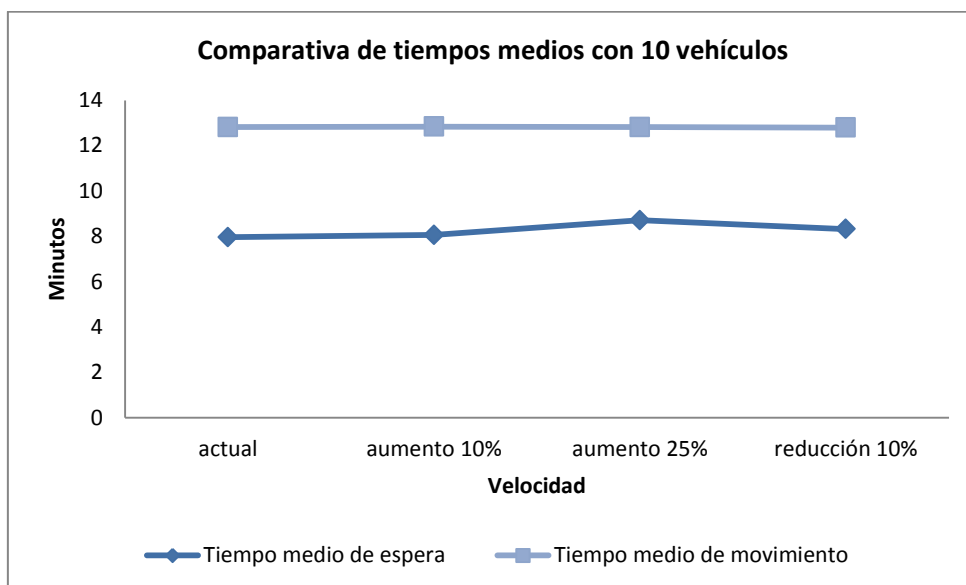


Figura 5.14 Comparativa de tiempos medios con 10 vehículos

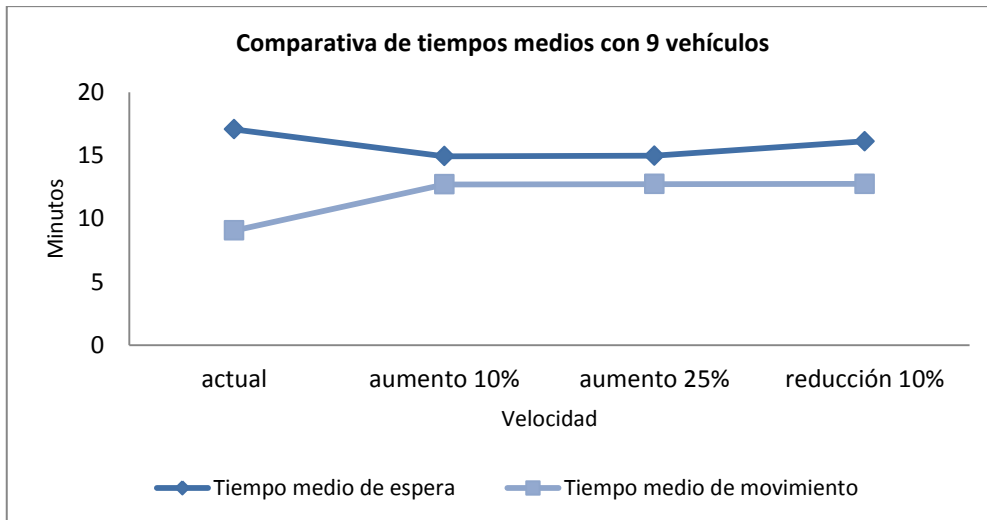


Figura 5.15 Comparativa de tiempos medios con 9 vehículos

Adición de nuevas máquinas

Se produce la inserción de dos nuevas máquinas en la instalación, la máquina BA3 y la máquina BD5. La máquina BA3 tiene un funcionamiento muy similar a las otras BA aunque utiliza un producto menos; la inserción de esta máquina provoca un aumento considerable del número de pedidos, lo que se ve reflejado en la disminución de la disponibilidad de los vehículos.

Además, se introduce esta máquina en una de las calles con mayor nivel de tráfico, de forma que se produce una mayor interferencia en el movimiento de los vehículos.

Por su parte, la máquina BD5 produce, además del consiguiente aumento de pedidos, la inserción de un nuevo material a transportar que es utilizado por la propia máquina BD5 y por las máquinas CG1 y CG2. Esto se traduce en un aumento de tráfico en las calles próximas a las máquinas tipo BD y, en especial, en el track de carga y descarga, lo que produce una congestión dado que bloquea el paso de otros vehículos en la zona. Por otro lado, se produce un aumento de movimiento entre las zonas de Preparación y Confección/Terminación, lo que significa que aumenta el número de movimientos de gran distancia. Además, las máquinas CG1 y CG2 pasan a utilizar tres productos suministrados por los vehículos guiados automáticamente de forma que en esta zona también se produce un aumento de interferencias.

A través de la experimentación en el modelo con dos máquinas extra se comprueba que el sistema de transporte llega a su límite con nueve vehículos, donde se produce la parada de la máquina DO2 por falta de capacidad momentánea del sistema de transporte. A diferencia del sistema original donde era posible dar servicio con únicamente nueve vehículos. Por tanto con el aumento de máquinas es necesario, como mínimo, 10 vehículos operativos.

Límites del sistema

Se busca el aumento continuo de los niveles de producción (a través de la reducción del tiempo de ciclo de las máquinas y del aumento del TRS) lo que se traduce en un aumento de la frecuencia de los pedidos. Se pretende establecer el límite en el que el número actual de vehículos deje de ser suficiente en la atención de los pedidos.

A través del estudio de las gráficas proporcionadas por el sistema se observa que se produce antes la saturación del sistema de transporte que de las máquinas de producción. Se comprueba que dicha saturación se produce ante un aumento de producción del 17%. Existe una disponibilidad media suficiente pero, en cambio, en momentos puntuales el sistema AGV se encuentra saturado por la gran cantidad de pedidos pendientes en ese instante y se produce la parada de la máquina DO2 (cuenta con un 10% de disponibilidad). Es decir, dado que la máquina DO2 únicamente cuenta con un puesto de evacuación y otro puesto de aprovisionamiento necesita de una priorización frente a los pedidos de las otras máquinas a fin de conseguir un aumento de la producción.

Las máquinas cuentan con la capacidad de producción necesaria y el sistema de transporte también posee la capacidad media suficiente, únicamente se produce una saturación instantánea fruto de esta falta de puestos de SA en la máquina DO2.

6 Estudio económico

En el presente capítulo se procede a realizar una valoración del coste económico que supone la realización del proyecto, así como una valoración del coste del trabajo realizado por el alumno. El proyecto actual supone el análisis de posibles mejoras sobre el sistema objeto de estudio y, por consiguiente, sólo se incluye dentro del estudio económico los costes de dicho estudio y no se incluyen los costes de la implantación de las soluciones derivadas de él. Se van a tener en cuenta una serie de elementos reales como las horas dedicadas por el alumno, los materiales necesarios en la realización del trabajo o los sueldos de las personas implicadas en la realización de este proyecto.

Se va a comenzar con la definición de las personas implicadas en la ejecución del proyecto y estableciendo las fases en que se divide dicho proyecto. Una vez hecho esto se calculan los costes asociados a cada una de estas fases en relación al número de horas dedicadas por cada profesional. A partir de estos y de otros elementos se hace el cálculo del coste total del proyecto.

6.1 Integrantes del equipo de proyecto

Los integrantes de este equipo de proyecto han sido el director del proyecto y el programador del modelo. El director del proyecto es el principal responsable de la coordinación, dirección, control e integración del resto de las personas que forman el equipo, estableciendo sus responsabilidades y comprobando que se cumplen los plazos y previsiones establecidas inicialmente, así como estableciendo desafíos a fin de lograr un proyecto de mayor calidad y que supere las expectativas previstas. Un director de proyecto debe poseer ciertas características como son: perfil técnico, perfil gestor o perfil de relaciones personales.

Por otro lado, el programador del modelo es el encargado de la implementación del modelo de simulación. En función de la complejidad del modelo puede ser una persona única o varias. Aunque el proyecto tiene una gran componente informática, la asignación de este tipo de proyectos suele aplicarse a ingenieros de organización industrial como la opción más aconsejable por el perfil industrial con el que cuentan, importante a la hora de realizar un enfoque correcto en la construcción del modelo.

6.2 Fases del proyecto

El proyecto se divide en tres fases generales bien diferenciadas: la primera fase consiste en la definición del proyecto, la segunda se centra en la preparación del modelo y la última se focaliza sobre la implantación del modelo. Se detallan a continuación cada una de ellas.

6.2.1 Fase 1: Definición del proyecto

Previo a la realización de la definición del modelo debe hacerse un estudio de la situación actual: resulta crucial el conocimiento de la situación al inicio del proyecto. Es importante conocer qué se está realizando sobre la materia a nivel mundial y, más concretamente, en otras empresas del mismo sector. Una vez cumplida esta etapa se procede a la formulación del problema así como a la definición de los objetivos que se buscan alcanzar con el desarrollo del proyecto; resulta especialmente crítico conocer los límites del sistema objeto de estudio.

Finalmente, se plantea la estructuración del proyecto, su división en etapas, se establecen los puntos de control y se planifican el tiempo y los recursos necesarios. Una vez hecho esto se procede a la preparación del modelo.

6.2.2 Fase 2: Preparación del modelo

Esta fase se centra en la formulación del modelo, es decir, debe realizarse una observación del sistema real de forma que se tenga una comprensión global de su funcionamiento para proceder a la formulación del modelo. Una vez hecho esto deben incluirse en el modelo aquellos parámetros y variables que resulten relevantes en la simulación. El modelo debe ser lo más simple posible y lo suficientemente complejo como para responder de una forma comparable al sistema real. Una vez que se han establecido los parámetros y variables que intervienen en la formulación del modelo se procede a la colección de datos. Estos datos pueden proceder de registros históricos o de la propia observación directa. En ambos casos los datos deberán ser tratados de forma que resulte posible su inserción en el modelo.

6.2.3 Fase 3: Implantación del modelo

Se procede a la materialización del modelo formulado a través del software de simulación Witness. En esta fase se incluyen dos etapas como son la verificación y la validación. En la primera de ellas se procede a un análisis del modelo realizado a fin de comprobar que funciona de acuerdo con las reglas lógicas establecidas y si responde a la exigencias del sistema real. En la etapa de validación se realiza una comparativa entre los datos reales y los datos facilitados por el modelo a fin de comprobar la fidelidad al sistema real.

Estas fases pueden detallarse en el gráfico que aparece a continuación (**Figura 6.1**).

Se detallan a continuación cada una de estas etapas:

- **Formulación del problema y captura de requisitos:** en esta etapa se lleva a cabo un análisis general. Se estudia el problema a resolver y se establecen las soluciones que debe aportar el modelo. Es importante en esta etapa tener claros los objetivos y los límites del sistema.
- **Recogida de información y definición del problema:** una vez establecido de manera clara el problema se realiza un modelo del sistema y se recoge la información necesaria para la simulación. Se estudia si la definición del problema es correcta, en caso de no serlo se volverá a la recogida de información y definición del modelo, en caso de serlo se procede al siguiente paso.
- **Implementación:** consiste en la programación del modelo a través del software elegido.
- **Verificación:** se estudia si el modelo funciona según la lógica con la que se ha programado y si responde a las exigencias del sistema real. Se procede a su validación, en caso de resultar no apto se retoma la etapa de recogida de información y definición del modelo, en caso de ser apto se procede a la siguiente etapa.
- **Diseño de experimentos:** se programan una serie de escenarios donde probar la respuesta del modelo ante diferentes situaciones.
- **Experimentación:** se realizan las pruebas establecidas en la etapa anterior.
- **Análisis de resultados:** se estudia lo obtenido a través de la experimentación sobre el modelo y se extraen las conclusiones.
- **Interpretación y documentación de los resultados:** a través de los análisis obtenidos anteriormente se produce la interpretación a fin de comprobar si se cumple con los objetivos propuestos inicialmente. Después, se procede a la documentación del proyecto a fin de dejar constancia de todo lo realizado de forma que sirva de apoyo para futuros experimentos.

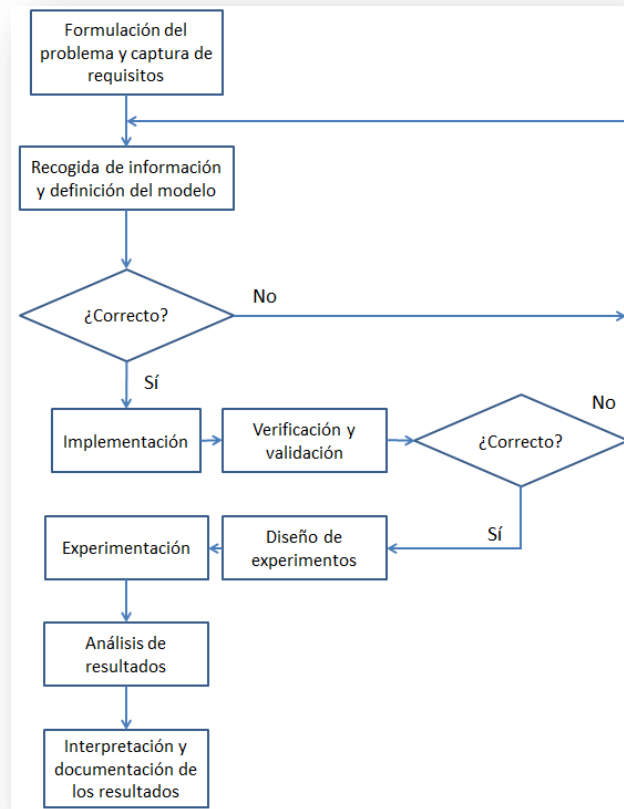


Figura 6.1 Fases del proyecto

6.3 Costes de elaboración del proyecto

En este apartado se incorpora la valoración de los costes asociados a los diferentes elementos necesarios en la elaboración del proyecto (horas de trabajo, material, costes indirectos, etc.) en cada una de las fases en las que se ha dividido el proyecto. Esta valoración tiene por objetivo conocer su influencia en el coste total del proyecto.

Las partidas que se van a analizar son: cálculo de las horas efectivas anuales y de las tasas por hora de los salarios, cálculo de amortizaciones de los equipos, coste por hora y por persona de los materiales consumibles, cálculo de costes indirectos por hora y por persona y horas de personal dedicadas en cada una de las etapas.

6.3.1 Horas efectivas y tasas horarias del personal

Se muestran a continuación las tablas de horas y semanas laborables efectivas anuales por profesional (Tabla 6.1 y Tabla 6.2). Seguidamente se establece el salario de los profesionales que intervienen en la elaboración de proyecto y a partir de estos se calcula el coste por semana y por hora de cada uno de ellos (Tabla 6.3).

Tabla 6.1 Días laborables efectivos anuales

Concepto	Días / horas
Año medio	365,25
Sábados y Domingos (365,25*2/7)	-104,36
Días efectivos de vacaciones	-20
Días festivos reconocidos	-12
Días de formación	-15
Otros	-4
Total estimado días efectivo	210
Total horas/año efectivas (8 horas/día)	1.680

Tabla 6.2 Semanas laborables efectivas anuales

Concepto	Días / horas
Año medio (semanas)	52
Vacaciones y festivos	-5
Enfermedad	-2
Cursos de formación	-1
Total semanas	44

Los salarios de los profesionales se han establecido en base a los salarios mínimos incluidos en el estudio de remuneración de la consultora de selección Page Personnel (Page Personnel, 2014).

Tabla 6.3 Coste horario y semanal del equipo de profesionales

Concepto	Director de proyecto	Ingeniero en Org.Ind.
Sueldo (neto + incentivos)	36.000 €	19.000 €
Seguridad Social (35%)	12.600 €	6.650 €
Total	48.600 €	25.650 €
Coste semanal	1104,55 €	582,95 €
Coste horario	28,93 €	15,27 €

6.3.2 Horas dedicadas a cada fase del proyecto

Mediante un estudio de tiempos se estimó que la dedicación del personal en cada una de las fases fueron las que se indican a continuación (**Tabla 6.4**):

Tabla 6.4 Horas dedicadas por profesional a cada fase del proyecto

Concepto	Fases		
	1	2	3
Director de Proyecto	20	40	100
Ingeniero en Org. Ind.	40	160	696
Total horas	180	600	2388

6.3.3 Amortización de equipos

El coste de los equipos utilizados se muestra a continuación (**Tabla 6.5**):

Tabla 6.5 Coste de los equipos y software utilizados

Concepto	Coste	Cantidad	Coste total
PC Pentium(R) Dual-Core	560 €	1	560 €
Microsoft Windows 7	120,00 €	1	120,00 €
Microsoft Office 2010	250,00 €	1	250,00 €
Teléfono CISCO, Modelo CP-6941	60,00 €	1	60,00 €
Cámara video SONY Modelo HDR-CX280E	225,00 €	1	225,00 €
Licencia Witness	3.000,00 €	1	3.000,00 €
Total Amortizar			4.215 €

Teniendo en cuenta que el periodo de amortización de los elementos se ha estimado en cinco años con un valor residual nulo, se obtiene lo siguiente (**Tabla 6.6**):

Tabla 6.6 Amortización de los equipos y del software

Tipo	Periodo	Amortización
Anual	5 años	843 €
Semanal	260,89 semanas	16,16 €
Diaria	1.826,25 días	2,30 €
Horaria	43.830 horas	0,10 €

6.3.4 Coste del material consumible

El coste anual por persona de los diferentes tipos de material consumible (material de oficina, papel, CD, etc.) se recoge en la siguiente tabla (**Tabla 6.7**):

Tabla 6.7 Coste del material consumible por persona

Concepto	Coste
Papel de impresora	40 €
Tóner de impresora	170 €
Consumibles de oficina	17,50 €
CD y DVD	50 €
Otros (reprografía, encuadernación, etc)	140 €
Coste anual por persona	417,50 €
Coste horario por persona	0,25 €

6.3.5 Costes indirectos

Se incluyen en este apartado todos los gastos referentes a electricidad, teléfono, alquileres, etc. Se consideran costes indirectos todos aquellos costes que no son directamente imputables a un producto; se dividen en específicos y generales. Los específicos son aquellos que existen en función del proyecto, es decir, si éste no se realiza estos costes no existen. Por su lado, los generales son independientes del proyecto, se incluyen en este grupo: el agua, la luz, la calefacción, el teléfono, Internet, la calefacción, los impuestos, etc. Se muestra en la siguiente tabla el total de los costes indirectos anuales por persona y horario por persona (**Tabla 6.8**):

Tabla 6.8 Costes indirectos

Concepto	Coste
Alquiler	500 €
Teléfono	150,30 €
Electricidad	50,25 €
Agua	20,60 €
Internet	60 €
Otros	56,40 €
Coste total anual por persona	837,55 €
Coste horario por persona	0,50 €

6.4 Costes asignados a cada fase del proyecto

Una vez que se tienen las tasas horarias de amortizaciones y remuneraciones, los costes estimados directos e indirectos, las horas por etapa y por integrante del proyecto se procede a establecer una asignación de los costes por fases.

Para realizar esta asignación de costes se tienen en cuenta las horas invertidas por persona y etapa y las remuneraciones y amortizaciones, los costes indirectos y los costes de material consumible. Los costes asignados a las diferentes etapas se muestran en las siguientes tablas (Tabla 6.9, Tabla 6.10 y Tabla 6.11) y la relación en las siguientes figuras (Figura 6.2, Figura 6.3 y Figura 6.4).

6.4.1 Costes asignados a la Fase 1

Tabla 6.9 Costes asignados a la Fase 1

Concepto	Horas	Coste horario	Coste total
Personal			
Director de proyecto	20	28,93 €	578,60 €
Ingeniero industrial	40	15,27 €	610,80 €
Amortización			
Equipos de desarrollo	40	0,10 €	4,00 €
Material consumible			
	200	0,25 €	50,00 €
Costes indirectos			
	200	0,50 €	100 €
Total Coste Fase 1			1.343,40 €

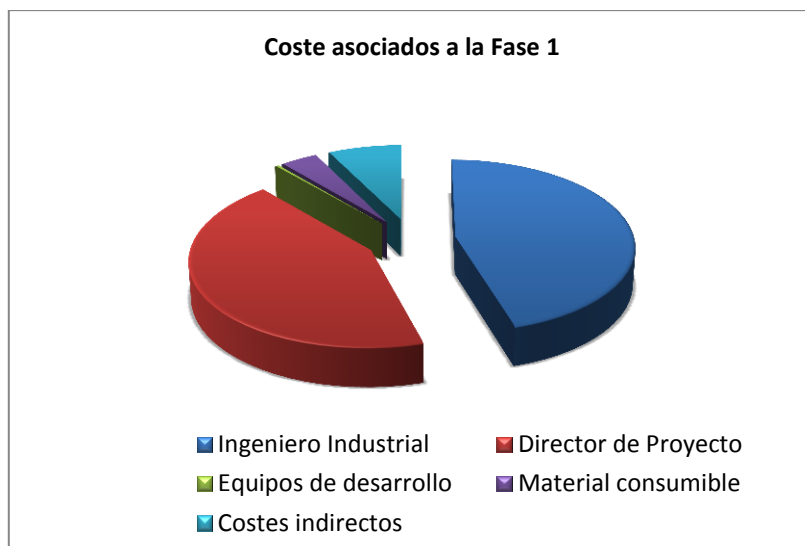


Figura 6.2 Gráfico de costes asociados a la Fase 1

6.4.2 Costes asignados a la Fase 2

Tabla 6.10 Costes asignados a la Fase 2

Concepto	Horas	Coste horario	Coste total
Personal			
Director de proyecto	40	28,93 €	1.157,20 €
Ingeniero industrial	160	15,27 €	2.443,20 €
Amortización			
Equipos de desarrollo	100	0,10 €	10,00 €
Material consumible	60	0,25 €	15,00 €
Costes indirectos	60	0,50 €	30 €
Total Coste Fase 2			3.655,40 €

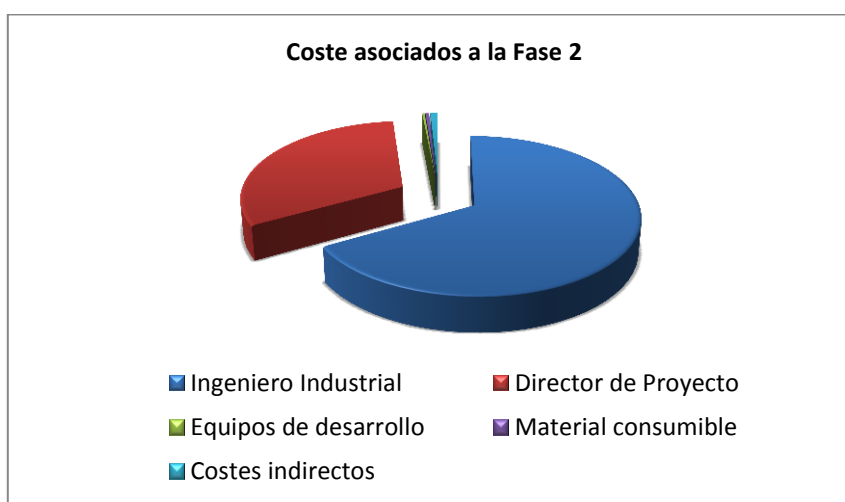


Figura 6.3 Gráfico de costes asociados a la Fase 2

6.4.3 Costes asignados a la Fase 3

Tabla 6.11 Costes asignados a la Fase 3

Concepto	Horas	Coste horario	Coste total
Personal			
Director de proyecto	100	28,93 €	2893 €
Ingeniero industrial	696	15,27 €	1.0627,92 €
Amortización			
Equipos de desarrollo	600	0,10 €	60 €
Material consumible			
	415	0,25 €	103,75 €
Costes indirectos			
	415	0,50 €	207,05 €
Total Coste Fase 2			13.891,75 €

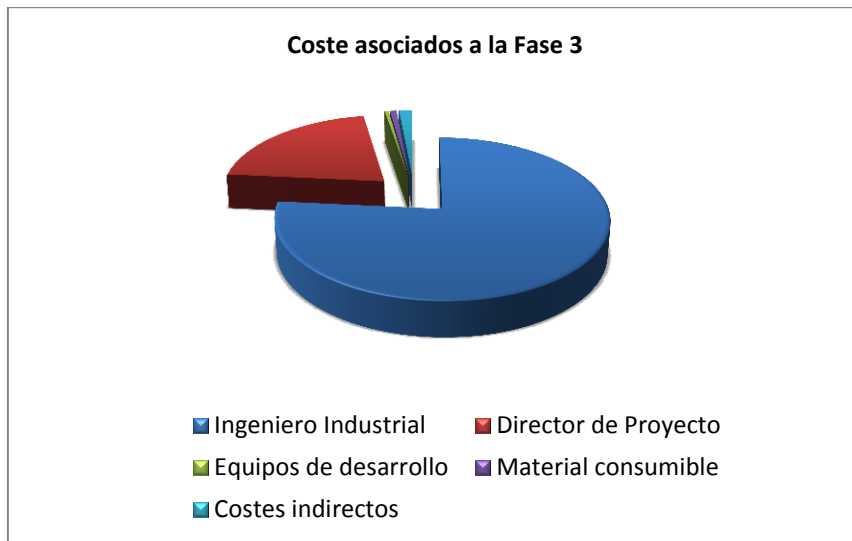


Figura 6.4 Gráfico de costes asociados a la Fase 3

6.5 Coste total del proyecto

Una vez obtenidos el coste por Fases del proyecto se obtiene el coste total a través de la suma de cada una de ellas. En la siguiente tabla (Tabla 6.12) aparece el desglose de cada una de ellas y el coste total, mientras que en la Figura 6.5 aparece el gráfico de costes por fases.

Tabla 6.12 Coste total del proyecto

Actividad	Coste
Fase 1	1.343,40 €
Fase 2	3.655,40 €
Fase 3	13.891,75 €
Coste Total	18.890,55 €

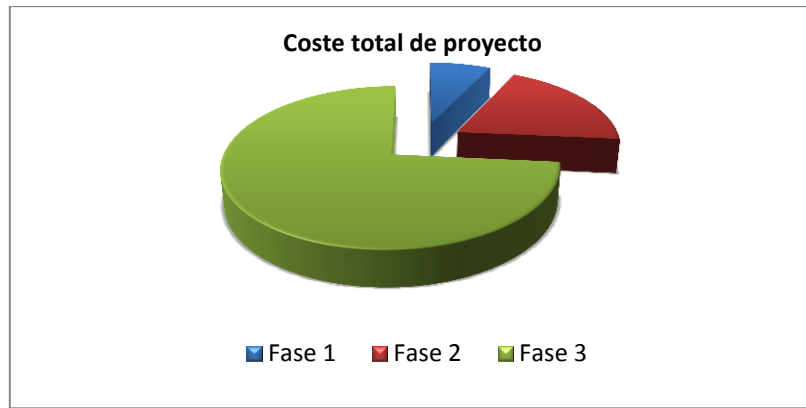


Figura 6.5 Gráfico de coste total del proyecto por etapas

6.6 Estimación del precio unitario de ventana unitario

Considerando un beneficio del 30% para el proyecto y unos impuestos aplicables del 21% que se desglosan en la tabla que aparece a continuación (**Tabla 6.13**) se obtiene el precio de venta unitario imputable al cliente:

Tabla 6.13 Desglose del P.V.P del proyecto

Concepto	Coste
Coste total del proyecto	18.890,55 €
Beneficio (30%)	5.667,17 €
Coste Total + Beneficio	24.557,72 €
Impuestos (21%)	5.175,12 €
TOTAL PVP	29.723,84 €

6.7 Planificación del proyecto

Se presenta en la **Figura 6.6** el gráfico Gantt del proyecto a fin de dar una duración concreta a cada una de las etapas del proyecto.

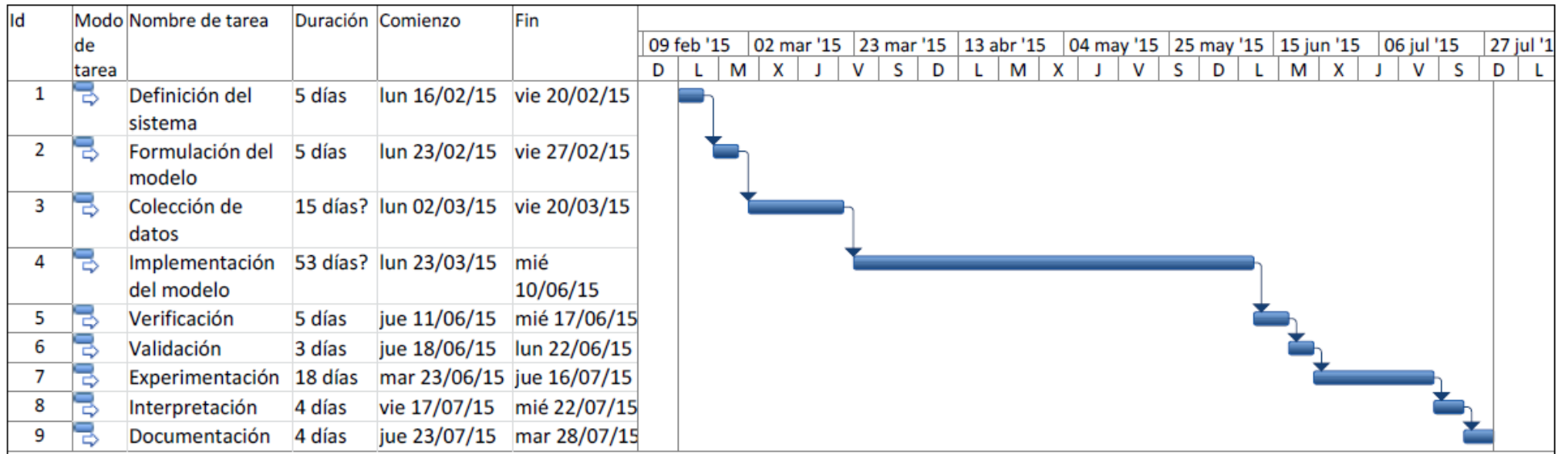


Figura 6.6 Gantt del proyecto

Conclusiones y líneas futuras

En el presente capítulo se extraen las conclusiones fruto de los experimentos realizados sobre el modelo y de la interpretación de los resultados obtenidos a fin de justificar si se han alcanzado o no los objetivos marcados al comienzo de la realización del proyecto. Se proponen, además, posibles mejoras que podrían realizarse sobre el modelo a fin de mejorar el sistema y optimizar su rendimiento así como posibles utilidades para dicho modelo.

Conclusiones

Una vez realizado el estudio y extraídos los resultados pueden extraerse las siguientes conclusiones en función de los objetivos marcados inicialmente:

Optimización de las condiciones de funcionamiento

Se había planteado la optimización del sistema actual a través de la variación de parámetros tales como el número de vehículos, la velocidad de desplazamiento de estos y la combinación de ambos.

Dadas las condiciones del sistema actual se ha observado algo curioso, el sistema funciona mejor con nueve vehículos que con los once que operan actualmente. Esto se debe a que ante un aumento del número de vehículos se producen más interferencias entre ellos. Estas interferencias son especialmente significativas en zonas como la de almacenamiento general o la zona donde se encuentran las máquinas del tipo BA por las condiciones viales y la disposición actual del taller.

Al disminuir el número de vehículos se produce un menor número de interferencias de forma que el tiempo de recorrido medio es menor, es decir, transcurre un menor tiempo desde que se realiza el pedido hasta que el producto es llevado o retirado de la máquina. Como contrapartida se produce un aumento del tiempo medio de espera, los pedidos esperan más tiempo en cola hasta que son asignados a un vehículo.

Como lo que se busca es un menor tiempo de recorrido y el tiempo medio de espera no llega a ser crítico (el tiempo de espera de los pedidos en cola no supera al tiempo de ciclo de la máquina) se concluye que el sistema tiene una mejor respuesta con nueve vehículos que con los once con los que cuenta actualmente.

Por otro lado se aumenta la velocidad del vehículo hasta un 25% a fin de conseguir una mejor respuesta y se observa que ante un aumento de la velocidad el sistema actual de once vehículos tiene una peor respuesta. Se produce una ligera disminución del tiempo medio de movimiento pero el tiempo medio de espera es considerablemente peor de forma que no se produce ninguna ganancia.

En cambio con una reducción del 10% el tiempo medio de movimiento es prácticamente el mismo y se reduce ligeramente el tiempo medio de espera. Por tanto el sistema actual de once vehículos no puede mejorarse significativamente a través de una modificación de la velocidad.

Por su parte un sistema compuesto por diez vehículos y sometido a diferentes velocidades no experimenta mejoras destacables. Donde sí se observan mejoras significativas es en el sistema de nueve vehículos. Ya se ha observado que el sistema tiene una mejor respuesta con nueve vehículos que con once. A través de los diversos experimentos con la velocidad se observa que el sistema tiene una mejor respuesta con nueve vehículos y con un aumento del 10% de la velocidad.

De forma que se puede concluir que el sistema tiene un funcionamiento óptimo con una flota de 9 vehículos y con un aumento del 10% respecto a su velocidad actual.

Ampliación de la instalación

Otro objetivo a estudiar era la respuesta del sistema ante un aumento de la instalación que se prevé en los próximos años con la implantación de dos máquinas, BA3 y BD5. Se busca anticiparse de forma que en caso de que surja alguna necesidad en lo referente al número de vehículos o de modificación de la localización de las máquinas pueda actuarse a tiempo.

Se ha observado que ante la inserción de la máquina BA3 se produce un aumento considerable de las interferencias de los vehículos en los tramos donde se encuentran todas las máquinas del tipo BA y por tanto un aumento en los tiempos medios de recorrido. Si bien el sistema cuenta con disponibilidad suficiente y no se producen paradas de máquinas por falta de producto. Por tanto, el sistema funciona correctamente.

A través de la inserción de la máquina BD5 se produce menor interferencia entre vehículos que en el caso anterior si bien los tiempos medios de espera y los tiempos medios de recorrido aumentan de forma significativa aunque en menor medida que en el caso de la inserción de la máquina BA3. Por tanto puede concluirse que el sistema responde de forma satisfactoria a esta variación.

Con la inserción simultánea de ambas máquinas los tiempos medios de espera y los tiempos medio de recorrido aumentan potencialmente pero siempre dentro de unos límites controlados. En ningún caso se produce paradas de máquina por falta de producto. Además el sistema aún cuenta con aproximadamente un 12% de disponibilidad lo que nos da una idea de que es suficientemente robusto.

Por otro lado se ha trabajado con la posibilidad de reducir el número de vehículos y se concluye que, con la inserción de las dos nuevas máquinas, el sistema puede funcionar con un número mínimo de diez vehículos sin que se produzcan paradas de máquina.

Límites de la instalación. Relación recursos-rendimiento

El tercer objetivo del proyecto se centraba en conocer cuáles eran los límites del sistema actual ante un aumento continuo de la producción hasta la saturación. Es importante destacar que este aumento del volumen de la producción sólo es posible a través de la reducción de los tiempos de ciclo de las máquinas y de la disminución de los porcentajes de avería. Se buscaba también posibles soluciones para solventar aquellos problemas que se planteasen.

Se ha observado que la instalación llega a su límite ante un aumento del 17% de producción. El sistema cuenta con disponibilidad media (un 10% que se puede optimizar) pero en determinados instantes de tiempo se produce la parada de la máquina DO2 por falta de producto. A fin de conseguir aumentar el nivel de producción con el sistema de transporte actual existen dos opciones: por un lado dotar de prioridad a los pedidos de la máquina DO2 y por otro añadir un puesto de SA a la máquina.

A través de la priorización de los pedidos de la máquina DO2 se interpondría la satisfacción de estos frente a otras máquinas independientemente del instante de tiempo en que se solicite el pedido. De esta forma podría conseguirse un aumento de producción mayor al 17% actual dado que el sistema cuenta con disponibilidad media .

La opción de añadir un puesto de stock avanzado es la opción más fácil, a priori, pero la menos factible dado que la planta cuenta con escaso espacio libre. En caso de optar por esta solución

debería realizarse un replanteamiento de la situación de todas las máquinas, de forma que esta opción queda descartada.

Líneas futuras

En primer lugar destacar que se trata de un prototipo, se encuentra en una fase de optimización a fin de exportarlo a otras factorías del grupo Michelin por tanto es vital la obtención de unos buenos resultados que reflejen la utilidad de este sistema. Es importante conseguir optimizar el sistema para posteriormente estudiar su respuesta y cada caso particular en las distintas fábricas. Este proyecto es por tanto la base de una gran apuesta de futuro para la empresa.

En segundo lugar y a fin de mejorar el modelo y optimizar el funcionamiento del sistema podría trabajarse en diferentes aspectos: trabajar sobre la lógica de gestión de pedidos, modificar el sistema de gestión FIFO por otro tipo de sistemas; se pueden realizar modificaciones sobre la lógica de movimiento de los vehículos, tanto en aspectos de velocidad como en aspectos de guiado; realizar variantes sobre la gestión de los almacenes; sobre el funcionamiento de las máquinas; la integración en toda la fábrica; y trabajar en la instalación para aumentar los límites de producción.

Lógica de gestión de pedidos

El modelo implementado funciona con un sistema de gestión de pedidos tipo FIFO (*First In First Out*), es decir, el primer pedido en llegar a la cola de pedido es asignado al primer vehículo que se encuentra disponible. Se proponen una serie de modelos de gestión que podrían implementarse en el modelo a fin de estudiar las mejoras que supondría sobre el sistema real.

Con el objetivo de optimizar los viajes en vacío de los vehículos se propone un cambio de gestión FIFO por una **gestión por proximidad de los carros**. En el momento de liberación de un carro puede establecerse un algoritmo que calcule qué pedido es el más cercano al vehículo recién liberado de forma que se le asigne automáticamente. De esta manera se minimiza el viaje en vacío del vehículo, en cambio se perjudicaría el tiempo de abastecimiento en las máquinas dado que el primer pedido enviado a la centralita no tiene por qué ser el primero en ser atendido.

Se propone una **gestión de pedidos por prioridad** a fin de minimizar el tiempo de bloqueo en las máquinas por falta de material, a costa de disminuir el rendimiento de los vehículos y de aumentar sus viajes en vacío, se podría trabajar a través de un sistema que asigne los pedidos en un orden creciente de prioridad. Dicha prioridad vendría dada en función del tiempo de ciclo de la máquina, a menor tiempo para que se produzca el fin del ciclo de la máquina antes necesitará el producto y por tanto mayor prioridad. También podría darse esta prioridad en función de la fecha de caducidad de los productos. Existen ciertos productos que tiene un intervalo de tiempo para ser utilizados, sin que se pierdan sus propiedades, de forma que la prioridad de los pedidos no vendría dada por la máquina si no por los propios pedidos.

Otra opción sería la de la **gestión directa de los pedidos**. En el sistema actual para producir el aprovisionamiento de una máquina de, por ejemplo, terminación es necesario por un lado que un vehículo deposite el producto que se precisa en el almacén y por otro lado que otro vehículo recoja ese producto del almacén y finalmente lo lleve a la máquina. Esto provoca, además de la utilización de dos vehículos, pérdidas de tiempo que se invierten en las maniobras de descarga y carga en el almacén común. Podría implementarse un sistema de funcionamiento tal que se realice una gestión directa, es decir sin pasar por el almacén común. Para que, en caso de que se produzca la

evacuación de un producto y por otro lado se produzca una petición de aprovisionamiento de ese mismo producto se realizara este movimiento sin el paso intermedio de almacenaje en estantería. Podría configurarse este tipo de funcionamiento en el modelo a fin de estudiar las mejoras que esto podría suponer.

Si se busca disminuir el tiempo de espera hasta la llegada del vehículo a la zona de carga de material podría trabajarse en una **gestión por zonas** a fin de repartir los vehículos de forma que cada grupo de pedidos de una zona tenga unos vehículos determinados asignados. De esta forma siempre habría vehículos en la zona donde se producen los pedidos, la mitad de los vehículos se encargaría del movimiento de almacén a terminación y viceversa y la otra mitad de preparación a almacén y viceversa.

Con el objetivo de minimizar los desplazamientos de los vehículos y optimizar su funcionamiento en cargado podría realizarse un **robo de pedidos**. Es decir, un vehículo A se encuentra desplazándose hacia el punto de carga de un pedido, si aun estando de camino este vehículo A un vehículo B, que se encuentra en la zona donde se va a realizar la carga, pasa a estar disponible podría realizar la acción de “robar” el pedido al vehículo A que se encuentra de camino dado que se encuentra más próximo al punto de pedido.

Otra opción sería la del **encadenamiento de pedidos**. En el caso de tener varios pedidos donde el punto de descarga de uno se encuentre muy próximo al punto de carga del siguiente podría implementarse un algoritmo de forma que pueda asignarse más de un pedido al vehículo. De esta forma cada uno de los carros tendría su propia cola de pedidos a fin de evitar movimientos en vacío de los carros, optimizar movimientos, reducir el número de carros (un mismo vehículo tendría asignado dos pedidos en vez de utilizar dos vehículos para los dos pedidos) lo que conlleva una disminución de interacciones entre carros y por tanto una mejora del tiempo medio de movimiento. Por último, en caso de tener la opción de robo de pedidos se evitarían movimientos en balde de los vehículos dado que se iniciaría el movimiento de uno y al robarle la orden un vehículo más cercano éste volvería al parking.

A través de un **pre-envío de órdenes**, de forma que una operación de la máquina que esté próxima a acabar podría enviar la orden antes de hacerlo, se mejorarían los tiempos de abastecimiento en las máquinas dado que parte del tiempo que tarda el vehículo en traer el material no se tendría en cuenta dado que se hace mientras se produce el consumo del producto. Tal y cómo se encuentra implementado el sistema actualmente en algunas máquinas se produce su parada por falta de material. Este sistema de gestión vendría con un problema asociado, el tiempo para acabar el consumo de material no es fijo dado que las averías provocan la parada de máquinas y este originaría un bloqueo del vehículo en la zona de carga mientras espera el material.

Como se ha comentado anteriormente un 15% de los movimientos del sistema real, correspondientes a los **movimientos de los pedidos en lleno**, no se han simulado en el modelo. Estos movimientos en lleno corresponden a evacuaciones de productos a medio consumir cuando se produce un cambio de dimensión en las máquinas. A fin reflejar éste 15% no simulado debería implementarse este tipo de movimientos en el modelo para conseguir una mayor precisión en los resultados.

Guiado de los vehículos

En algunas zonas determinadas del taller existen varios caminos para llegar a un mismo lugar o vías de escape por donde los carros pueden circular en caso de que otro vehículo esté bloqueando esa vía. En el modelo se ha configurado de tal manera que en tracks tales como LOPQ1 o LOPQ2 donde

en caso de estar ocupado uno de ellos puede optarse por el otro camino. Pero esto sólo sucede de forma inmediata, es decir, lo previene justo en el track anterior. Además de la poca antelación de movimiento cuenta con otro inconveniente, sólo se hace este redireccionamiento en caso de que el otro track esté completamente lleno, es decir, puede que un track de capacidad dos esté bloqueado por un vehículo, de esta forma al llegar un nuevo vehículo y comprobar que existe un hueco de capacidad disponible entra en dicho track bloqueado, no es hasta el siguiente vehículo que al comprobar que el track se encuentra totalmente ocupado realiza la opción de cambiar su track de destino. Podría implementarse en el modelo un algoritmo de **redireccionamiento** a larga distancia para evitar bloqueos.

Cuando un AGV se encuentra con un obstáculo, ya sea con otro vehículo, una persona o cualquier otro objeto se para inmediatamente. Cuando comprueba que ya no existe dicho obstáculo en su zona de maniobra procede a su puesta en marcha. A fin de evitar estas pérdidas de tiempo podría trabajarse con un cambio en su **lógica de seguridad**. En caso de encontrar un vehículo en vez de pararse completamente podría optar por el acomodamiento de su velocidad a la del obstáculo (en caso de ser otro elemento móvil) y de esta forma se evitarían los tiempos de parada y arranque del AGV.

Podría dotarse a los vehículos de **mayor velocidad** en la zona de la calle cubierta (recta que une la zona de preparación con la de terminación) dado que en ese punto la velocidad no influye en el número de interferencias. Para garantizar las condiciones de seguridad de los carros en la calle cubierta este aumento de velocidad debería ir acompañado de una inclinación de las pinzas para garantizar un mayor agarre del producto.

En la **calle cubierta** existe una puerta que se levanta a través de la detección de un vehículo por parte del sensor. Actualmente se produce una parada de los vehículos por el retraso en la apertura. Dicho problema se podría solucionar colocando el sensor apenas unos metros antes de la puerta.

En ocasiones las averías de los vehículos originan la parada tanto de otros AGV como de otros carristas manuales de forma que se corre el riesgo de una parada de producción. Una opción interesante sería la de dotar a los **vehículos automáticos de una opción de control manual** de forma que en caso de bloqueo un operario pueda subirse al vehículo y tomar el mando para completar el pedido.

Almacenamiento de productos

A fin de reducir los tiempos de aprovisionamiento de las máquinas se podría trabajar con un algoritmo de cálculo de la zona libre más próxima a la zona de consumo, teniendo en cuenta, además, los tiempos de consumo y la máquina más próxima a finalizar. Se realiza así un cambio de almacenamiento por familia a un **almacenamiento por producto**.

Como se ha observado antes la máquina DO2 cuenta con un único puesto de aprovisionamiento y otro de evacuación. Esto origina un problema dado que esta máquina precisa de mayor atención que las demás, dado que es más fácil que se produzca su parada por falta de material. Por tanto sería de gran utilidad en la mejora del límite de producción la inserción de un **nuevo stock avanzado**.

Funcionamiento de máquinas

El modelo no representa la totalidad del sistema objeto, se ha omitido la simulación de los cambios de dimensión en las máquinas y la relación de funcionamiento entre las máquinas tipo MF y tipo MC. A fin de mejorar la fidelidad del modelo podría insertarse estos cambios.

Integración en toda la fábrica

Se propone la utilización de esta simulación para el estudio del transporte del total de materiales, es decir, no limitar el uso a los AGV a las máquinas con las que funciona actualmente si no estudiar su funcionamiento en caso de realizar también las tareas de transporte de los carristas manuales. Además de extrapolar su funcionamiento a otras partes de la fábrica.

Límites de la instalación

Como se ha extraído de la experimentación la máquina DO2 resulta marcar el límite de producción de la instalación. Al contar con dos puestos de stock avanzado precisa de mayor atención por parte de los AGV a fin de prevenir su parada por falta de material. Se plantean dos soluciones a fin de solventar este problema: la priorización de los pedidos de la máquina y la adición de otro puesto de stock avanzado.

La adición de un nuevo puesto de SA parece la más fácil a simple vista pero dado que la zona donde se sitúa la máquina cuenta con espacio reducido es difícil de optar por esta solución. Podría pensarse en instalar los puestos de SA a doble altura pero, dado que es una zona con un gran tránsito de operarios, entraría en conflicto con la seguridad. Por tanto, esta opción queda descartada.

La otra opción requiere de una reprogramación de la lógica de asignación de los pedidos, operación que debe realizar personal especializado. La modificación requiere la priorización absoluta de los pedidos de la máquina DO2 de forma que, en el momento que un pedido de ésta entre en la cola de pedidos pendientes, pase a asignarse al primer vehículo que queda libre.

Bibliografía

Se expone a continuación en este capítulo todas las fuentes y medios (páginas Web y manuales) que han sido consultados para la extracción de la información necesaria para la realización del presente proyecto.

Libros

Barceló, J. (1996). *Simulación de Sistemas Discretos*. Madrid: Isdefe

Creus, A. (1998). *Simulación y Control de Procesos por ordenador*. Barcelona: Marcombo.

Law, A. M. y Kelton W.D.(2000) *Simulation Modeling and Analysis*. Nueva York: Mc graw Hill.

Martin, J., Ríos, D. y Ríos, S. (1997). *Simulación: Métodos y Aplicaciones*. Nueva York: Mc Graw Hill.

Meyers, F.E., Stephens, M.P. (2006). *Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales*. Madrid: Pearson Educación.

Prida, B. y Guitérrez, G. (2004). *Logística de aprovisionamientos*. Madrid: Mc Graw Hill.

Rey, F. (1996). *Programa de implantación de la mejora continua*. Nueva York: TGP HOSHIN.

Suñé, A. y Arcusa, I. (2004). *Manual práctico de diseño de sistemas productivos*. Madrid: Díaz de Santos.

Fishman, G. y Kiviat, P. (1986). *Simulation Modeling and Analysis, the statistics of discrete-event simulation*. Washington DC: Rand Corporation.

Michelin. (2006). *100 años de Bibendum*. Valladolid: Michelin

Páginas web

Diario Motor. En: <http://www.diariomotor.com/2009/11/23/visita-a-la-fabrica-de-michelin-en-vitoria-%C2%BFcomo-se-fabrica-un-neumatico/>. Última visita en: febrero de 2015. Diario Motor es una página web dedicada al análisis y pruebas de coches, centrándose en temas de actualidad.

Geerms. En: <http://www.geerms.com/index.htm>. Última visita en: marzo de 2015. Geerms es una compañía suministradora de software especialmente dedicado a estudiantes, en este proyecto se ha utilizado el programa Stat-Fit, suministrado por Geerms.

JBT Corporation. En <http://www.jbtc-agv.com/en/Solutions/Custom-Service/AGV-Upgrades>. Última visita en: marzo de 2015. EN la página oficial de JBT Corporation se puede encontrar toda la información referente a la empresa y las numerosas soluciones que aportan al mundo de la industria.

Lander Simulation & Training Solutions. En: <http://www.landertsimulation.com/formacion-con-simulacion/el-mundo-en-movimiento/historia-de-la-simulacion/>. Última visita en: marzo 2015. En la

página oficial de Lanner Simulation & Training solutions se puede encontrar toda variedad de información referente al mundo de la simulación, desde sus comienzos hasta las últimas novedades.

Lanner. En: <http://www.lanner.com/>. Última visita en: abril 2015. En la página oficial de Lanner Group se puede encontrar multitud de información, desde las características del programa Witness desarrollado por ellos mismo hasta manuales de utilización e incluso un sistema de ayuda personal.

Proyectos Fin de Carrera

Castaño, M.A. (1997). Diseño, Distribución, Optimización y simulación de Sistemas Productivos. Proyecto Fin de carrera de la Universidad de Valladolid

Manuales

Curso de introducción. Witness PwE 3.0. ADDLINK SOFTWARE CIENTÍFICO. Javier Otamendi

Manufacturing Performance Edition. Quick Reference Booklet. Witness. Lanner Group Ltd

Manufacturing Performance Edition. Learning Witness Book One. Lanner Group Ltd

Manufacturing Performance Edition. Learning Witness Book Two – Workbook Witness 14 Edition. Lanner Group Ltd

Witness Getting Started Materials. Lanner Group Ltd