

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Optimización del proceso de montaje en un centro de gestión de concentradores

Autor: Antonio Oria Palomar

Tutor: D. Ignacio Eguía Salinas

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

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Optimización del proceso de montaje en un centro de gestión de concentradores

Autor:

Antonio Oria Palomar

Tutor:

D. Ignacio Eguía Salinas

Profesor titular

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Optimización del proceso de montaje en un centro de gestión de concentradores

Autor: Antonio Oria Palomar

Tutor: D. Ignacio Eguía Salinas

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A Berta y Olivia

Agradecimientos

La elaboración del presente proyecto ha requerido de un gran esfuerzo, lo que ha comportado un sacrificio de tiempo de estar con los seres queridos. Por este motivo, desde estas líneas quiero agradecer a mi familia que ha sabido comprender la situación y ha colaborado en todo momento sin mostrar queja en ningún momento. Y en especial a mi esposa, y mis dos hijas que han tolerado mi menor dedicación hacia ellas sin ningún reproche.

También quiero aprovechar para agradecer, a mi tutor D. Ignacio Eguía, su paciencia y comprensión a lo largo de todo el proceso hasta conseguir tener el proyecto finalizado. Sin su ayuda es posible que no lo hubiese podido llevar a buen término.

Por todo esto, muchas gracias a todos.

Antonio Oria Palomar

Sevilla, 2018

Resumen

El presente documento hace referencia al proyecto de fin de carrera de optimización del proceso de montaje en un centro de gestión de concentradores a través de la simulación y del estudio de equilibrado de líneas. El documento se encuentra dividido en cuatro partes principales y unas conclusiones finales;

La primera consiste en una introducción del proyecto con la definición de los objetivos y el alcance del mismo, así como una introducción a la simulación de eventos discretos y al problema de equilibrado de líneas.

La segunda parte se centra en la empresa y el producto, donde se describirá en qué consiste el centro de gestión de concentradores y cuáles son sus funciones principales y los procesos que tendrán lugar en él. Se comenzará describiendo el sistema actual de distribución de energía eléctrica y cómo este sistema se encamina hacia un nuevo escenario donde es necesario que todos los sistemas estén interconectados, y cómo el concentrador juega un papel importante en esta misión.

La tercera y cuarta parte del proyecto consiste en la explicación de las herramientas que se van a utilizar para optimizar los procesos del centro de gestión de concentradores y en mostrar los resultados obtenidos en la experimentación. En esta parte es donde se explicará el modelo de simulación discreta, se presentarán diferentes escenarios posibles y se visualizarán los resultados de los mismos con idea de analizar los candidatos para ser optimizados, dando paso de este modo a la fase de diseño y equilibrado de líneas de montaje de concentradores sobre aquellos candidatos que se hayan encontrado en la fase de simulación.

Finalmente se mostrarán las conclusiones más relevantes que se pueden extraer de los resultados obtenidos.

Agradecimientos	19
Resumen	21
Índice	23
Índice de Tablas	25
Índice de Figuras	27
1 Objetivo y Alcance	30
1.1 <i>Objetivos y alcance del Proyecto</i>	30
1.2 <i>Estructura del proyecto</i>	31
2 Simulación discreta	32
2.1 <i>Definición de Simulación</i>	32
2.1.1. Definiciones	32
2.1.2. Simulación Continua vs Simulación Discreta	34
2.2. <i>Características de la Simulación</i>	35
2.2.1. Etapas a realizar en la Simulación	35
2.2.2. Ventajas de la Simulación	35
2.3. <i>Diferentes herramientas de Simulación Discreta</i>	36
2.3.1. Pro-model	36
2.3.2. WITNESS	37
2.3.3. Automod	39
2.3.4. Arena	40
2.4. <i>Características de Arena Rockwell</i>	41
2.4.1. Módulos principales	41
2.4.2. Módulos de datos (tablas)	45
3 Equilibrado de Líneas	49
3.1. <i>Definiciones</i>	49
3.2. <i>Características de las líneas de fabricación o montaje</i>	50
3.3. <i>El Equilibrado en las líneas de fabricación</i>	50
3.4. <i>Los problemas SALBP</i>	50
3.4.1. SALBP 1	51
3.4.2. SALBP 2	51
4 La Empresa y el Producto	53
4.1. <i>Introducción a las redes eléctricas inteligentes</i>	53
4.1.1. Revisión histórica de la distribución eléctrica	53
4.1.2. Redes eléctricas inteligentes: Smartgrids	56
4.1.3. La nueva estructura de las redes inteligentes	59
4.2. <i>Centro logístico para el concentrador</i>	61
4.2.1. Agentes que intervienen en la implantación de los concentradores	62
4.2.2. Funciones del Centro Logístico	62
4.2.3. Kit de instalación	63
4.3. <i>Definición de las Etapas de Despliegue</i>	64
4.3.1. Primera etapa: Prueba piloto en entorno controlado	65
4.3.2. Segunda etapa: prueba de carga en todo el ámbito del proyecto	66

4.3.3.	Tercera etapa: implantación masiva	66
4.3.4.	Volúmenes del proceso de implantación	66
4.3.5.	Dimensionado del almacenamiento en el Centro Logístico	67
5	Aplicación de las Herramientas	70
5.1.	<i>Simulación: definición del modelo</i>	70
5.1.1.	Definición de tareas: Diagrama de flujo	70
5.1.2.	Tiempos de cada proceso	76
5.1.3.	Parametrización de los módulos utilizados en la simulación	78
5.1.4.	Parametrización de los módulos de datos utilizados en la simulación	82
5.1.5.	Modelo de simulación	83
5.2.	<i>El Equilibrado en las líneas de fabricación</i>	87
5.2.1.	Modelado del problema SALBP 2	87
5.2.2.	Modelado en Solver de Microsoft Excel	89
5.3.	<i>Definición del precio</i>	90
5.3.1.	Cálculo de costes e ingresos	90
5.3.2.	Margen sobre ingresos: determinación del precio	91
6	Experimentación	92
6.1.	<i>Diferentes escenarios de simulación</i>	92
6.1.1.	Operarios sin asignar a ningún proceso	92
6.1.2.	Operarios asignados a procesos concretos	93
6.2.	<i>Resultados obtenidos</i>	97
6.2.1.	Tiempos obtenidos	97
6.2.2.	Producción de kits	100
6.2.3.	Colas resultantes	102
6.3.	<i>Optimización utilizando SALBP-2</i>	106
6.3.1.	Escenarios planteados	106
6.3.2.	Resultado en el Solver	109
6.4.	<i>Análisis de costes de cada escenario</i>	112
6.4.1.	Costes de almacenamiento	112
6.4.2.	Costes de mano de obra y envíos	113
6.4.3.	Cálculo de precios y selección del mínimo	115
7	Conclusiones	117
7.1.	<i>Análisis de los resultados obtenidos</i>	117
7.2.	<i>Futuras líneas de actuación</i>	118
	Referencias	120

Índice de Tablas

Tabla 4-1: Volumen mensual de concentradores	67
Tabla 5-1: Procesos principales en el modelo	71
Tabla 5-2: Subprocesos del modelo	72
Tabla 5-3: Tareas asociadas al proceso Recepción de equipos y materiales	74
Tabla 5-4: Tareas asociadas al proceso Ensamblado y preparación de equipos	74
Tabla 5-5: Tareas asociadas al proceso Envío de kits de instalación	75
Tabla 5-6: Tiempos asociados al proceso Ensamblado y preparación de equipos	76
Tabla 5-7: Tiempos asociados al proceso Ensamblado y preparación de equipos	77
Tabla 5-8: Tiempos asociados al proceso Envío de kits de instalación	77
Tabla 5-9: Peso relativo de cada uno de los procesos principales	77
Tabla 5-10: Peso relativo de cada uno de los subprocesos	78
Tabla 5-11: Tiempos por tarea el modelo	80
Tabla 5-12: Tareas del modelo	88
Tabla 6-1: Tiempos unitarios	93
Tabla 6-2: Tiempos medios por operario	94
Tabla 6-3: Distribución de operaciones para dos operarios	94
Tabla 6-4: Distribución de operaciones para tres operarios	95
Tabla 6-5: Distribución de operaciones para cuatro operarios	96
Tabla 6-6: Distribución de operaciones para cinco operarios	96
Tabla 6-7: Distribución de operaciones para seis operarios	97
Tabla 6-8: Distribución de tiempos por operario	97
Tabla 6-9: Tiempos obtenidos para los escenarios de operarios sin asignar	98
Tabla 6-10: Tiempos obtenidos para los escenarios de operarios con tareas asignadas	99
Tabla 6-11: Producción mensual y semanal obtenida para operarios sin asignar	101
Tabla 6-12: Producción mensual y semanal obtenida para operarios asignados	101
Tabla 6-13: Superficie ocupada por cada elemento del modelo	102
Tabla 6-14: Relación de colas y el elemento asociado	103
Tabla 6-15: Colas máximas por escenarios (1 de 3)	104
Tabla 6-16: Colas máximas por escenarios (2 de 3)	105
Tabla 6-17: Colas máximas por escenarios (3 de 3)	106
Tabla 6-18: Superficie mínima de cada escenario	106
Tabla 6-19: Superficie mínima de cada escenario	107
Tabla 6-20: Esquemas utilizados para el equilibrado de líneas	109
Tabla 6-21: Tiempos (h) por estación	110
Tabla 6-22: Tiempo de ciclo (h) y tiempo total (h) de cada escenario	110

Tabla 6-23: Tiempos obtenidos para los escenarios resueltos a través de SALBP2	111
Tabla 6-24: Producción mensual y semanal obtenida a través de SALBP2	111
Tabla 6-25: Necesidades parciales de almacenamiento en cada escenario de SALBP2	112
Tabla 6-26: Necesidades totales de almacenamiento en cada escenario de SALBP2	112
Tabla 6-27: Costes almacenamiento (1 de 3)	113
Tabla 6-28: Costes almacenamiento (2 de 3)	113
Tabla 6-29: Costes almacenamiento (3 de 3)	113
Tabla 6-30: Costes envíos (1 de 3)	114
Tabla 6-31: Costes envíos (2 de 3)	114
Tabla 6-32: Costes envíos (3 de 3)	115
Tabla 6-33: Precio objetivo de cada escenario	115
Tabla 6-34: Configuración de tareas por estación	116

Índice de Figuras

Figura 2-1: Modelado ProModel	36
Figura 2-2: Ejecución del modelo en ProModel	37
Figura 2-3: Resultados y análisis	37
Figura 2-4: Detalle del módulo Parts	38
Figura 2-5: Detalle del módulo Machines	38
Figura 2-6: Detalle del módulo Conveyer	38
Figura 2-7: Definición del modelo	39
Figura 2-8: Muestra de resultados	39
Figura 2-9: Modelo con sus módulos	40
Figura 2-10: Detalle de informe	40
Figura 2-11: Ventana principal de Arena	41
Figura 2-12: Módulo Create	42
Figura 2-13: Módulo Dispose	42
Figura 2-14: Módulo Process	43
Figura 2-15: Módulo Decide	43
Figura 2-16: Módulo Batch	43
Figura 2-17: Módulo Separate	44
Figura 2-18: Módulo Assign	44
Figura 2-19: Módulo Record	44
Figura 2-20: Módulo Hold	45
Figura 2-21: Módulo Match	45
Figura 2-22: Módulo Signal	45
Figura 2-23: Módulo de datos Entity	46
Figura 2-24: Módulo de datos Queue	46
Figura 2-25: Módulo de datos Resource	47
Figura 2-26: Módulo de datos Variable	47
Figura 2-27: Módulo de datos Schedule	48
Figura 2-28: Módulo de datos Set	48
Figura 4-1: Sistema de Generación-Distribución tradicional	55
Figura 4-2: Relaciones entre los distintos agentes de una smartgrid	58
Figura 4-3: Relación tradicional entre agentes del sistema eléctrico	59
Figura 4-4: Nuevo sistema relacional entre los agentes del sistema eléctrico	60
Figura 4-5: Primera configuración para el kit de instalación	68
Figura 4-6: Segunda configuración para el kit de instalación	68
Figura 4-5: Configuración seleccionada para el kit de instalación	69

Figura 5-1: Diagrama de flujo del modelo	76
Figura 5-2: Módulo para la creación de la entidad Concentrador	78
Figura 5-3: Parámetros de los módulos Create generados en el modelo	79
Figura 5-4: Módulo Dispose para la salida de las entidades del modelo	79
Figura 5-5: Módulo Process de la tarea Ensamblado Módem	79
Figura 5-6: Parámetros de los módulos Process generados en el modelo	80
Figura 5-7: Módulo Batch de la tarea Colocación Kits	81
Figura 5-8: Parámetros de los módulos Batch generados en el modelo	81
Figura 5-9: Módulo Separate de la tarea Extracción Módem	81
Figura 5-10: Parámetros de los módulos Separate generados en el modelo	81
Figura 5-11: Módulo Match de la tarea Recopilación Cables	82
Figura 5-12: Parámetros de los módulos Match generados en el modelo	82
Figura 5-13: Parámetros del módulo de datos Entity generados en el modelo	82
Figura 5-14: Parámetros del módulo de datos Resource generados en el modelo	82
Figura 5-15: Definición del calendario Jornada que servirá para parametrizar los recursos	83
Figura 5-16: Vista completa del modelo de simulación en Arena	84
Figura 5-17: Modelado en Arena de los procesos de recepción y procesado de concentradores	85
Figura 5-18: Modelado en Arena de los procesos de recepción y procesado de módem	85
Figura 5-19: Modelado en Arena de los procesos de recepción de tarjetas SIM	85
Figura 5-20: Modelado en Arena de los procesos de ensamblado de cable y ensamblado de módems	86
Figura 5-21: Modelado en Arena de los procesos preparación de envíos	86
Figura 5-22: Diagrama de precedencias del modelo	88
Figura 5-23: Introducción del tiempo de ciclo entre las variables del sistema	89
Figura 5-24: Introducción del tiempo de ciclo entre las variables del sistema	90
Figura 6-1: Gráfica de evolución del tiempo respecto al número de operarios	98
Figura 6-2: Gráfica de variación de horas al aumentar el número de operarios	98
Figura 6-3: Gráfica de evolución del tiempo respecto al número de operarios	99
Figura 6-4: Gráfica de variación de horas al aumentar el número de operarios	100
Figura 6-5: Gráfica de comparación de tiempos entre operarios sin asignar y asignados	100
Figura 6-6: Gráfica de producción semanal por número de operarios para operarios sin asignar	101
Figura 6-7: Gráfica de producción semanal por número de operarios para operarios asignados	102
Figura 6-8: Modelo de precedencias	107
Figura 6-9: Modelo de precedencias	111
Figura 6-10: Modelo de precedencias	116

1 OBJETIVO Y ALCANCE

En los últimos años se ha producido un incremento del uso de generación de energía eléctrica de carácter distribuido. De hecho, debido a la expansión de las energías renovables y de las tecnologías de la información, el sistema de distribución de energía eléctrica ha ido mutando desde un sistema unidireccional, donde el consumidor solo era un mero receptor de un producto, en este caso la energía, hacia un sistema donde todos los agentes tienen un papel relevante y es importante conocer en todo momento tanto la oferta de energía como la demanda de la misma.

Por este motivo, cada vez más se hace necesario disponer de sistemas que permitan controlar el flujo de información desde los consumidores finales hasta los productores de energía y viceversa. El desarrollo de estos sistemas y su integración en los sistemas actuales de distribución es lo que se ha pasado a llamar las redes inteligentes.

De este modo lo que se persigue con la implantación de estos sistemas es, por una parte facilitar la gestión de la oferta de energía por parte de los productores, pero por otra también se busca que los consumidores puedan optimizar el uso de su energía.

Y como se detallará en el presente proyecto, una parte de estos sistemas la compondrá el concentrador, que se encarga de recibir información en tiempo real de los contadores de los consumidores y enviarla a los centros de gestión de la demanda, y a su vez es capaz de enviar órdenes a los equipos de medida proveniente de los gestores de la red.

Estos concentradores deben ser instalados en paralelo a la renovación que se hará de los contadores, lo que requerirá que ésta se haga de la forma más eficiente posible. Y para ello es para lo que se implementa un centro desde el que gestionar sus envíos.

Además, tal y como se detallará en el proyecto, los concentradores llevarán asociados otros elementos como son un módem y una tarjeta SIM que requerirá que sean procesados antes de ser enviados por lo que será necesario analizar las diferentes operaciones a llevar a cabo con el fin de conseguir optimizar los procesos y gestionarlo de la forma más eficiente posible.

1.1 Objetivos y alcance del Proyecto

El objetivo principal de este proyecto es el diseño eficiente de un centro logístico que permita una correcta implantación de los concentradores.

Para ello el proyecto se dividirá en varias fases. Una primera fase en la que se definirán las características y las funciones que deberá cumplir el propio centro logístico para cubrir las necesidades de la implantación masiva de estos equipos.

De esta primera fase se obtendrá la desagregación del montaje de un equipo en tareas que permitirán definir luego el modelo de simulación, y los tiempos asociados a cada una de ellas.

Una segunda fase donde se definirá un modelo de simulación con el que ensayar varios escenarios, con la intención de comprobar posibles soluciones eficientes en costes y tiempos.

El proyecto continuará con una tercera fase donde se buscará optimizar, a través de la resolución del problema de equilibrado de líneas, los escenarios más favorables detectados en la simulación, y más específicamente en minimizar el tiempo de ciclo posible para un determinado número de estaciones de trabajo.

En la última fase, se utilizarán los resultados obtenidos para encontrar el escenario que pueda aportar el precio de producto más bajo a partir del coste calculado y un margen propuesto. Para ello, primero se realizará un

estudio de costes asociados a cada uno de los escenarios. Principalmente se focalizará en tres costes, el coste de almacenamiento, el coste de mano de obra y el coste de los envíos. Para comparar el coste de almacenamiento entre los distintos escenarios, se recurrirá al estudio de las distintas colas que se forman en el modelo, ya sea en la fase de simulación o en la de equilibrado de líneas. Los costes de mano de obra están directamente relacionados al número de operarios, que viene determinado en cada ensayo y el coste de envíos se calculará a partir del número de salidas que aporte cada escenario estudiado.

Con los costes y la producción de cada escenario se calculará el precio unitario en cada uno de los escenarios, permitiendo así encontrar el escenario que ofrece el precio más bajo.

1.2 Estructura del proyecto

El presente proyecto se estructura en tres bloques, constituido por siete capítulos.

El primer bloque, formado por los capítulos 2 y 3, se corresponde con una introducción a las herramientas principales que se utilizarán en el proyecto. Esto es, una descripción de qué se entiende por Simulación Discreta y en qué consiste el problema de Equilibrado de líneas en las líneas de fabricación.

El segundo bloque comprende el capítulo 4, donde se definirá el centro de gestión de concentradores, junto a sus funciones principales y los motivos por los que se hace necesario implementarlo. En este capítulo se mostrará el centro de gestión de concentradores como un centro logístico, pero también la forma de realizar un ensamblado sobre algunas piezas de los equipos que se reciban. Precisamente este procesado de los equipos es el que determina que se realice una optimización de tiempos y de procesos de cara a mejorar la productividad del mismo. Con este fin, en este capítulo se mostrará cómo se realizó el estudio del proceso para determinar las distintas tareas que lo componen, así como la medición de tiempos de cada una de ellas. Igualmente se mostrará el estudio que se realizó para determinar de qué forma debían ser embalados los equipos antes de ser enviados, de forma que al centro de gestión de concentradores llegasen equipos individuales, y se preparasen y agrupasen en kits que permiten una instalación rápida y sencilla.

En el último bloque, compuesto por los capítulos 5 y 6, se muestra cómo se ha modelado el problema de ensamblado de los concentradores mediante las distintas herramientas, tanto de simulación como de equilibrado de líneas. Así, se indican los criterios seguidos a la hora de montar el modelo del sistema y los parámetros que aplican en cada módulo del sistema. Igualmente para el problema de equilibrado de líneas se especifica cómo se han organizado las distintas restricciones del problema en función de cada escenario. Para finalmente mostrar qué método se va a seguir para calcular los precios unitarios de cada escenario. Finalmente, se muestran los resultados de la experimentación (capítulo 6), donde se obtendrán los tiempos y la tasa de producción de cada escenario, junto con las colas que se generarán. Con estos resultados se pasará a la última parte del proyecto y objetivo principal, la determinación del escenario que presente el precio más bajo. Para ello se calculará tal y como se especificaba en el bloque anterior, a partir de los costes y la cantidad de equipos producidos, obteniéndose así un escenario óptimo del proyecto.

2 SIMULACIÓN DISCRETA

En el presente capítulo se pretende dar una visión global sobre el concepto de simulación y más concretamente el de simulación discreta, así como de la herramienta que se utilizará para realizar dicha simulación.

Para ello se definirán los principales conceptos relativos a la simulación y se describirán las etapas básicas en las que tiene que basarse una simulación, enumerando las ventajas de crear un modelo frente a realizar pruebas en un sistema real.

Por último, se enumerarán diferentes herramientas de simulación discreta existentes y se realizará una descripción de la herramienta Arena que será el programa utilizado para realizar las simulaciones del presente proyecto.

2.1 Definición de Simulación

2.1.1. Definiciones

En la vida real existen situaciones o problemas cuya resolución no es posible o es muy complicada de alcanzar, sin que ello suponga una elevada inversión, ya sea económica, en recursos o en tiempo. Con este fin surge la necesidad de crear modelos algo más simplificados que permitan deducir qué sucedería ante determinadas situaciones sin necesidad de llevarlas a cabo de forma real.

Algunos ejemplos de situaciones reales donde cada vez se utiliza más la simulación para obtener o bien soluciones a distintos problemas planteados o la búsqueda de la situación óptima entre las distintas opciones que presente el problema, se pueden encontrar las siguientes:

- Tráfico urbano.
- Tráfico de comunicaciones.
- Líneas de montaje.
- Asignación de trabajadores a procesos.
- Gestión de inventarios.
- Puntos de atención al cliente

Como se puede apreciar para estos ejemplos, sería muy complicado replicar cualquier situación desde un punto de vista experimental sin que ello implicase elevados costes o la necesidad de utilizar un número elevado de recursos.

De este modo la situación a estudiar se definirá como un sistema, la cual se simplificará a través de un modelo, y será resuelta de forma experimental (físicamente o analíticamente) o a través de la simulación.

En el resto de este apartado, se definirán más en detalle los conceptos de Sistema, Modelo y Simulación.

2.1.1.1 Sistema

El Sistema es el conjunto de elementos relacionados entre sí que define la realidad que se pretende estudiar. Estos sistemas pueden pertenecer a su vez a sistemas más amplios, pero no sean necesarios definirlos al no ser objeto del estudio. Como ejemplo, si se quiere estudiar una operación concreta de una línea de montaje o fabricación, no sería necesario definir toda la línea, sino que bastaría con que se definiese los elementos que

intervienen en dicha operación para estudiar dicho sistema.

Los sistemas se pueden clasificar de la siguiente forma [1]:

- **Sistemas Deterministas o Sistemas Estocásticos:** un sistema determinista es aquel en el que se supone que los datos se conocen con certeza, mientras que un sistema estocástico o sistema probabilístico es aquel en el que algún elemento no se conoce con antelación, incorporando así la incertidumbre.
 - **Sistemas deterministas:** un sistema es determinista cuando las mismas entradas producirán las mismas salidas, no existiendo ni el azar ni el principio de incertidumbre. Un ejemplo de sistema determinista es una línea de producción.
 - **Sistemas estocásticos:** un sistema es estocástico cuando al menos una variable del mismo es tomada como un dato al azar (aleatoria) o una probabilidad. Un ejemplo de sistema estocástico podría ser una línea de producción donde aparezcan averías.
- **Sistemas Dinámicos o Sistemas Estáticos:** un sistema dinámico es aquel en el que todas o al menos una de sus variables de estado evolucionan a lo largo del tiempo, mientras que un sistema estático es aquel en el que sus variables de estado no varían con el paso del tiempo.
 - **Sistema dinámico:** un sistema es dinámico si las salidas dependen de las entradas actuales y de las entradas previas (historia). Un ejemplo de sistema dinámico es un depósito con un caudal de entrada y de salida, donde además de dicho caudal depende del nivel anterior.
 - **Sistema estático:** un sistema es estático si las salidas sólo dependen de las entradas. Un ejemplo de sistema estático es un motor eléctrico donde la velocidad de giro solo depende de la tensión de entrada.
- **Sistemas Discretos o Sistemas Continuos:** un sistema discreto es aquel en el que las variables de estado cambian instantáneamente en instantes separados de tiempo
 - **Sistema discreto:** un sistema es discreto si las entradas que provocan el cambio del estado del mismo suceden en instantes espaciados en el tiempo. Un ejemplo de sistema discreto es el número de clientes en un banco.
 - **Sistema continuo:** un sistema es continuo si las entradas que provocan el cambio de estado del mismo suceden de forma continua en el tiempo. Un ejemplo de sistema continuo es un avión en vuelo, donde en todo instante se tiene una velocidad, altura, posición, etc.

2.1.1.2 Modelo

El Modelo es una representación de un sistema real simplificado, donde se representan las variables a medir. Es decir, lo que se pretende con el modelo no es conocer cómo se comportará todo el modelo ante cualquier situación, sino cómo actuará ante determinados eventos que lo modifiquen. Por este motivo el modelo debe generarse con las variables relevantes para el objetivo buscado.

Dentro de los modelos se pueden distinguir dos categorías principales [1]:

- **Modelo físico:** consiste en una representación física del sistema real, normalmente a escala o una parte de él, que permite estudiar las variables en estudio. Un ejemplo de modelo físico sería una maqueta de un avión o de un ala del mismo, que permite ver cómo se comporta el flujo de aire al pasar por sus superficies.
- **Modelo matemático:** consiste en un sistema simplificado a través de formulación matemática o algoritmos que permitan su resolución. Como ejemplos de este tipo de modelos se puede nombrar la programación lineal, la geometría y la física, aplicados a cualquier sistema que cumpla dichas ecuaciones y restricciones. Y en función del método de resolución estos modelos se pueden subdividir en:
 - **Modelos analíticos:** son aquellos que pueden ser resueltos íntegramente desde un punto de vista matemático. Este tipo de sistemas suelen implicar altos costes de tiempos y de recursos de cálculo.
 - **Modelos de simulación:** son aquellos en los que no es posible encontrar una solución analítica. En estos casos al modelo se le plantean algunas variables de entrada y se le solicitan las salidas que se obtendrían. Normalmente este tipo de análisis lo que busca es el punto óptimo o el más desfavorable, desde un punto de vista cuantitativo y/o cualitativo.

2.1.1.3 Simulación

La Simulación es la resolución cualitativa y/o cuantitativa de un sistema modelado a través de un modelo matemático, el cual no es posible resolver únicamente a través de las ecuaciones que rigen sus variables de estado. Para ello se utilizan hipótesis que fijan los parámetros de partida y se estudian los resultados obtenidos.

Dicho de otra forma, la simulación se puede definir como el hecho de representar una situación real a través de otro proceso más simplificado pero que continúa conservando las características principales del sistema real, permitiendo así analizar sus variables principales.

De esta forma, y tal como se ha adelantado en apartados anteriores, nos permite comprobar diferentes escenarios sin necesidad de implementarlos de forma real. Además, la simulación permite variar la velocidad del tiempo (en el caso de los modelos de sistemas continuos) o en que ocurren los eventos (en el caso de los modelos de sistemas discretos), de forma que se reducen los tiempos de análisis al disponer de resultados con mayor rapidez.

Por último, la simulación aporta la posibilidad de comprender como se comporta un sistema independientemente del resultado analítico.

2.1.2. Simulación Continua vs Simulación Discreta

En este apartado se va a analizar cómo se debe realizar el modelado de cara a la simulación, condicionado si es una simulación continua o una simulación por eventos discretos.

Con este fin, se va a comentar la diferencia entre variables continuas y variables discreta [1]:

- Variable continua: es aquella que puede tomar infinitos valores dentro de un intervalo dado. Es decir, entre dos valores de una variable, siempre existirá un valor intermedio. Por este motivo, una variable continua toma valores a lo largo de un continuo, como puede ser el tiempo, la temperatura, la altura, etc.
- Variable discreta: es aquella que no puede tomar infinitos valores dentro de un intervalo dado. Es decir, entre dos valores de una variable no siempre existirá un valor intermedio. Por este motivo, una variable discreta solo tomará valores de un conjunto dado (sin continuidad), como puede ser, estado encendido o apagado.

A la hora de definir el modelo a simular, es importante conocer qué es lo que se quiere estudiar de cara a poder caracterizar el modelo correctamente, y, una vez hecho esto, conocer de qué y cómo depende lo que se quiere modelar, y en qué medida se trata de un sistema con variables continuas o por el contrario consiste en un sistema con variables discretas.

Además de esto, cabe destacar que, en algunos casos, no siempre un sistema continuo o discreto se tiene que modelar como tal. Para ello se va a mostrar un ejemplo que puede servir de aclaración. Así si por ejemplo se quiere estudiar el comportamiento del tráfico de un aeropuerto, se tendría un sistema continuo, donde la continuidad la da el tiempo.

Pero puede que lo que se quiera estudiar sea conocer el número de aviones que en cada momento se encuentran en tierra, en vuelo, en zona de despegue y en zona de aproximación. Esto reduciría el problema a variables que no dependen del tiempo, sino del estado del avión, que solo puede ser uno de los que se definan para el problema dado.

De este modo se puede comprobar cómo un caso donde se tiene un sistema continuo en el tiempo se puede modelar como un modelo con variables discretas.

Por todo lo descrito en este apartado es importante conocer los objetivos de cada proyecto y así poder optar entre un modelo con variables continuas y un modelo con variables discretas.

El caso que nos ocupa, y como se constatará más adelante, consiste en un sistema que se puede modelar con variables discreta, por lo que se optará por una simulación de eventos discreta.

2.2. Características de la Simulación

2.2.1. Etapas a realizar en la Simulación

Para el desarrollo de un estudio por simulación, de cara a tener el modelo lo mejor definido posible, se deben seguir las siguientes etapas [2]:

- **Definición del sistema:** consiste en estudiar el problema, identificar los objetivos del proyecto, especificar las variables a medir, establecer los objetivos específicos del modelado y definir el sistema que se va a modelar.
- **Formulación del modelo:** una vez definido el sistema y los objetivos, se define y construye el modelo. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa el modelo.
- **Recopilación de datos:** es importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados.
- **Implementación del modelo en el ordenador:** una vez definido el modelo, el siguiente paso es decidir qué lenguaje de programación o qué paquete de software se va a utilizar para realizar la simulación en el ordenador. En nuestro caso será el programa Arena de Rockwell.
- **Verificación:** el proceso de verificación consiste en comprobar que el modelo simulado cumple con los requisitos de diseño para los que se elaboró. En definitiva, consiste en evaluar que el modelo se comporta de acuerdo a su diseño.
- **Validación:** a través de esta etapa se valoran las diferencias entre el funcionamiento de la simulación y el sistema real que se está tratando de simular. Esta validación se puede realizar a través de una o algunas de los siguientes métodos:
 - La consulta con expertos tanto en simulación como en los sistemas a estudiar.
 - La exactitud con que se predicen datos históricos.
 - La exactitud en la predicción del futuro.
 - La comprobación de que el modelo de simulación produce un fallo cuando se utilizan datos que hacen fallar al sistema real.
- **Experimentación:** la experimentación con el modelo se realiza después que este haya sido validado. La experimentación consiste en comprobar los datos generados como deseados y en realizar un análisis de sensibilidad de las variables a medir.
- **Interpretación:** en esta etapa del estudio, se interpretan los resultados aportados por la simulación y se realiza la toma de decisiones.

2.2.2. Ventajas de la Simulación

Si bien la creación de un proyecto de simulación puede requerir más tiempo al comienzo del proyecto, las mejoras en los tiempos de los procesos y las optimizaciones de productos pueden reducir el tiempo total del mismo, aumentando así los beneficios. Las principales ventajas de realizar la simulación son las siguientes:

- Posibilidad de explorar diferentes alternativas a un mismo problema que de otra forma no sería posible.
- Capacidad de visualizar el sistema de forma global.
- Visualización del efecto de un cambio en un proceso.
- Posibilidad de explorar nuevos procedimientos o escenarios sin interrumpir el sistema actual.
- Diagnosticar y solucionar problemas.
- Reducción del riesgo económico al evitar realizar grandes inversiones en equipos y recursos hasta tener definido el proceso óptimo.

2.3. Diferentes herramientas de Simulación Discreta

Una vez definida la simulación, así como relacionadas las etapas y ventajas de la misma, se va a proceder a relacionar de manera somera algunas herramientas de simulación discreta existentes en el mercado.

Como se comprobará en los siguientes apartados, todos los programas son similares en tanto en cuanto, permiten visualizar de forma general el proceso a simular, incluyendo en muchos casos simulaciones gráficas que permiten realizar dicha visualización de una forma más efectiva.

2.3.1. Pro-model

ProModel es un simulador con animación para ordenadores personales. Permite simular cualquier tipo de sistemas de manufactura, logística, conducción de materiales, etc. Se pueden simular bandas de transporte, grúas viajeras, ensamblado, corte, talleres, logística, etc.

Aunque es posible su programación, ProModel se puede utilizar sin necesidad de ella. Presenta una buena combinación entre facilidad y flexibilidad para aplicaciones complejas. Es posible simular Just In Time, Teoría de Restricciones, Sistemas Push, Logística, etc.

Una vez hecho el modelo, éste puede ser optimizado para encontrar los valores óptimos de los parámetros claves del mismo. Algunos ejemplos incluyen determinar la mejor combinación de factores para maximizar producción minimizando costo, minimizar el número de camiones sin penalizar el servicio, etc.

El módulo de optimización ayuda a encontrar rápidamente una solución óptima, en lugar de tener que hacer una optimización por prueba y error.

A continuación, se enumeran los 4 componentes principales en los que se fundamenta ProModel

- *Entities*: son aquellos elementos que son procesados dentro del sistema. Es decir, son aquellas personas, partes, documentos, productos, etc. que ingresan al sistema para ser transformados en productos finales o clientes atendidos. Como es de esperar, estas entidades son altamente dinámicas, ya que pasan de una estación de servicio o máquina, a otra.
- *Locations*: representa a las máquinas o personas que atienden, procesan, transforman, etc. a las entidades. Consiguientemente, son estáticas dentro del sistema, ya que no es de esperarse que una máquina se mueva de un lugar a otro.
- *Arrivals*: este componente define cómo será alimentado el sistema con entidades; es decir define parámetros tales como la cantidad, tipo, frecuencia y lugar de llegada de las entidades.
- *Processing*: define la forma cómo se moverán las entidades entre las localizaciones. Se encarga igualmente de definir las reglas que determinan cómo procesará cada máquina una entidad y el tiempo de ese proceso.

A continuación, se muestran capturas del programa:

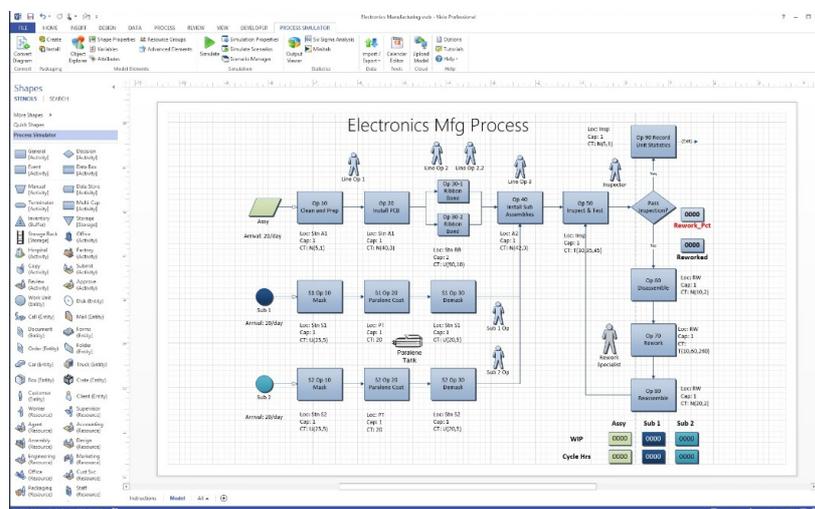


FIGURA 2-1: Modelado ProModel

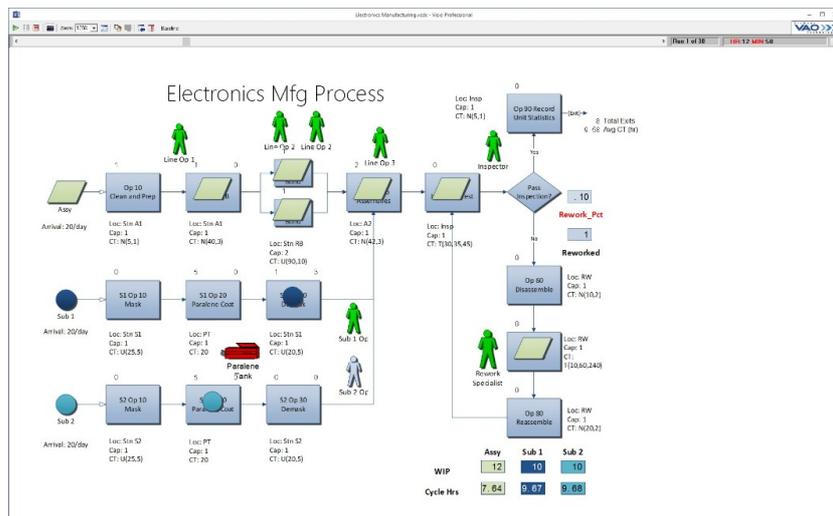


Figura 2-2: Ejecución del modelo en ProModel

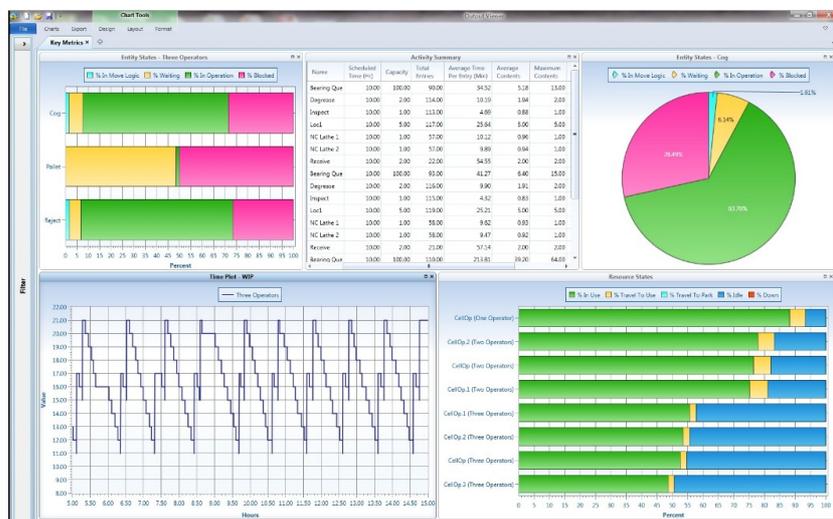


Figura 2-3: Resultados y análisis

2.3.2. WITNESS

El paquete de simulación WITNESS pertenece al grupo británico AT&T Istel. Este grupo lanzó en 1979 un paquete de simulación denominado SEE WHY, el cual ya incluía gráficos animados, y el cual derivó en el lanzamiento den 1986 del paquete WITNESS.

Los principales componentes del modelado son los siguientes:

- *Parts*: componentes físicos o piezas que se mueven por el modelo.
- *Machines*: son los equivalentes a los puestos de trabajo o máquinas.
- *Buffers*: se utilizan como almacenes del sistema.
- *Conveyors*: son equivalentes a las cintas de transporte
- *Labours*: se utiliza para describir a los trabajadores.
- *Tracks & vehicles*: equivalente a los medios de transporte
- *Shift*: se utiliza para definir los turnos de trabajo.

Además, permite la creación de modelos gráficos con movimiento, dotando así a la simulación de claridad y visión global del sistema.

A continuación, se muestran capturas del programa:

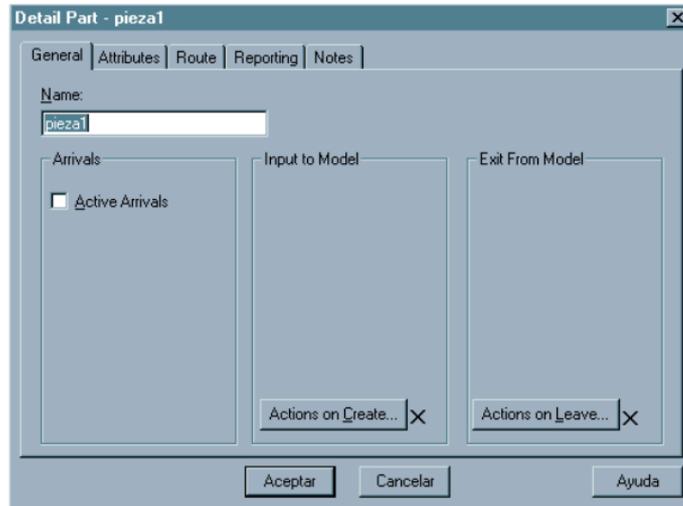


Figura 2-4: Detalle del módulo Parts

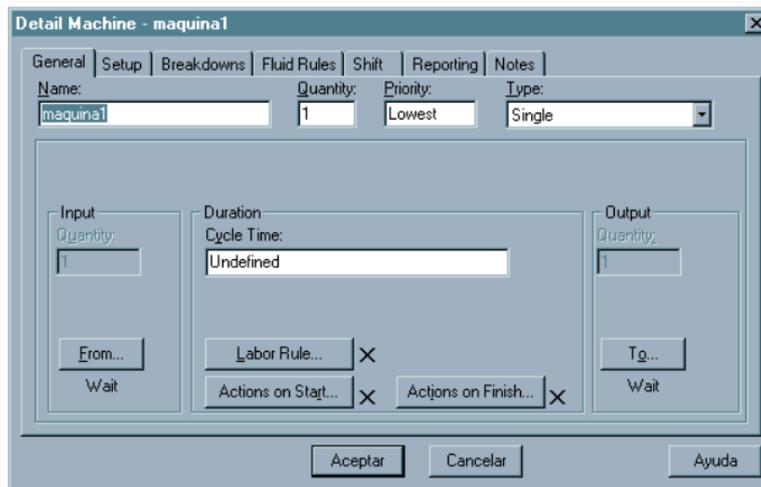


Figura 2-5: Detalle del módulo Machines

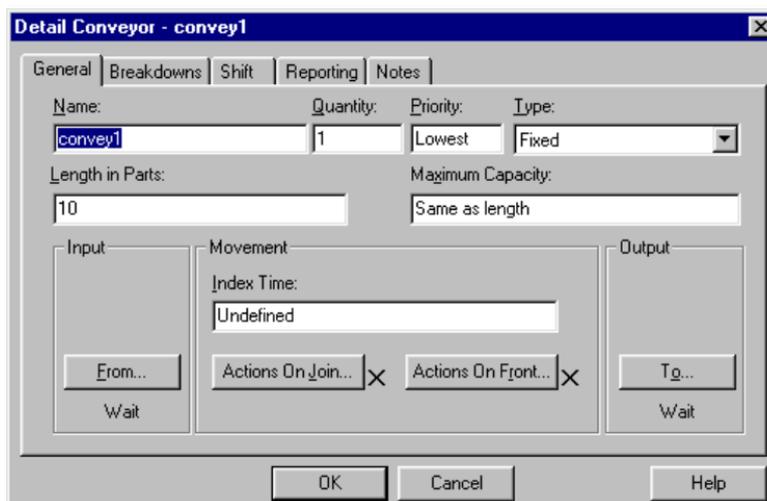


Figura 2-6: Detalle del módulo Conveyor

2.3.3. Automod

AutoMod es un software diseñado para la simulación de sistemas de producción y logística. El software está diseñado para un análisis detallado de operaciones y flujos. Aunque se usa principalmente en la fabricación y el análisis de sistemas de transporte de materiales, la flexibilidad del sistema permite su uso en una amplia gama de áreas de aplicación, desde por ejemplo aeropuertos hasta la industria de semiconductores.

Este software es usado principalmente para crear modelos de simulación de eventos discretos de sistemas de fabricación, líneas de montaje, almacenes, centros de distribución y equipos. Sus usos principales son:

- Comparar escenarios de "qué pasaría si", para predecir los resultados.
- Analizar y optimizar diseños de sistemas alternativos.
- Analizar la lógica de control en tiempo real.
- Hacer un análisis de mejora continua en los sistemas existentes

A través de la simulación, permite reducir el riesgo al verificar que el diseño funcionará según lo planeado. Por último, este software permite construir modelos de simulación visual con los siguientes componentes:

- Animación tridimensional de realidad virtual
- Informes de simulación y gráficos de negocios
- Los modelos pueden ejecutarse en escalas de tiempo aceleradas para un análisis rápido

A continuación, se muestran capturas del programa:



Figura 2-7: Definición del modelo



Figura 2-8: Muestra de resultados

2.3.4. Arena

Arena es un software de simulación y automatización de eventos discretos desarrollado por Systems Modeling y adquirido por Rockwell Automation en 2000.

En Arena se construye un modelo experimental colocando módulos (cajas de diferentes formas) que representan procesos o lógica. Las líneas de conectores se utilizan para unir estos módulos y para especificar el flujo de entidades. Mientras que los módulos tienen acciones específicas relativas a las entidades, el flujo y el tiempo, la representación precisa de cada módulo y entidad relativa a los objetos de la vida real está sujeta a quien la persona que lo modele. Los datos estadísticos, como el tiempo de ciclo y los niveles de WIP (siglas en inglés de trabajo en proceso, *Work In Progress*), se pueden registrar y generar como informes.

De este modo Arena permite:

- Bloques de construcción predefinidos para modelar el proceso sin necesidad de programación.
- Amplia gama de opciones de distribuciones estadísticas para modelar la variabilidad del proceso.
- Métricas de rendimiento, análisis estadístico y generación de informes.

A continuación, se muestran capturas del programa:

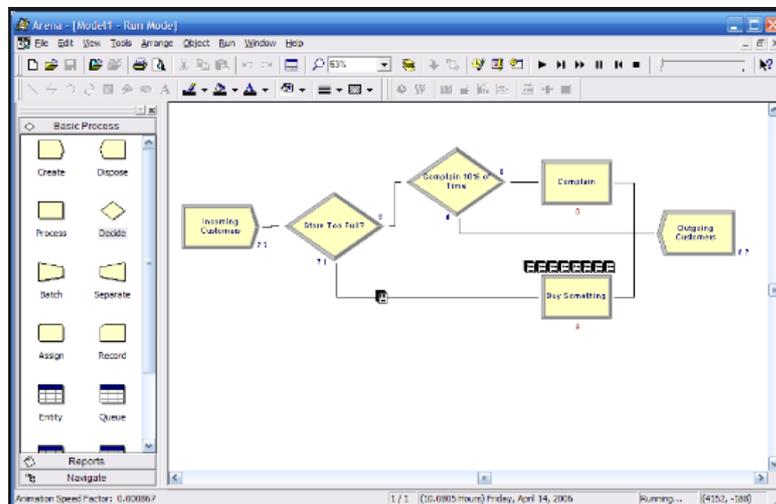


Figura 2-9: Modelo con sus módulos

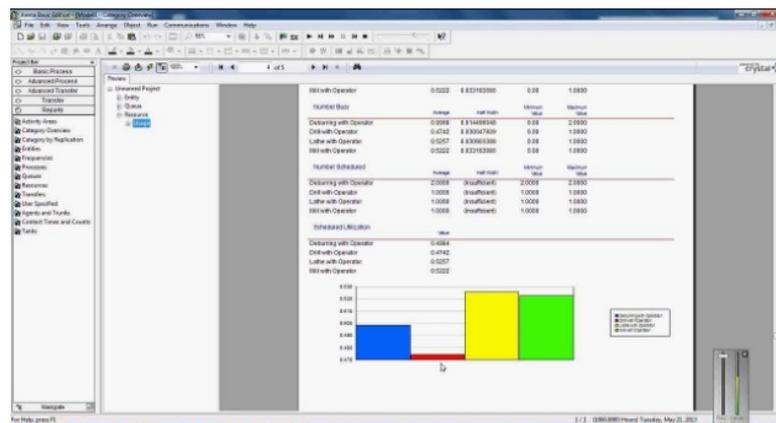


Figura 2-10: Detalle de informe

Para el proyecto que nos ocupa, el software elegido será Arena, por lo que en el siguiente apartado se procederá a realizar una descripción más detallada de su modo de funcionamiento.

2.4. Características de Arena Rockwell

En este apartado se van a describir las principales funcionalidades del software Arena Rockwell que será el elegido para realizar las diferentes simulaciones de eventos discretos.

Arena es un software que combina bastante bien la facilidad de uso con la flexibilidad. De este modo permite modelar procesos y simular el funcionamiento futuro de un sistema para entender las relaciones del mismo e intentar identificar oportunidades de mejora. Permite igualmente la visualización de las operaciones con gráficos de animación dinámica y así analizar cómo funcionará el sistema en su ambiente real.

Como se ha descrito en el anterior apartado, uno de los puntos más relevantes que presenta el software de arena son los bloques o módulos predefinidos, lo cual ahorra mucho tiempo a la hora de caracterizar los diferentes elementos que pertenecen al modelo a simular.

Los módulos son los elementos básicos con los que se puede construir un modelo. Estos son seleccionados desde algunos de los paneles existentes en la barra de proyectos.

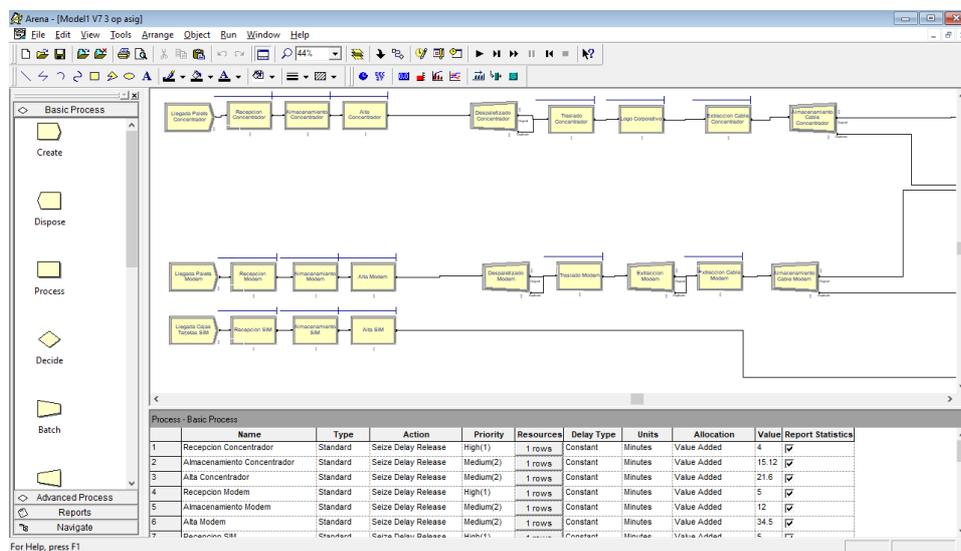


Figura 2-11: Ventana principal de Arena

El diagrama que se construirá con estos módulos describe la dinámica asociada a los procesos que tienen lugar en el sistema. Por este motivo los módulos se pueden describir como los nodos de una red por donde circulan entidades (clientes, materias primas, productos, etc.).

Dentro de la barra de proyectos se distingue entre dos categorías: Basic Process y Advanced Process

2.4.1. Módulos principales

En este apartado se describen los módulos principales tanto del panel de Basic Process como del panel de Advanced Process en Arena.

2.4.1.1 Create

Este módulo es el punto de partida de las entidades en el modelo de simulación. En este módulo se define la entidad que entra en el sistema, el momento en el que se crea la primera de ellas, la cantidad y la frecuencia de creación.

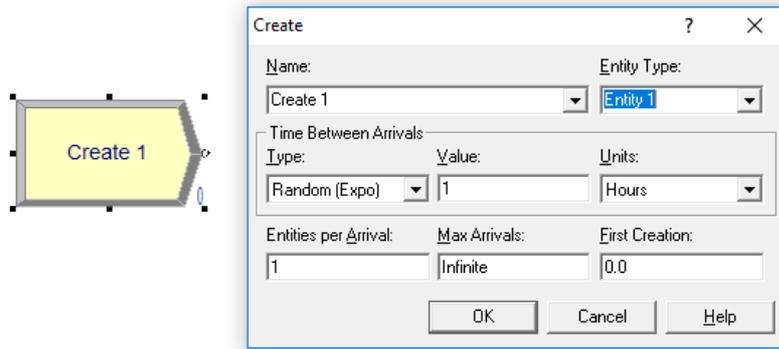


Figura 2-12: Módulo Create

2.4.1.2 Dispose

Este módulo es el punto final de las entidades en el modelo de simulación.

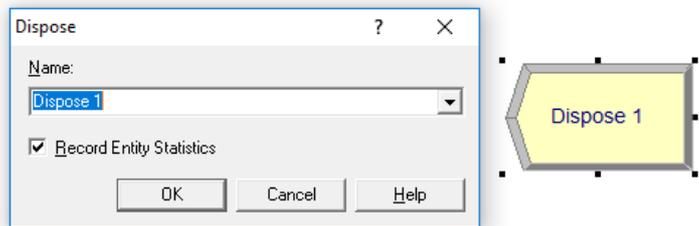


Figura 2-13: Módulo Dispose

2.4.1.3 Process

Este módulo representa el método de proceso principal en el modelo de simulación. Para ello habrá que definir si necesita usar recursos, cuántos, y cómo los utiliza, así como la prioridad de dicho proceso. Además, se definirá el tiempo de procesado, que podrá ser constante o variable definiendo una función para ello (normal, triangular, etc.).

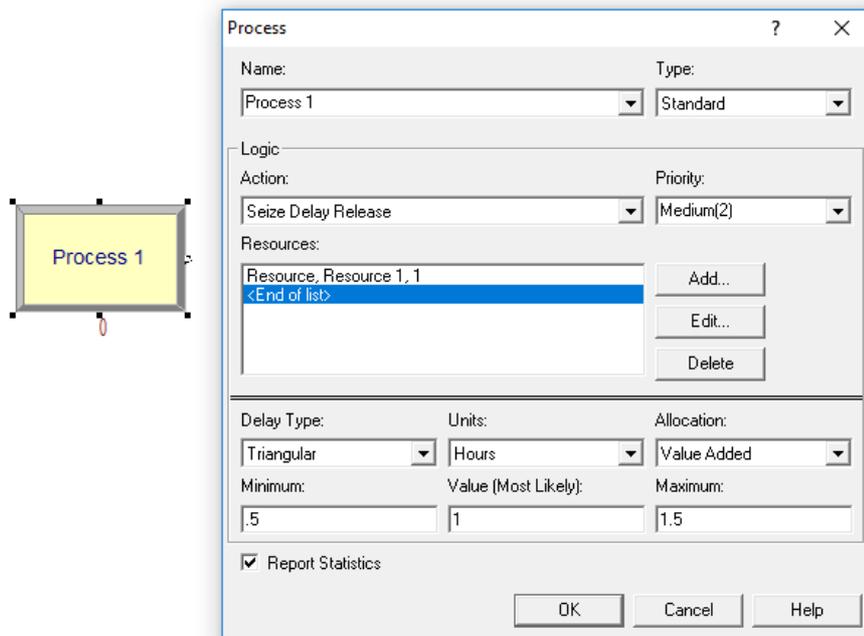


Figura 2-14: Módulo Process

2.4.1.4 Decide

Este módulo permite la toma de decisiones en el modelo de simulación. El módulo permite la toma de decisiones basadas en una o más condiciones.

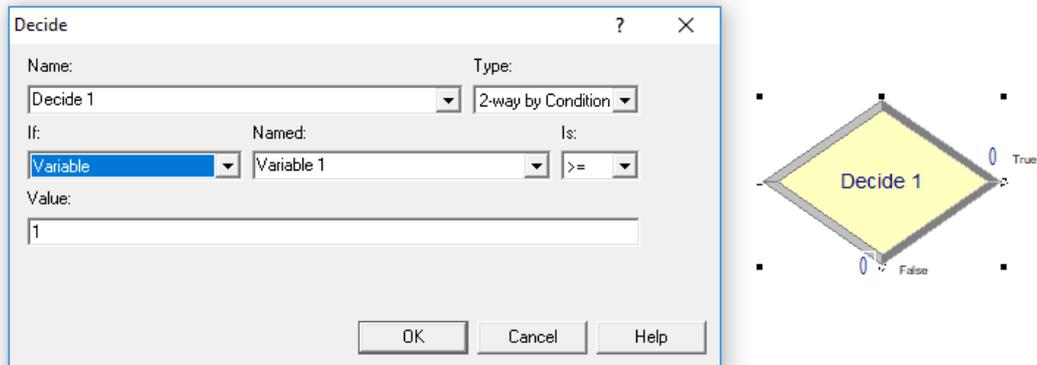


Figura 2-15: Módulo Decide

2.4.1.5 Batch

Este módulo permite la agrupación en lotes o unión de varias entidades. Estos lotes pueden ser permanentes o temporales.

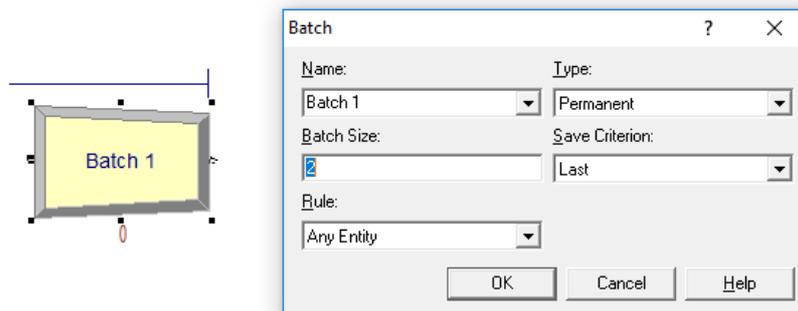


Figura 2-16: Módulo Batch

2.4.1.6 Separate

Este módulo permite duplicar una entidad entrante en múltiples entidades o dividir un lote unido previamente con el módulo Batch.

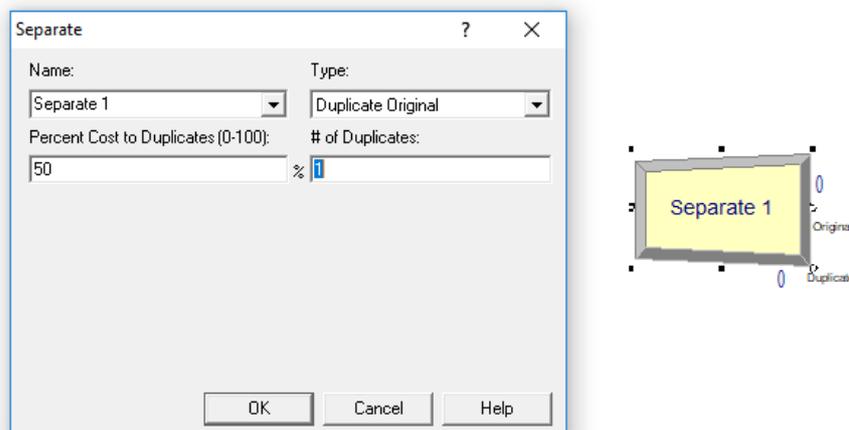


Figura 2-17: Módulo Separate

2.4.1.7 Assign

Este módulo se utiliza para asignar nuevos valores a variables, los atributos de una entidad, el tipo de la entidad, imágenes u otras variables del sistema.

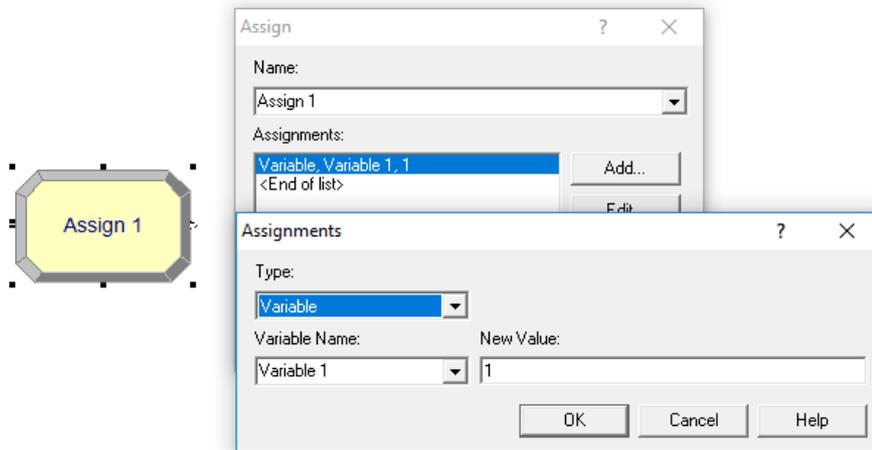


Figura 2-18: Módulo Assign

2.4.1.8 Record

Este módulo representa el final de entidades en el modelo de simulación, registrando las estadísticas de dichas entidades antes de ser eliminadas.

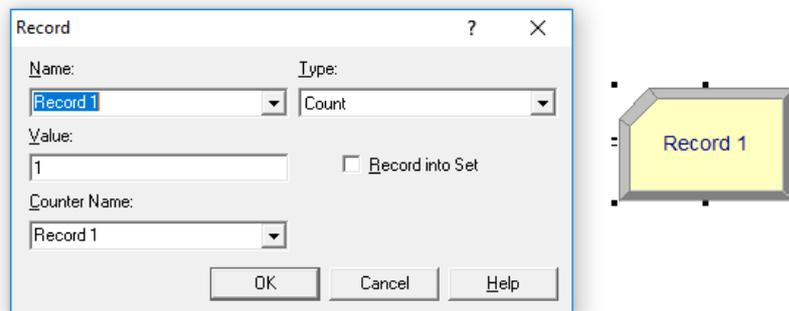


Figura 2-19: Módulo Record

2.4.1.9 Hold

Este módulo se utiliza para retener una entidad en una cola de espera hasta que se produzca una señal o se cumpla una condición determinada.

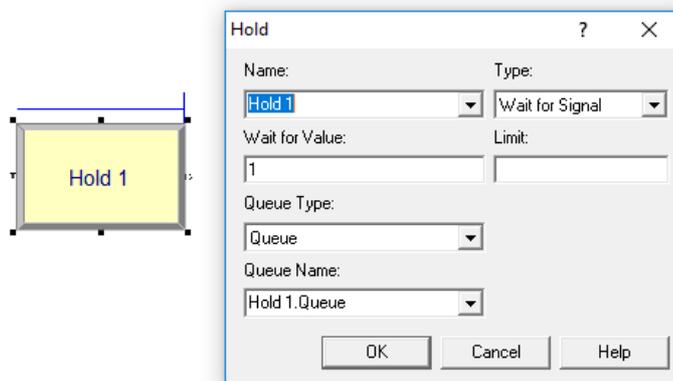


Figura 2-20: Módulo Hold

2.4.1.10 Match

Este módulo se utiliza cuando es necesario que una entidad espere a otra u otras (se define en el módulo). La primera entidad no pasará de este módulo mientras no llegue la segunda o las que se definan en el módulo.

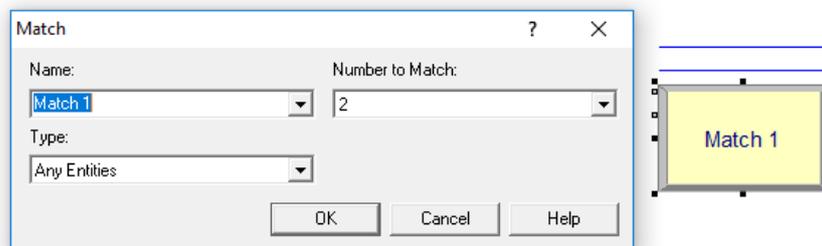


Figura 2-21: Módulo Match

2.4.1.11 Signal

Este módulo envía una señal a los módulos Hold con el fin de que liberen las entidades retenidas. Se define igualmente el número de unidades que se liberarán con la señal.

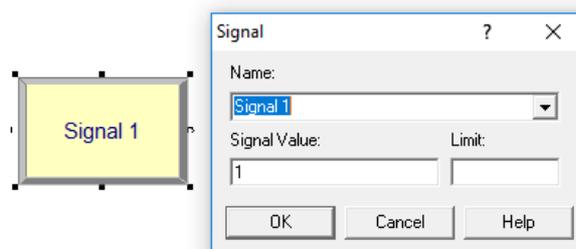


Figura 2-22: Módulo Signal

2.4.2. Módulos de datos (tablas)

En este apartado se describen los módulos de datos (tablas) del panel de proyecto de Basic Process en Arena.

2.4.2.1 Entity

Este módulo de datos define los tipos de entidades diferentes. En este módulo también se definen los costes asociados a cada entidad.

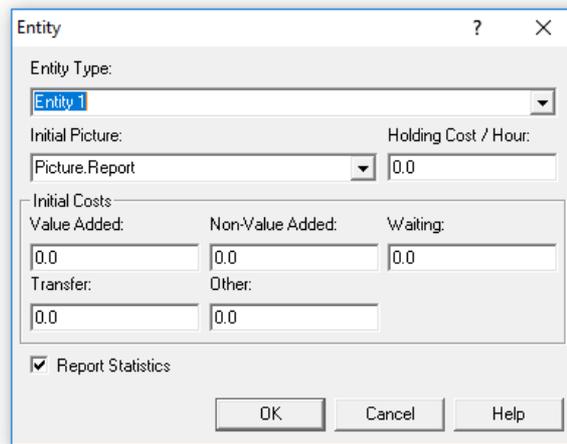


Figura 2-23: Módulo de datos Entity

2.4.2.2 Queue

Este módulo de datos se puede utilizar para establecer la regla de clasificación de una cola determinada (FIFO, LIFO, etc.)

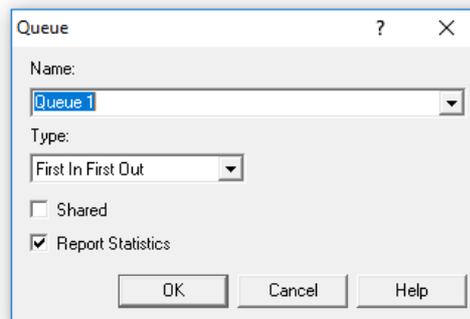


Figura 2-24: Módulo de datos Queue

2.4.2.3 Resource

Este módulo define la información de los recursos en el modelo de simulación. Estos recursos se pueden definir con una capacidad fija o variable, basada en un calendario.

The 'Resource' dialog box includes the following elements:

- Name:** Resource 1
- Type:** Fixed Capacity
- Capacity:** 1
- Costs:**
 - Busy / Hour: 0.0
 - Idle / Hour: 0.0
 - Per Use: 0.0
- StateSet Name:** (empty)
- Failures:** Failure 1, Ignore
- Buttons:** Add..., Edit..., Delete
- Report Statistics:**
- Footer:** OK, Cancel, Help

Figura 2-25: Módulo de datos Resource

2.4.2.4 Variable

Este módulo de datos se utiliza para definir una variable y su valor inicial.

The 'Variable' dialog box includes the following elements:

- Name:** Variable 1
- Rows:** (empty)
- Columns:** (empty)
- Report Statistics:**
- Clear Option:** System
- Initial Values:** <End of list>
- Buttons:** Add..., Edit..., Delete
- Footer:** OK, Cancel, Help

Figura 2-26: Módulo de datos Variable

2.4.2.5 Schedule

Este módulo de datos se puede utilizar para generar la capacidad de los recursos o para generar un calendario con el que se generen nuevas entidades a través del módulo Create en el modelo de simulación.

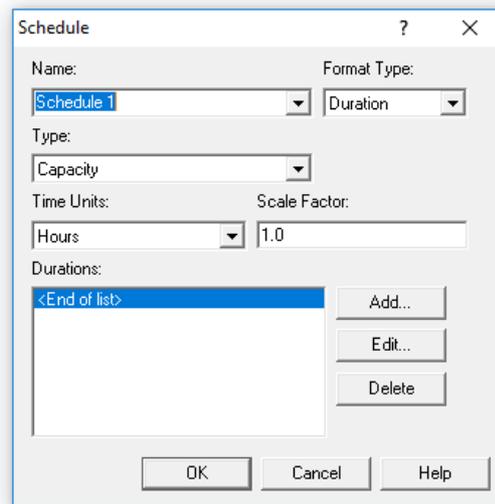


Figura 2-27: Módulo de datos Schedule

2.4.2.6 Set

Este módulo de datos se utiliza para definir conjuntos, que pueden ser de recursos, contadores, cuentas, tipos de entidad y figuras de entidad.

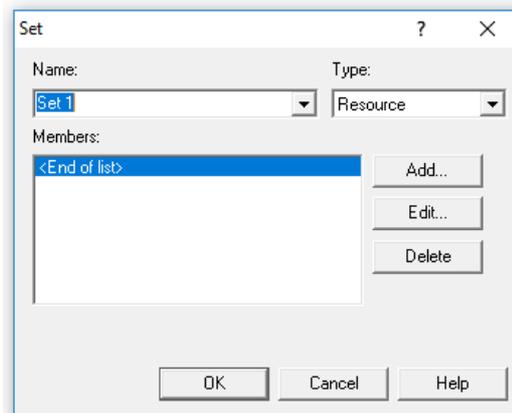


Figura 2-28: Módulo de datos Set

3 EQUILIBRADO DE LÍNEAS

La producción en cadena, producción en serie o fabricación en serie fue un proceso innovador en la producción industrial. Este proceso se basa en la cadena de montaje o línea de producción, en la que la fabricación o producción se organiza de forma que cada trabajador se le asigna una función específica y/o especializada.

La idea surge a principios del siglo XX y, aunque no fue la primera que se ensayó, se popularizó a partir de que Henry Ford la pusiera en práctica en la línea de ensamblado de su producto emblemático, el Ford T. En este sistema los productos van avanzando a través de “estaciones”, donde en cada una de ellas se realiza algún proceso sobre el producto. Por lo tanto, cada estación tiene asignado un único cometido en toda la cadena y con ello un tiempo teórico de procesado.

Con la idea de conseguir un mayor sincronismo entre todas las estaciones de una cadena de producción, surge el análisis de equilibrado de líneas, el cual busca, precisamente, equilibrar los tiempos entre las distintas estaciones, de forma que se reduzcan los tiempos de espera o tiempos muertos en las estaciones.

3.1. Definiciones

A continuación, se van a definir los principales conceptos que intervienen en los problemas de equilibrado de líneas de montaje con un solo modelo de producto y en flujo uniforme [3]:

- Tarea: es una unidad de producción que no puede ser dividida entre dos o más operarios sin que ello provoque interferencias. Esta tiene asignado un tiempo de proceso u operación.
- Estación: es lo que propiamente dicho sería un puesto de trabajo. Consiste en un área dentro de la línea de montaje o fabricación, donde se ejecutan una o varias tareas.
- Tiempo de operación o de proceso: es el tiempo necesario de cada tarea para realizar su proceso de forma completa.
- Tiempo de ciclo: Es el tiempo de permanencia de un elemento de la línea de montaje en una estación. También se puede definir como el tiempo que transcurre en una estación o entre dos salidas consecutivas.

$$C = \frac{\text{Tiempo de producción (diario)}}{\text{Producción (diaria)}}$$

- Tasa de producción: Es el número de unidades producidas por unidad de tiempo. Sería la inversa del tiempo de ciclo.
- Tiempo ocioso o tiempo muerto: Es el tiempo en el que una estación no está produciendo dentro del tiempo de ciclo. Se puede calcular como la diferencia entre el tiempo de ciclo y la suma de tiempos de las tareas asignadas a la estación.

Además, existirán una serie de restricciones que obligan a que unas operaciones deban asignarse en función de unas determinadas condiciones. Esto se puede clasificar de la siguiente forma [3]:

- Relaciones de precedencia: son las más habituales y normales de encontrar. No son más que las relaciones que indican que una tarea no puede ser realizada si previamente no ha sido realizada alguna tarea anterior.
- Restricciones de zona: estas se clasifican según estas tres formas:
 - Zonificación positiva: obliga a que varias tareas se realicen en la misma estación.

- Zonificación negativa: al contrario que en el caso anterior, obliga a que dos tareas no puedan realizarse en la misma estación.
- Zonificación límite: exige que algunas tareas se asignen a estaciones anteriores o posteriores a una dada.

3.2. Características de las líneas de fabricación o montaje

A pesar de que la variabilidad de características en los tipos de líneas de montaje o fabricación es muy elevada, se pueden definir algunas características que serían comunes a la mayoría de ellas [3]:

- Montaje progresivo o flujo uniforme: el proceso de montaje o fabricación se realiza de una manera secuencial y unidireccional.
- Dividida en estaciones: dentro de las cuales se realizan las operaciones o tareas.
- Producción elevada: fundamentalmente están diseñadas para ser capaces de producir elevadas cantidades de productos.
- Flexibilidad limitada: dado que estas tienen una tasa de producción, no es fácil que se adapte a una variación en la demanda del producto.

Además, estas se pueden clasificar en función del tipo de producto, la variabilidad de los tiempos de operación, el tipo de operador, de la distribución en planta, según el ritmo de flujo de la línea y según la forma de entrada de las piezas en la línea.

3.3. El Equilibrado en las líneas de fabricación

Los problemas de líneas de producción más comunes se dividen entre los que se encargan del equilibrado (ALBP: Assembly Line Balance Problem) y los que se encargan de su diseño (ALDP: Assembly Line Design Problem). En el caso que nos ocupa se tratará el problema de equilibrado.

Este problema de equilibrado consiste en asignar las tareas necesarias para la realización del montaje a las distintas estaciones, con las limitaciones que impongan las restricciones de precedencia o de zonificación, y con el objetivo de maximizar la eficiencia en la producción, minimizar los tiempos muertos o minimizar el número de estaciones necesarias.

Por último los problemas de equilibrado se puede dividir principalmente entre dos tipos de problemas: el problema de equilibrado más simple SALBP (Simple Assembly Line Balance Problem) y el problema general GALBP (General Assembly Line Balance Problem). En este proyecto se analizará desde el punto de vista del problema SALBP.

3.4. Los problemas SALBP

Los problemas SALBP se pueden describir por cumplir las siguientes características [3]:

- Producción en masa de productos monomodelo (un solo modelo).
- No existen formas alternativas de procesar las tareas, se hace de una forma determinada.
- La línea es síncrona conforme al tiempo de ciclo que se calcula en función de la cantidad que se quiere producir.
- La línea es de tipo serial sin elementos en paralelo ni líneas alimentadoras.
- La asignación de las tareas está limitada por relaciones de precedencia.
- El tiempo de operación de todas las tareas es conocido, es determinístico.
- No se asignan restricciones a las tareas, solo las restricciones de precedencia.

Estos problemas a su vez se clasifican según cuatro enfoques [4]:

- SALBP1: en este problema se busca minimizar el número de estaciones necesarias para un tiempo de ciclo dado.
- SALBP2: en este problema se busca minimizar el tiempo de ciclo para un número de estaciones dado.
- SALBPE: en este problema se busca maximizar la eficiencia de la línea de montaje, calculada la eficiencia como:

$$\%Eficiencia = \frac{\text{Suma de los tiempos de las tareas } (t_i)}{\text{Número de las estaciones de trabajo } (N) \cdot \text{Tiempo de ciclo } (C)}$$

- SALBPF: en este problema se busca si ante un número de estaciones y tiempo de ciclo dado, es posible encontrar una solución factible.

3.4.1. SALBP 1

Una vez descrito el problema, se plantea su formulación matemática, como se ha indicado anteriormente, además de la caracterización de tiempos de cada tarea existirán restricciones que lo limiten. En este caso sólo relaciones de precedencia [4].

$$\text{Min } \sum_{j=1}^M y_j$$

s.a

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i \cdot x_{ij} \leq C \cdot y_j \quad j = 1, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^M j \cdot x_{kj} \leq \sum_{j=1}^M j \cdot x_{ij} \quad \forall k < i \quad (3)$$

$$y_{j+1} < y_j \quad j = 1, \dots, M - 1 \quad (4)$$

Donde C es el tiempo de ciclo, i y k son índices de las N tareas, j el índice de las M posibles estaciones y t_i es el tiempo de procesamiento de la tarea i . Los valores de C , N y t_i son conocidos, así como las relaciones de precedencias entre tareas. El valor de M se estima como un valor grande cercano a N .

Las variables del problema son: $y_j=1$, si la estación j existe, y $x_{ij}=1$, si la tarea i se asigna a la estación j .

Las restricciones señaladas en el modelo son:

- (1) Cada operación, a una estación
- (2) Duración en cada estación, menor que tiempo de ciclo C
- (3) Cumpliendo las relaciones de precedencia entre cada par de tareas k e i
- (4) Si una estación no existe, tampoco las siguientes

3.4.2. SALBP 2

La formulación del problema SALBP2 es similar al caso anterior pero minimizando el tiempo de ciclo C , conociendo el número de estaciones M . De este modo, el problema queda definido de la siguiente manera [4]:

$Min C$

s.a

$$\sum_{i=1}^N t_i \cdot x_{ij} \leq C \quad j = 1, \dots, M \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^M j \cdot x_{kj} \leq \sum_{j=1}^M j \cdot x_{ij} \quad \forall k < i \quad (3)$$

Donde C es el tiempo de ciclo, i y k son índices de las N tareas, j el índice de las M estaciones y t_i es el tiempo de procesado de la tarea i . Los valores de M , N y t_i son conocidos, así como las relaciones de precedencias entre tareas.

Las variables del problema son: C , tiempo de ciclo, y $x_{ij}=1$, si la tarea i se asigna a la estación j .

Las restricciones señaladas en el modelo son:

- (1) Duración en cada estación, menor que tiempo de ciclo C
- (2) Cada operación, a una estación
- (3) Cumpliendo las relaciones de precedencia entre cada par de tareas k e i

4 LA EMPRESA Y EL PRODUCTO

En este capítulo se abordará en qué consiste la empresa del centro logístico de concentradores y cuáles son sus funciones y objetivos a conseguir. Para ello, en un primer lugar se realizará una introducción junto a una revisión histórica acerca de cómo se organiza la distribución eléctrica, como se encamina hacia una red eléctrica inteligente e interconectada entre sí, y como el concentrador, como producto de este proyecto, formará parte de esta red.

Una vez descrito este escenario, se describirá como se va a diseñar el centro logístico, explicando que funciones debe cumplir, que agentes intervienen en el proceso.

Por último, se describirá como se han definido las diferentes etapas del despliegue, así como los volúmenes que tendrá que gestionar el centro logístico y las dimensiones de los distintos elementos a almacenar, de cara a poder dimensionarlo lo más eficientemente posible.

4.1. Introducción a las redes eléctricas inteligentes

En este apartado lo que se pretende es dar una visión global de cómo se gestiona la distribución eléctrica en la actualidad y hacia donde se encamina en los próximos años. Se dará una descripción de lo que está previsto que sean lo que se está denominado como redes inteligentes, así como lo que se conoce como generación distribuida.

4.1.1. Revisión histórica de la distribución eléctrica

En el inicio de la generación de la energía eléctrica no estaba claro qué modelo era el más adecuado, si el modelo de “corriente continua” o el modelo de “corriente alterna”. A la lucha por definir un modelo se le denominó “La guerra de las corrientes”.

Una vez quedó claro que el modelo de corriente alterna era el más eficiente, se estableció un modelo de distribución donde existen unos agentes muy diferenciados: Generación, Transporte, Subestaciones, Distribución, Centros de transformación e Instalaciones de enlace.

Pero los avances tecnológicos han deparado que por ejemplo sea posible el envío de información a través de la propia red eléctrica, abriendo un campo a las tecnologías de la información y a su uso en la distribución eléctrica.

4.1.1.1 La guerra de las corrientes: la búsqueda de un modelo

Se conoce como “La Guerra de las Corrientes” [5] a la lucha por la definición de un modelo de distribución eléctrica producida en los años 1880, para el control del incipiente mercado eléctrico. Por este motivo George Westinghouse y Thomas Edison se convirtieron en adversarios. Mientras que Edison defendía la distribución de energía eléctrica con corriente continua, tanto Westinghouse como Nikola Tesla defendían la corriente alterna.

Hay que tener en cuenta que la electricidad era la palabra mágica a fines del siglo XIX, provocando la aparición continua de aplicaciones para la electricidad.

Fue a partir de la Exposición Mundial de París en 1881 y de la presentación de la lámpara de Edison, cuando los nuevos sistemas de iluminación eléctricos se convirtieron en el logro tecnológico más importante del mundo. Además, la electricidad podía sustituir al vapor para hacer funcionar los motores. Era una segunda revolución industrial y, en ciudades europeas y americanas, las centrales eléctricas se multiplicaban basadas en el diseño de Pearl Street, la central que Edison estableció en 1882 en Nueva York. Fue la primera instalación para la producción eléctrica comercial del mundo y aunque era una planta enorme para su época, podía

producir y distribuir electricidad hasta, aproximadamente, 330 hectáreas de Manhattan.

La demanda de electricidad pronto condujo al deseo de construir centrales eléctricas más grandes y de llevar la energía a mayores distancias. Pero también se produjo en paralelo una rápida distribución de motores eléctricos industriales. Lo que provocó una fuerte demanda para un voltaje diferente a los 110 voltios usados para la iluminación.

El sistema de Edison, que utilizaba la corriente continua, era poco adecuado para responder a estas nuevas demandas. Y el problema del transporte era aún más difícil. La transmisión interurbana de grandes cantidades de corriente continua en 110 voltios era muy costosa y sufría enormes pérdidas por disipación en forma de calor.

En 1886, George Westinghouse, un rico empresario, pero un recién llegado en el negocio eléctrico, fundó Westinghouse Electric para competir con General Electric de Edison. Esta nueva empresa se basaba en los descubrimientos y las patentes de Nikola Tesla, quien creyó apasionadamente en la superioridad de la corriente alterna. El principal argumento se basaba en que las pérdidas en la transmisión de electricidad dependen del voltaje: a mayor voltaje, menores pérdidas. Y a diferencia de la corriente continua, el voltaje de la corriente alterna se podía elevar con un transformador para ser transportado largas distancias, reduciendo las pérdidas, y una vez en el destino volver a reducir el voltaje a niveles seguros y económicos, antes de proveer energía a los clientes.

La aparición de la tecnología de Tesla provocó la alarma de Edison, que amenazaba sus intereses en un campo que él mismo había creado.

Desde ese mismo momento Edison y Westinghouse se enfrentaron en una batalla de relaciones públicas –que los periódicos denominaron “la guerra de las corrientes”– para determinar qué sistema se convertiría en la tecnología dominante. Con este fin Harold Brown (empleado de Edison) inventó una silla eléctrica de corriente alterna, donde se electrocutaron perros, gatos y hasta un elefante para demostrar que la corriente alterna era peligrosa. Topsy el elefante pasó a la inmortalidad en un vídeo filmado en 1903.

Para neutralizar esta iniciativa, Tesla se expuso a una corriente alterna que atravesó su cuerpo sin que le causase ningún daño. Dando al traste con la intención de eliminar la corriente alterna como medio de transporte de electricidad.

Pero fue durante la Feria Mundial de Chicago de 1893 donde Tesla tuvo su gran oportunidad. Westinghouse presentó un presupuesto por la mitad de lo que pedía General Electric para la iluminación de la Feria. La iluminación le fue adjudicada a Westinghouse y Tesla pudo exhibir sus generadores y motores de corriente alterna.

Más tarde, la *Niagara Falls Power Company* encargó a Westinghouse el desarrollo de su sistema de transmisión. Fue el final de la “guerra de las corrientes” y la corriente alterna acabaría imponiéndose en todo el mundo.

4.1.1.2 La red de distribución de energía eléctrica

El sistema de suministro eléctrico comprende el conjunto de medios y elementos útiles para la generación, el transporte y la distribución de la energía eléctrica.

Constituye un sistema integrado que además de disponer de sistemas de control distribuido, está regulado por un sistema de control centralizado que garantiza una explotación racional de los recursos de generación y una calidad de servicio acorde con la demanda de los usuarios, compensando las posibles incidencias y fallos producidos.

Con este objetivo, tanto la red de transporte como las subestaciones asociadas a ella pueden ser propiedad, en todo o en parte y, en todo caso, estar operadas y gestionadas por un ente independiente de las compañías propietarias de las centrales y de las distribuidoras o comercializadoras de electricidad.

Asimismo, el sistema precisa de una organización económica centralizada para planificar la producción y la remuneración a los distintos agentes del mercado si, como ocurre actualmente en muchos casos, existen múltiples empresas participando en las actividades de generación, distribución y comercialización.

En la figura siguiente, se pueden observar en un diagrama esquematizado las distintas partes componentes del sistema de suministro eléctrico:

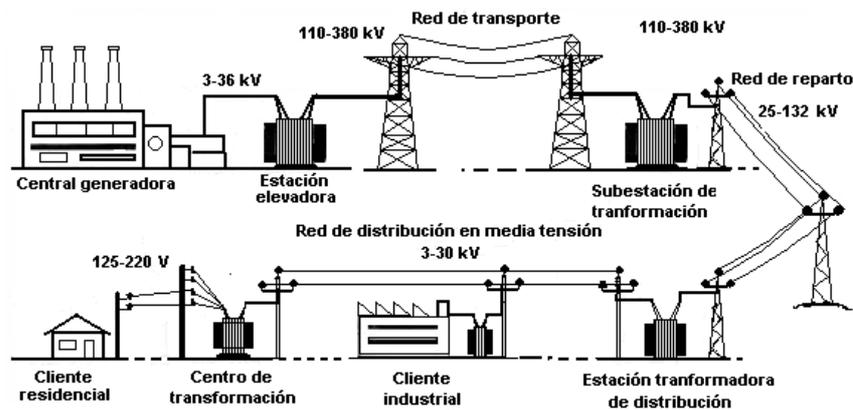


Figura 4-1: Sistema de Generación-Distribución tradicional

A continuación, se definen cada uno de los agentes que intervienen en el sistema eléctrico:

- **Generación:** la energía eléctrica se genera en las Centrales Eléctricas. Una central eléctrica es una instalación que utiliza una fuente de energía primaria para hacer girar una turbina que, a su vez, hace girar un alternador, generando así electricidad.
El hecho de que la electricidad, a nivel industrial, no pueda ser almacenada y deba consumirse en el momento en que se produce, obliga a disponer de capacidades de producción con potencias elevadas para hacer frente a las puntas de consumo con flexibilidad de funcionamiento para adaptarse a la demanda.
- **Transporte:** la red de transporte es la encargada de enlazar las centrales con los puntos de utilización de energía eléctrica. Para un uso racional de la electricidad es necesario que las líneas de transporte estén interconectadas entre sí con estructura en forma de malla, de manera que puedan transportar electricidad entre puntos muy alejados, en cualquier sentido y con las menores pérdidas posibles.
- **Subestaciones:** las instalaciones llamadas subestaciones son plantas transformadoras que se encuentran junto a las centrales generadoras (Estación elevadora en la figura anterior) y en la periferia de las diversas zonas de consumo, enlazadas entre ellas por la Red de Transporte. En estas últimas se reduce la tensión de la electricidad de la tensión de transporte a la de distribución.
- **Distribución:** desde las subestaciones ubicadas cerca de las áreas de consumo, el servicio eléctrico es responsabilidad de la compañía suministradora (distribuidora) que ha de construir y mantener las líneas necesarias para llegar a los clientes. Estas líneas, realizadas a distintas tensiones, y las instalaciones en que se reduce la tensión hasta los valores utilizables por los usuarios, constituyen la red de distribución. Las líneas de la Red de Distribución pueden ser aéreas o subterráneas.
- **Centros de Transformación:** los centros de transformación, dotados de transformadores o autotransformadores alimentados por las líneas de distribución en Media Tensión, son los encargados de realizar la última transformación, efectuando el paso de las tensiones de distribución a la Tensión de utilización.
- **Instalación de Enlace:** el punto que une las redes de distribución con las instalaciones interiores de los clientes se denomina Instalación de Enlace y está compuesta por: Acometida, Caja general de protección, Líneas repartidoras y Derivaciones individuales.

Todos estos agentes se deben coordinar para proveer a los usuarios de la energía necesaria con los niveles de calidad necesarios para el buen funcionamiento de los diferentes equipos eléctricos. Esto se consigue garantizando lo siguiente:

- **Continuidad de Suministro:** la continuidad de suministro es el indicador con el que se mide el número y/o la duración de las interrupciones de más de tres minutos. De este modo se tiene un índice de calidad, que debe ser lo más bajo posible.
- **Mantenimiento de la frecuencia y la tensión:** la frecuencia de la red es el resultado del equilibrio entre la generación y el consumo en tiempo real. Requiere un ajuste permanente de la generación para adaptarse a la demanda. Ello se lleva a cabo gracias a la regulación primaria, secundaria y terciaria, cada una actuando a distintos horizontes temporales.

4.1.1.3 Transmisión de información a través de la red eléctrica: Power Line Communications

La comunicación a través de la red eléctrica existe desde hace bastante tiempo, aunque sólo se había utilizado para aplicaciones de control remoto de repetidores de banda estrecha, alumbrado público y automatización de hogares. Estos son los principales hitos de la comunicación a través de la red eléctrica [6]:

- 1950: con una frecuencia de 10 Hz, una alimentación de 10 kW, y una vía de un solo sentido: alumbrado de ciudades, control remoto de repetidor.
- Mediados de la década de los 80: inicio de las investigaciones relacionadas con el uso de la red eléctrica para permitir la transmisión de datos, en bandas de entre 5 y 500 kHz, siempre en una sola dirección.
- 1997: primeras pruebas para la transmisión de señales bidireccionales de datos a través de la red de suministro eléctrico, inicio de las investigaciones por parte de Ascom (Suiza) y Norweb (Reino Unido).
- 2000: primeras pruebas llevadas a cabo en Francia por EDF R&D y Ascom.

Es a finales de la década de los 90 cuando empieza a utilizarse la banda ancha a través del sistema Power Line Communications o PLC.

El principio de PLC consiste en superponer una señal de alta frecuencia (de 1,6 a 30 MHz) en niveles bajos de energía a través de una señal eléctrica de 50 Hz. Esta segunda señal se transmite a través de la infraestructura eléctrica y se puede recibir y decodificar de manera remota. De esta forma, recibirá la señal cualquier receptor PLC que se ubique en la misma red eléctrica.

Un acoplador integrado en los puntos de entrada del receptor PLC elimina los componentes de baja frecuencia antes de que se proceda al tratamiento de la señal.

4.1.2. Redes eléctricas inteligentes: Smartgrids

4.1.2.1 Definición, barreras de entrada y marco regulatorio

Como respuesta a los nuevos retos a los que se enfrentan las redes eléctricas y en contraposición al modelo de distribución eléctrico tradicional, surge el concepto de red eléctrica inteligente.

Una red (eléctrica) inteligente es una red que integra de manera inteligente las acciones de los usuarios que se encuentran conectados a ella – generadores, consumidores y aquellos que son ambas cosas a la vez-, con el fin de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible [7].

Los retos a los que se enfrentan. Dentro del marco de la Unión Europea se han planteado los siguientes:

- Objetivos 20-20-20 (medioambiental)
- Crecimiento del consumo eléctrico
- Sustitución de activos veteranos
- Incremento exponencial de fuentes renovables
- Extensión del proceso de liberalización del mercado
- Seguridad de suministro
- Reducción de los costes del sistema eléctrico

Además de estos retos en el ámbito de la Unión Europea, las redes eléctricas tendrán que enfrentarse a las siguientes dificultades:

- Integración en el sistema eléctrico de fuentes de generación de bajas emisiones
- Soportar tecnologías que permitan la eficiencia energética y la gestión de la demanda
- Permitir la creciente participación de los clientes en los mercados de la energía
- Integrar nuevas tecnologías (renovables, generación distribuida...)

Todo esto es lo que hace necesario que las redes eléctricas deban desarrollar sistemas lo más flexibles posible de modo que permitan el desarrollo de estas redes inteligentes.

Una forma de visualizar estos conceptos puede ser enfrentando los conceptos de telemedida, telegestión y Smartgrids:

- **Telemedida:** Consiste simplemente en poder leer la energía de manera remota.
 - El contador es un elemento pasivo, de comunicación unidireccional.
 - Pocas necesidades de comunicación.
- **Telegestión (Smartmeter):** Implica una revolución del equipo de medida y la red.
 - El contador puede ser leído y gestionado de manera remota.
 - Altas necesidades de comunicación bidireccional
- **Smartgrids:** La red está capacitada para ofrecer nuevos servicios
 - No solo para la gestión de los contadores, sino para todos los usuarios.
 - Es importante un desarrollo abierto y escalable, que permita la progresiva integración de las distintas soluciones y servicios.
 - El contador pasa a ser un equipo integrado en una red de telecomunicaciones formada por millones de nodos, aunque también lee kWh.

Una vez vistas las bondades de las Smartgrids frente a otros sistemas, hay que tener en cuenta as posibles barreras de entrada que se pueden encontrar estas nuevas tecnologías. Estas pueden ser la falta de tecnologías maduras que impliquen un riesgo en la inversión, no se tiene claro el retorno económico de este tipo de inversiones al no existir precedentes, falta de concienciación o limitaciones por una normativa o reglamentación insuficiente.

Por este motivo desde los diferentes organismos públicos se está incentivando estos proyectos y tanto en Estados Unidos como Europa se está trabajando desde hace unos años de forma intensa en las Smartgrids, garantizando a su vez que los estándares sean abiertos y no propietarios.

Estas normativas contemplan además la sustitución de todo el parque de contadores por contadores inteligentes e implantar un sistema de telegestión.

4.1.2.2 La eficiencia energética en la red de distribución eléctrica

Como se ha descrito anteriormente en este documento, durante gran parte del último siglo, las redes de suministro eléctrico fueron todo un símbolo del progreso. Con el tiempo, sin embargo, estas redes se han ido transformando. Por un lado, las fuentes energéticas se han multiplicado, y por otro el consumidor reclama un papel más activo en el suministro. A ello se suma la necesidad de administrar mejor los recursos para favorecer la protección del medioambiente. Es en este escenario donde surgen los conceptos de eficiencia energética, y por consiguiente de smartgrids.

Como por definición estas redes inteligentes deben incorporar un sistema de lectura y gestión personalizada de la potencia eléctrica entregada, es posible que el usuario controle la energía que gasta, pudiendo así mejorar el rendimiento de la misma. Es decir, este sistema permite al usuario final controlar los momentos de mayor consumo, posibilitando a su vez la optimización del sistema eléctrico existente.

Por esta razón las smartgrids abarcan dos conceptos complementarios. El primero se contempla desde el punto de vista de las empresas generadoras y suministradoras, que optimizan la gestión de la distribución energética.

El segundo, desde el punto de vista de los receptores, ya sean particulares o empresas, que gracias a las smartgrids, podrán gestionar su consumo energético de una manera más eficiente, controlando en todo momento su factura energética.

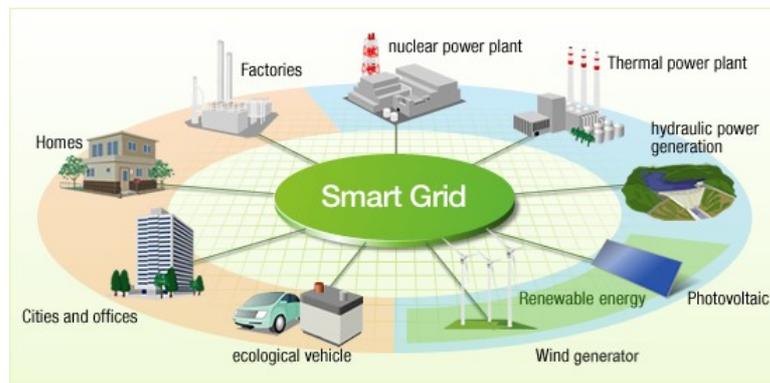


Figura 4-2: Relaciones entre los distintos agentes de una smartgrid

En este sentido, la instalación de estas redes ofrece a las empresas una ventaja adicional. En los casos en que la energía producida no es demandada en su totalidad, esta puede ser almacenada por alguno de los agentes del sistema y entregarla nuevamente cuando sea necesaria. Como ejemplo de un caso más extremo, se podrían utilizar las baterías de los coches eléctricos como método de almacenaje de la energía sobrante por la noche que puede ponerse a disposición de la red al día siguiente.

De este modo se puede deducir que el origen de estas redes inteligentes se debe a dos factores principalmente:

- El primero se relaciona con el tráfico energético unidireccional que se suministra actualmente a las empresas y que resulta altamente ineficiente.
- Y el segundo con el aprovechamiento que se lleva a cabo de las energías renovables. Es evidente que los patrones de generación de estas nuevas fuentes no son tan controlables. Ello hace necesario aumentar la inteligencia de las redes de distribución para aumentar su efectividad. Se requiere un mecanismo que adapte a la red a donde se está generando más energía y hacerla llegar a los puntos donde sea necesaria.

Pero no es sencillo implantar este tipo de solución en una compañía. El proceso de integración de una red inteligente implica una importante transformación en los procesos de la empresa que lo llevan a cabo, así como un destacado despliegue de nuevas tecnologías.

Uno de los requisitos fundamentales es poseer y gestionar un gran volumen de información en tiempo real del estado de la generación y de la red de transporte/distribución así como de los usuarios finales. Esto implica la necesidad de disponer de una infraestructura de IT/comunicaciones escalable, fiable y segura.

Aun así y dadas las iniciativas enfocadas a potenciar las energías alternativas, se espera que las redes inteligentes experimenten un gran crecimiento en el futuro. Las empresas de generación y distribución de energía, por cuanto se plantean como objetivo mejorar la eficiencia de los procesos anteriores, se verán beneficiadas por la implantación de este tipo de soluciones.

4.1.2.3 Características de una red eléctrica inteligente

Alrededor del mundo, los diferentes actores de la industria de la energía, están impulsando el desarrollo de "Smartgrids". Esto es debido a que las redes inteligentes son entendidas como la tecnología clave que permitiría el desarrollo de las energías renovables, la adopción de vehículos eléctricos y mejoras en la eficiencia energética.

Si bien no existe una definición exacta para una red inteligente, es factible reconocer atributos particulares que permiten distinguir claramente una red de este tipo. Por este motivo, una Red Inteligente debe poseer algunas de las siguientes características [7]:

- Integración masiva de sensores, actuadores y tecnologías de medición en todos los niveles de la red.
- Se enfatiza la creación de un sistema de información e inteligencia distribuidos en el sistema.
- Sistemas de control inteligentes que permitan extender los servicios intercambiados entre los distintos agentes del mercado eléctrico.
- Incorporación masiva de generación distribuida, la que permite coordinarse a través de la red

inteligente.

- Incorporación de equipos de control que permiten actuar de manera eficiente frente a fallas.
- Incorporación por parte de los usuarios de electrodomésticos y equipos eléctricos inteligentes, que permiten ajustarse a esquemas de eficiencia energética.
- Incorporación de vehículos eléctricos, que por un lado demandan nuevas estructuras para posibilitar su carga en distintos puntos, pero asimismo permiten disponer de una capacidad de almacenamiento.

4.1.3. La nueva estructura de las redes inteligentes

4.1.3.1 Análisis de los principales agentes que intervienen

En la estructura de la red eléctrica actual se pueden definir tres grandes grupos de agentes que intervienen e interactúan en la misma. Estos son: los generadores, los operadores eléctricos y los consumidores finales.



Figura 4-3: Relación tradicional entre agentes del sistema eléctrico

En el nuevo escenario, se produce un cambio sustancial en la relación entre los distintos agentes de la red inteligente. Así, por ejemplo, en la red eléctrica convencional, la producción es concentrada, y esta se divide en función del uso de las propias centrales eléctricas entre: centrales de base, centrales de punta y centrales de reserva.

A su vez, la principal función del operador de la Red es garantizar la continuidad y la calidad del suministro, así como la disminución de las pérdidas que puedan producir en el sistema. Esto lo convierte en un mero transmisor de la energía entre el productor y el consumidor.

Por último, el consumidor final, no es más que un elemento pasivo que no puede interactuar con la red eléctrica. Este solo es receptor de dicha energía y puede consumirla en el momento que estime oportuno.

En cambio, en el nuevo escenario, la relación de estos tres agentes cambia de forma sustancial. Por ejemplo, la generación se produce de una forma distribuida, de modo que el sistema debe adaptarse en tiempo real a la capacidad de los productores y los consumidores y viceversa. De este modo ya no es necesario realizar una previsión de la demanda en función de la potencia instalada y los históricos de consumos de años anteriores.

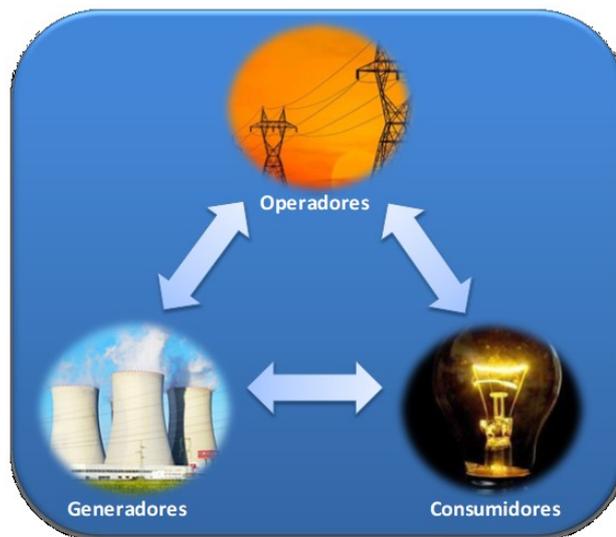


Figura 4-4: Nuevo sistema relacional entre los agentes del sistema eléctrico

En especial nos vamos a centrar en los cambios que sufre el operador eléctrico. Para que tanto generadores como consumidores tengan la información necesaria en tiempo real, se hace necesario que los operadores eléctricos posean un sistema de información, así como los elementos de control adecuados para poder dar respuesta a estas necesidades.

Para conseguir que esta información fluya en las dos direcciones y que tanto los consumidores como los generadores conozcan en todo momento cual es la demanda y la oferta de energía, es necesario que el operador eléctrico la recoja, la filtre y la agrupe. Para ello deberá disponer de equipos de medida capaces de conocer en todo momento la demanda de energía de cada consumidor, de modo que la energía producida se pueda dirigir hacia los focos de demanda.

4.1.3.2 Equipos de medida inteligente y la necesidad de equipos concentradores de información

Como se ha indicado anteriormente, en el ámbito de las Redes Eléctricas Inteligentes y dentro de lo que supone la distribución de energía eléctrica, uno de los agentes que va a sufrir un mayor cambio, en la forma que interactúa con los demás elementos de la red, es el usuario o consumidor final.

El usuario es una de las piezas clave en la configuración de las redes Eléctricas Inteligentes, ya que pasa de ser un actor pasivo a un actor activo. Constituye el punto final de consumo y punto de entrada de la generación distribuida, fundamentalmente, por fuentes de energías alternativas o renovables.

El usuario se convierte en una "micro empresa eléctrica", ya que gestiona su consumo y la producción y almacenamiento de energía mediante el contador o medidor inteligente.

Es evidente que para que esto se convierta en una realidad una primera fase pasa por modificar los contadores que se encuentran instalados en los suministros. Estos contadores nuevos (contadores inteligentes), deben permitir obtener la información necesaria para permitir aumentar la eficiencia de la red, pero, además, deben poder interactuar tanto con el usuario como con el distribuidor.

Por lo tanto, es necesaria la sustitución de todos y cada uno de los contadores "tradicionales" por otros que permitan la comunicación "bidireccional". Lo siguiente que hay que afrontar es el sistema que estos utilizarán para comunicarse con los diferentes centros de control. Para el caso que nos ocupa se ha optado por instalar contadores que incorporen la nueva generación de comunicaciones Powerline (PLC) más robusta y fiable basada en el protocolo abierto Meters and More, gestionado por la asociación del mismo nombre sin ánimo de lucro con sede en Bruselas.

Las principales características por las que se escogieron estos contadores son las siguientes:

- Tecnología abierta.
- Eficiencia y Robustez
- Alto nivel de seguridad de datos.

- Alta flexibilidad.
- Coste y consumo inferiores a las otras alternativas.
- Tipo de transmisión máxima: 28,800 bps, operado a 4,800 bps.

Pero el protocolo PLC puede suponer un problema si se supera la red de baja tensión y se pasa a la red de alta tensión. Aparte de que el tráfico de información pueda llegar a ser excesivo por esas líneas, existe el problema de la aparición de armónicos, reduciendo la eficiencia de la línea.

Por este motivo, se ha pensado utilizar este protocolo para comunicar los contadores con los centros de transformación, y utilizar un sistema de comunicación alternativo para realizar las comunicaciones hasta el centro de control.

La solución consiste en colocar en los centros de transformación un equipo denominado Concentrador. Este concentrador se conecta a la línea de baja tensión, de forma que pueda comunicarse con los contadores a través del protocolo de comunicaciones PLC, ya sea para recibir información o para enviarle alguna señal u orden a los contadores. Pero desde los centros de transformación la comunicación con el Centro de Control se realiza a través de la Red Pública de Comunicaciones (GPRS, 3G o 4G). Asegurando la calidad en las señales.

De este modo queda definida y garantizada la comunicación entre los contadores y el Centro de Control.

Pero la instalación de todos estos equipos es algo de lo que no se tienen experiencias previas, por lo que se pueden dar problemas no contemplados en la fase de diseño.

Pues bien, si está claro que la sustitución de los contadores era algo previsible, la aparición de este otro elemento, el concentrador, obliga a desarrollar una solución que permita instalar estos equipos en paralelo. Esta solución pasa por la creación de un centro logístico que realice un seguimiento exhaustivo al proceso de implantación y permita anticipar posibles problemas futuros que vayan apareciendo a lo largo de la instalación.

En los siguientes apartados se tratará el diseño, estudio, desarrollo e implantación de un centro logístico que permita la implantación de los concentradores.

4.2. Centro logístico para el concentrador

“La Logística es el proceso de planificar, implementar y controlar eficientemente el flujo de materias primas, productos en curso, productos terminados y la información relacionada con ellos, desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el propósito de satisfacer los requerimientos del cliente.” (The Council of Logistics Management).

Para abordar el problema del diseño físico del almacén se pueden establecer las siguientes premisas generales y aplicables a cualquier tipo de almacén:

- La ubicación: referente a la localización de la planta. Aquí se analizarán diferentes factores como tipo de transporte, productos o servicios, seguridad, acceso a la información, etc. Este análisis se puede dividir en las siguientes fases:
 - Análisis Preliminar
 - Evaluación de alternativas (análisis detallado)
 - Selección de la localización.
- El Lay-Out: referente a la ubicación en planta de las diferentes zonas y elementos necesarios para el funcionamiento del almacén. Aquí se analizan factores como la orientación del local, la asignación de pasillos, la asignación de la zona de depósito de las mercancías, etc.
- Estructura de la empresa: Aquí se analizan factores como el área pública, el área privada, las oficinas, el almacén, tienda, etc.
- Estructura del almacén: Aquí se analizan factores como los equipos estáticos, las estanterías, los suelos, los equipos móviles, elementos de transporte, etc.
- Organización general y disposición del almacén: analizando factores como zona de retención, muelles de llegada, muelle de carga, zona de carga, disposición final del almacén, lector de códigos de barras, etc.

- **Funcionamiento del almacén:** Los principales elementos a analizar son los procesos relacionados con los flujos de entrada, procesos relacionados con los flujos de salida, picking, los procesos y técnicas del picking.

Y en lo referente a los sistemas de información enfocados a la gestión de almacenes, una premisa importante para poder implantarlos correctamente es la codificación de los diferentes artículos y materiales. De esta forma se reducen los riesgos a la hora de migrar la información y permite una implantación de un sistema informático de gestión más cómoda y más asequible.

La selección se debe basar en los tipos y ubicaciones de las existencias que haya en el almacén.

Como ejemplos de tecnologías de la información se encuentran los siguientes:

- **Código de barras:** Códigos ópticos, códigos magnéticos, equipos de lectura, impresión de etiquetas, etc.
- **Radiofrecuencia:** portátiles de mano, montado en carretillas, comunicación en tiempo real, etc.
- **Ordenadores de a bordo:** Ligados a flotas de transporte, posicionamiento, comunicaciones, etc.
- **Terminales portátiles:** preventa, autoventa, comunicación (radio, línea telefónica), etc.
- **Sistemas integrados de gestión logística.**

En el caso que nos ocupa, se utilizará un almacén en planta baja con salida al exterior para recibir y enviar los materiales necesarios. Además, se dispondrá de equipos informáticos, así como lectores de códigos de barras para cada tipo de elemento que se tenga en el almacén.

4.2.1. Agentes que intervienen en la implantación de los concentradores

El Centro logístico hay que enmarcarlo dentro de toda una estructura más compleja en el que diferentes agentes intervienen de forma coordinada para dar respuesta a las necesidades de los proyectos.

Se pueden definir los siguientes agentes como los principales que intervendrán a lo largo del proceso de implantación:

- **Proveedores:** son los encargados de suministrar todos los equipamientos y materiales necesarios para realizar la implantación de los concentradores. Estos deberán cumplir tanto con las especificaciones técnicas como con los plazos fijados para la entrega de material.
- **Centro Logístico:** Es el encargado de recibir y preparar los equipos que serán instalados en campo. Deberá prepararlos de forma que cada paquete contenga todo lo necesario para su instalación, sin necesidad de tener que utilizar a otros materiales o elementos externos al propio paquete.
- **Instaladores:** son los equipos encargados de la instalación física en campo. Ellos deberán realizar esta tarea en los plazos acordados y con los estándares de calidad exigidos.
- **Área de Aprovisionamiento:** es la encargada de buscar y encontrar los equipos y los materiales que se indiquen en las especificaciones del proyecto. Será la encargada de exigir la calidad de los materiales a los diferentes proveedores.
- **Área de Logística:** Es la encargada de coordinar los diferentes agentes que intervienen en el proceso, de forma que en cada momento cada uno disponga de los materiales, equipos o información necesaria para no detener el proceso. En lo referente a materiales dependerá de esta área que no se produzca ninguna rotura de existencias. Por este motivo será la encargada de exigir a los diferentes agentes el cumplimiento en los plazos y las cantidades de entrega.
- **Área de Planificación:** Es la encargada de, en función de las fechas informadas por el Área de Logística, planificar la instalación en campo de los equipos. Para ello deberá conocer las existencias que se encuentran o van a ser enviadas a los almacenes de los contratistas.

4.2.2. Funciones del Centro Logístico

Aun cuando se ha adelantado en el apartado anterior las funciones del Centro Logístico, es importante profundizar dentro de las tareas y responsabilidades que tendrá el propio Centro dentro de todo el proceso de

implantación.

La función principal de este centro es la de coordinar todos los movimientos de los concentradores, así como de todos los materiales auxiliares que hagan posible su implantación.

Como se indicó con anterioridad, la instalación de los concentradores debe realizarse a continuación y de forma coordinada a la instalación de los contadores. Al fin y al cabo, el concentrador es el elemento que los complementa para poder crear la red inteligente.

Por este motivo faltaría por definir el modo en que el propio Centro Logístico va a interactuar con el resto de agentes. Es cierto que el propio Centro, por sus características intrínsecas, dependerá directamente del Área Logística, pero eso no impide que pueda e incluso deba estar en contacto con otras partes del proceso. Atendiendo a la clasificación anterior la relación que el Centro Logístico tendrá con los agentes será la siguiente:

- **Proveedores:** A pesar de que tanto el Área de Aprovisionamiento como el Área Logística serán los únicos interlocutores con los proveedores, el Centro Logístico estará disponible para cualquier requerimiento de información por parte de los proveedores en lo referente a los envíos de materiales (fecha de salida, fecha prevista de salida, tipo de envío, horario de entrega, sistema de descarga, dirección exacta, etc.).
- **Instaladores:** En este caso la interlocución se centrará más con el Área de planificación, pero al igual que ocurre con los proveedores el Centro Logístico podrá establecer contacto a fin de verificar información que permita garantizar la correcta entrega de mercancías. Además, se contempla como una función adicional que sea el propio Centro Logístico el que se encargue de gestionar la recogida, la revisión y el almacenamiento, de los equipos que puedan ser retirados por no funcionar correctamente una vez instalados. Manteniendo informado en este caso tanto al Área de Aprovisionamiento, como al Área de Logística como a la de Planificación, para que puedan tomar las medidas oportunas al respecto.
- **Área de Aprovisionamiento:** la función principal del Centro Logístico con esta área será la de mantenerla informada acerca de si los materiales y equipos recibidos cumplen con las especificaciones solicitadas, no sólo a nivel técnico sino incluso en todo lo referente al modo de entrega (embalajes, sistemas de protección, etiquetado, etc.).
- **Área de Planificación:** la relación que el Centro Logístico mantendrá con el área de planificación será bidireccional. Por un lado, desde esta área se informará tanto de las previsiones de entrega de materiales como de la planificación de las entregas a los instaladores. De esta forma se conocerá con suficiente antelación cual es la distribución de las salidas. Y por otro lado desde el Centro logístico se mantendrá informada al Área de Planificación tanto de las entregas de materiales, como de las salidas, a fin de que puedan llevar un control del cumplimiento de los plazos previstos, o reaccionar, modificando la planificación en los casos en los que se detecte alguna desviación en las entregas o en las salidas.
- **Área de Logística:** desde esta área se deberá informar de las fechas previstas de entrega, así como de las cantidades previstas. De este modo se garantiza que se puedan distribuir los diferentes trabajos en función de las fechas de entrega. También se deberá informar sobre posibles demoras en las entregas de los materiales con el mismo fin de distribuir correctamente las cargas de trabajo. Y desde el Centro Logístico se deberá informar de los momentos en los que se envía el material a los diferentes contratistas de campo, para que puedan controlar los diferentes stocks de seguridad y anticipar cualquier posible rotura en el caso de que sea necesario reponer algún material en concreto. También deberá informar de las recepciones de los materiales previstos, de modo que si se detecta algún retraso se pueda reclamar con suficiente antelación al proveedor. Además, otra función del Centro Logístico será la de verificar que las cantidades recibidas se corresponden con lo previsto y así poder cerrar el pedido con el proveedor.

4.2.3. Kit de instalación

Anteriormente se ha definido cómo se iban a instalar los concentradores dentro de los centros de transformación, pero falta por definir que materiales y equipos pasarán previamente por el Centro Logístico y cuales se enviarán directamente a las contratas de campo.

Por este motivo hay que establecer el “kit” que preparará el Centro Logístico y enviará a los contratistas de

campo. Como recordatorio, los elementos que son necesarios para la instalación del concentrador son los siguientes:

- Placa de metacrilato: Será el soporte en el que se instalen los equipos dentro del centro de transformación. Esta va cogida a la pared junto al transformador, en la salida de baja tensión. Es necesaria una por cada concentrador.
- Conectores de perforación: Este tipo de conectores permite la conexión a la salida de baja tensión sin necesidad de descargar la instalación de tensión. Son necesarios 4 por concentrador (uno por cada fase, más el neutro).
- Base porta fusible + Fusible: Este elemento va unido al conector de perforación y protege al concentrador contra sobre intensidades. Son necesarios 3 por concentrador (uno por cada fase).
- Interruptor automático: Este interruptor va colocado en la placa y protege al sistema contra cualquier sobretensión que se derive de la red. Es necesario uno por concentrador.
- Antena de ganancia (opcional): Aunque se prevé que todos los centros donde se realizarán las instalaciones tengan suficiente cobertura, existe la posibilidad de que por su ubicación física (bajos de un edificio) o por el tipo de construcción (hormigón en lugar de prefabricado) pueda darse el caso de tener problemas de cobertura dentro de algún centro de transformación. Por este motivo es necesario que las contratas de campo tengan en su poder una antena de ganancia que permita mejorar la señal. Esta antena se acoplaría al módem. En caso de instalación es necesaria una antena por concentrador.
- Módem: Es el elemento encargado de transmitir y recibir la información que se transmite entre el concentrador y el centro de control. Es necesario uno por concentrador.
- Tarjeta SIM: Aunque es un elemento que va intrínsecamente ligado al módem, debido a las diferentes zonas de coberturas de cada operadora existente, es necesario establecer criterios a la hora de insertar una tarjeta en un módem. Como se ha comentado con anterioridad, para evitar la manipulación que pueda deteriorarlas, sólo se gestionarán desde el CGC, por lo que la contrata de campo no deberá cambiar una por otra, sino disponer de diferentes módems con distintas tarjetas SIM, de modo que pueda instalar la más adecuada. Se necesita una por concentrador.
- Concentrador: Es el elemento principal de la instalación. Este equipo vendrá configurado por el proveedor acorde con las especificaciones que se le ha indicado con anterioridad. Desde el Centro Logístico se le hará un Control de Calidad para controlar que esto ocurre de este modo.

Aunque en un principio estaba previsto que las placas de metacrilato pasasen todas por el centro logístico, como se explicará más adelante, tras completar la primera etapa del despliegue, se decide que lo más conveniente es que se les suministre a los equipos de campo tanto las placas con su interruptor automático como un stock de seguridad de antenas de ganancia. Aun así, está previsto que el propio centro logístico tenga un stock de seguridad de estos dos elementos de cara a poder suministrar a algún equipo de campo dichos materiales, en el caso que así lo requieran.

De esta forma se consigue reducir enormemente el tamaño del embalaje que saldrá del centro logístico. Desde este centro se enviará cada concentrador en un paquete independiente. Este paquete estará conformado por los siguientes elementos: un concentrador, un módem, que deberá ir montado con una tarjeta SIM,

Por otro lado, cabe indicar que los módems se recibirán desmontados dentro de su embalaje original, por lo que se deberán ensamblar y dejar preparados para la instalación de forma que el técnico de la empresa instaladora solo tenga que conectarlo a la alimentación y al concentrador.

Con esto queda definido el kit de instalación que se preparará y se enviará desde el Centro Logístico hacia las empresas instaladoras en campo.

4.3. Definición de las Etapas de Despliegue

Una vez definidas las características y funciones de cada uno de los agentes dentro del proceso y del propio centro logístico, faltaría por definir las etapas en las que se realizará la implantación, así como los volúmenes de unidades que se van a gestionar y por consiguiente el dimensionado del propio almacén.

Hay que tener en cuenta que esta es la primera vez que se implantará una red inteligente con tantos suministros afectados, por lo que no se tienen antecedentes que permitan anticipar posibles problemas que puedan surgir en este proyecto.

De este modo el hecho de dividir la implantación en varias etapas responde a la necesidad de controlar el proceso desde el principio, permitiendo así una rápida reacción en el caso de ser necesario algún cambio en el planteamiento inicial. En este proceso se pueden dar varios tipos de incidencias que a priori no se controlan, como pueden ser: problemas de cobertura de los equipos de comunicación, errores no previstos en la fase de diseño, idoneidad del kit de instalación o problemas de calidad en los equipos implantados.

Además, habrá que dar respuesta a la implantación masiva de contadores que irá en paralelo, por lo que es importante garantizar que el proceso no se detiene o ralentiza por la implantación del concentrador. Más si cabe, cuando el esfuerzo para realizar la renovación de los contadores ya provocará cierta saturación en los recursos de los equipos de campo.

Por todo lo descrito anteriormente se ha decidido realizar la implantación de forma escalonada, dividida en tres etapas diferenciadas:

- 1ª Etapa: Prueba Piloto en entorno controlado.
- 2ª Etapa: Prueba Piloto en todo el ámbito del proyecto.
- 3ª Etapa: Implantación Masiva

4.3.1. Primera etapa: Prueba piloto en entorno controlado

En esta primera etapa lo que se pretende, más allá de suministrar el apoyo necesario a los contadores telegestionados, es estudiar de forma detallada todos los procedimientos definidos para la implantación masiva.

Por este motivo se decide que esta etapa no conlleve un número elevado de instalaciones y que estas se hagan en entornos controlados. Se eligen 300 centros como candidatos a participar en esta primera fase y se estima un periodo de implantación de unos 4 meses.

Por otro lado, se considera un entorno controlado aquel donde se conozca todo acerca del centro donde se va a llevar a cabo la instalación. Es decir, se conozca su ubicación física, sin posibilidad de error por coordenadas incorrectas (se descartan ubicaciones rurales que puedan producir este tipo de error), así como la cobertura que existe en dicho punto (calidad de la señal y operadora que presenta dicha señal), evitando que se pueda dar la situación de realizar una instalación y que ésta no sea operativa por falta de cobertura de la operadora instalada.

Durante esta etapa se controlará lo siguiente:

- Calidad de los concentradores: Se verificarán diferentes puntos como:
 - Comprobar que los concentradores vienen con la configuración correcta de fábrica: hay que verificar que el firmware instalado cumple con los requisitos exigidos al proveedor.
 - Comprobar cómo responde a la integración dentro de la red: es decir, si responde positivamente a las señales que se le envíe desde el centro de control y si devuelve la información solicitada.
 - Comprobar el funcionamiento a medio plazo: de este modo se comprueba la fiabilidad de los concentradores.
- Fiabilidad de los estudios de cobertura: A pesar de que las operadoras garantizan unos niveles de cobertura, se comprobará si se cumple con lo aportado por las mismas o hay que realizar estudios independientes.
- Idoneidad de las soluciones adoptadas para la instalación en campo. Es decir, verificar que es posible instalar el concentrador con los demás materiales auxiliares dentro de los Centros de Transformación sin demasiada dificultad.

En esta etapa se aprovechará para detectar y definir las tareas que implicará el proceso de gestión de los concentradores. De esta forma quedará definido el diagrama de flujo del proceso. Una vez se finalice esta etapa se analizarán estos puntos y se modificarán los procedimientos que se considere necesario a la vista de los resultados obtenidos.

4.3.2. Segunda etapa: prueba de carga en todo el ámbito del proyecto

En esta segunda etapa lo que pretende es comprobar que los sistemas y las diferentes áreas están preparadas para soportar la carga de trabajo que se prevé. Por este motivo en este caso la implantación será más voluminosa que en la fase anterior y no se tendrá un entorno tan controlado como en la fase anterior.

Se decide realizar una instalación de 11.500 concentradores en un periodo de 8 meses. Y lo que se controlará en esta etapa es lo siguiente:

- Capacidad de los proveedores para abastecer con los diferentes equipos y materiales al proyecto.
- Capacidad de los contratistas para absorber la carga de trabajo asignada.
- Capacidad del Centro Logístico para preparar los equipos y realizar los envíos en tiempo y forma.
- Capacidad de Área Logística para cubrir posibles eventualidades como el retraso en la entrega de equipamientos.
- Capacidad del Área de Planificación para redistribuir el trabajo en las situaciones en las que se detecte alguna desviación con respecto a la planificación inicial.
- Capacidad del Centro de Control y de sus sistemas para controlar los equipos instalados para conformar la red inteligente.

Dentro de esta etapa se contempla también la medición de tiempos que permita realizar la optimización de cara a la fase final de implantación.

Al finalizar esta etapa se analizarán los resultados y se procederá a modificar los procedimientos que sean necesarios por los conocimientos adquiridos en esta fase.

4.3.3. Tercera etapa: implantación masiva

Esta tercera etapa es la que se puede considerar como la implantación propiamente dicha. En esta etapa se instalará el resto de los concentradores hasta llegar a una cifra cercana a los 150.000 equipos. Esto ya no se puede considerar una etapa de prueba como las dos anteriores, por lo que su función principal será la de verificar que los resultados de las simulaciones y estudios se cumplen en la práctica. Por este motivo se realizará un seguimiento a los procesos y a los diferentes agentes que intervienen de modo que se cumplan los plazos previstos.

En esta etapa se prevé la implantación de 140.000 concentradores, distribuidos en 4 años, a una media aproximada de 35.000 concentradores anuales.

4.3.4. Volúmenes del proceso de implantación

Debido a que la red necesita de los concentradores para que se pueda gestionar como una red inteligente, es necesario que se vayan instalando simultáneamente con los contadores. De forma que todo contador instalado tenga un concentrador con el que comunicarse. Se calculó que el volumen total de concentradores a instalar sería de 150.000. Además, para el caso que nos ocupa el periodo de implantación es de 4 años.

Como se ha explicado en los apartados anteriores la instalación se hará de forma escalonada. Se comenzará con una prueba piloto o ensayo de solo 300 concentradores en un entorno controlado, que tendrá una duración de 4 meses, para continuar con una segunda fase de prueba, pero en todo el ámbito del proyecto. Esta segunda fase será de unos 11.500 concentradores a instalar en un periodo de 8 meses. Por último, el resto hasta los 150.000 concentradores se harán en el tiempo restante hasta completarse todo el proceso en los 4 años previstos.

De todos modos, se estima oportuno dimensionar el centro logístico para que haga frente a la carga máxima sin tener que modificar su ubicación o configuración durante todo el proceso.

Con estas premisas se procede a calcular el volumen de concentradores que habrá que gestionar durante la última etapa del proyecto. Se estima que el volumen a gestionar en esta etapa será un poco inferior a los 140.000 concentradores. En la siguiente tabla se especifica el volumen de llegada mensual de cada equipo, para las dos etapas previstas:

Material	Volumen mensual	
	2ª Etapa	3ª Etapa
Concentrador	1.438	2.874
Módem	1.438	2.874
Tarjeta SIM	1.438	2.874

Tabla 4-1: Volumen mensual de concentradores

Con estos números, y por simplicidad a la hora de evaluar las frecuencias de llegada en los modelos de simulación, se establecerá una cadencia de llegada de 720 concentradores cada semana.

Hay que hacer una mención en este punto con respecto a la frecuencia de entrega. El compromiso con los proveedores es llegar a esa cifra, por lo que a la hora de estudiar el modelo, no se deberá superar esa tasa de producción ya que no será posible alcanzarla, o en su defecto los recursos estarán ociosos. En cambio, si a la hora de buscar el proceso más óptimo, se necesita una reducción en el ritmo de entrega, este se podrá pactar con los proveedores de cara a conseguir optimizar el espacio requerido.

4.3.5. Dimensionado del almacenamiento en el Centro Logístico

Para poder realizar esta tarea con la mayor precisión posible, es necesario conocer tanto el modo en que se van a recibir los distintos elementos como el espacio necesario para su procesado, como el modo en que se enviarán los equipos.

Con este fin a continuación se procederá a definir las características de cada tipo de elemento que se almacenará y de los espacios que requerirán para ello:

- **Concentradores:** los concentradores se reciben en cajas de 6 concentradores cada una, y estas a su vez se montan en un palet europeo, con capacidad para 12 cajas. Es decir, cada palet puede contener 72 concentradores.
 - Caja: la caja del concentrador ocupa una superficie de 0,6mx0,4m, con una altura de 0,25m y el máximo apilamiento es de 5 cajas.
 - Palet: al tratarse de un palet europeo sus dimensiones son de 1,2mx0,8m, los cuales no pueden ser apilados unos encima de otros.
- **Módems:** los módems se reciben en cajas de 50 módems cada una, y estas a su vez se montan en un palet europeo, con capacidad para 6 cajas. Es decir, cada palet puede contener 300 módems.
 - Caja: la caja del módem ocupa una superficie de 0,55mx0,45m, con una altura de 0,35m y el máximo apilamiento es de 5 cajas.
 - Palet: al tratarse de un palet europeo sus dimensiones son de 1,2mx0,8m, los cuales no pueden ser apilados unos encima de otros.
- **Tarjetas SIM:** las tarjetas SIM no representan un gran problema de almacenamiento ya que su tamaño es muy reducido. Estas tarjetas se recibirán en cajas de 480 tarjetas cada una. Con unas dimensiones de 0,5mx0,4m.

Ahora hay que definir como se embalarán los elementos que se envíen desde el Centro Logístico; es decir los kits de instalación. Para controlar en todo momento lo que se instala en cada centro de transformación se decide que los kits que se envíen desde el Centro Logístico a los equipos de campo no puedan ser desagregados. Es decir, si un equipo de campo tiene algún inconveniente en la instalación de algún elemento de un kit en el centro de transformación, ésta deberá desinstalar todos los elementos y proceder a una nueva instalación con otro kit completamente diferente. De esta forma se conoce a priori cada concentrador con qué módem va asociado y, por consiguiente, con qué tarjeta SIM se “despertará” por primera vez en campo. Facilitando así la detección de errores si se recibe alguna información incongruente.

Por este motivo cada kit irá embalado de forma independiente, con lo que las dimensiones del paquete deberán ser las necesarias para contener los diferentes elementos de un solo kit.

Esto es importante porque no sólo hay que tener en cuenta el espacio que ocuparán los equipos y materiales al recibirse, sino que habrá que tener en cuenta el espacio que ocupan los kits una vez estén preparados para

darles salida. Para ello se miden todos los elementos o las cajas donde vienen contenidos.

De este examen se obtienen los siguientes resultados:

- Concentrador: 320mm x 210mm x 75mm.
- Módem: 220mm x 110mm x 70mm. Debido a la forma irregular y curva de alguna de sus caras se toman las medidas de la caja en la que vienen embalado individualmente cada módem.

Además, se decide reservar un espacio en los embalajes por si en algún momento a demás e los equipos es necesario enviar algún otro elemento adicional como una antena de ganancia o conectores de perforación.

Con estas consideraciones y con la necesidad de que las dimensiones permitan incorporar los kits en palets europeos, se realiza el estudio del embalaje.

Tras estudiar varias configuraciones se estiman dos posibles configuraciones finales. Una primera donde todo se coloca a la misma altura (con lo que la altura de la caja no superará los 80mm):

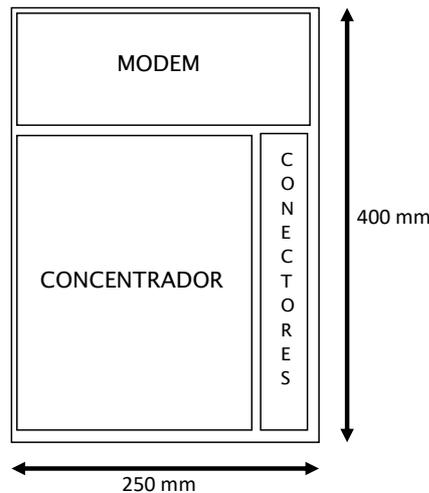


Figura 4-5: Primera configuración para el kit de instalación

Para conseguir esta configuración es necesario extraer el módem de su caja original y acoplarlo en la parte superior, ya que si no se excederían los 400mm requeridos. Además, los conectores se deben colocar sueltos junto al concentrador.

Esta configuración es muy compacta y una de las medidas es compatible con las medidas del pallet europeo, pero presenta algunos inconvenientes como son el hecho de que vayan piezas sueltas y menos protegidas. Por este motivo de seleccionarse este sistema se debería tener en cuenta algún sistema de protección interna que separe proteja los distintos elementos entre sí y de posibles golpes externos.

La otra configuración que se estima es una configuración a dos alturas (dejando la altura de la caja en 170mm). En una primera iría el concentrador y en la segunda se colocaría el módem y los conectores:

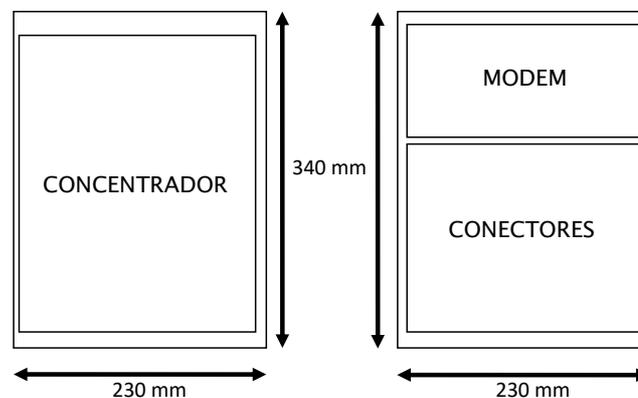


Figura 4-6: Segunda configuración para el kit de instalación

Esta configuración es menos compacta que la anterior, pero al ajustarse más a las medidas del concentrador, evita que este se mueva dentro del recipiente y por consiguiente vaya más protegido. También está diseñado para que se pueda introducir el módem con su caja, aportando otro extra de protección a este equipo. Si bien es verdad que al poder tener conectores apoyados sobre el concentrador, hay que estudiar algún sistema de protección adicional.

Con estas dos posibles configuraciones se contacta con varios proveedores de cajas de cartón para obtener una opinión acerca de cuál de las dos se puede considerar más segura para los equipos que se van a enviar.

Esta consulta arroja como resultado que la mejor configuración es la segunda por dos motivos principalmente. El primero de ellos es que aunque la primera es más compacta y permitiría agrupar un mayor número de ellas en un pallet, ésta requeriría de un cartón más resistente que la segunda configuración. Hay que tener en cuenta que en esa primera configuración todos los elementos van sueltos, sin nada que pueda ayudar a la estructura de la caja a soportar mayor peso. En cambio, la segunda configuración al tener las dimensiones del concentrador y tener la caja del módem se refuerza por si misma al ser apilada en varias alturas.

El otro motivo que prima la segunda configuración frente a la primera es el método para proteger el concentrador. En esta segunda configuración bastaría con colocar un separador de cartón del tamaño de la planta de la caja, de modo que se creen dos compartimentos separados, para que el concentrador quede aislado del resto de elementos de la caja. Y como apunte, indicar que este separador es sencillo de conseguir por parte de los proveedores al poseer una de las dimensiones de la caja original, por lo que su coste sería algo muy reducido.

De este modo se decide optar por la segunda configuración, que es la siguiente:

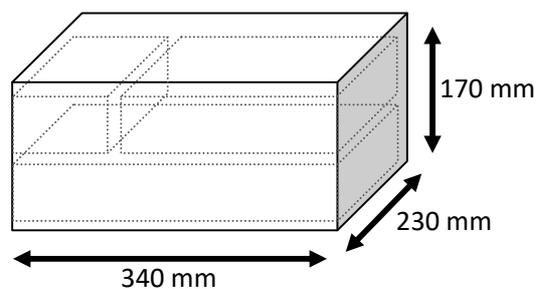


Figura 4-7: Configuración seleccionada para el kit de instalación

Con toda la información recaba acerca de las dimensiones de los diferentes elementos, ya se puede realizar el estudio del dimensionado del almacén.

De este modo lo que se buscará es minimizar el número de m^2 necesarios para gestionar el volumen previsto de equipos. Habrá que estudiar las diferentes colas que se formen en el sistema para determinar la superficie mínima necesaria. Una vez se tenga esta superficie se podrá asignar un coste a esta y así deducir qué escenario es el más favorable.

5 APLICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS

Una vez definida la empresa y el producto, hay que definir las herramientas que se van a utilizar en el proyecto y cómo se van a parametrizar en el problema de optimización. Esto se realizará utilizando primero la simulación, para la que habrá que diseñar un modelo que se ajuste al sistema a estudiar. Además, habrá que analizar cómo se comportaría el modelo si se le aplica la teoría de equilibrado de líneas, donde habrá que definir si lo que se quiere es minimizar el número de estaciones dado un tiempo de ciclo determinado, o por el contrario lo que se pretende es minimizar el tiempo de ciclo para un número de estaciones predefinidas.

Por último, con los resultados obtenidos habrá que comprobar que escenario es el más favorable. Para llegar a esta conclusión se realizará un análisis de costes y se buscará aquel escenario que permita ofrecer el precio de referencia más bajo.

5.1. Simulación: definición del modelo

En el presente apartado se definirá el modelo que se empleará tanto para la simulación como para el análisis a través del equilibrado de líneas. Para ello, se describirán los procesos, subprocesos y tareas que intervienen en el proceso global y que se implementarán en el modelo. Definiendo así el diagrama de flujo del proceso. También se realizará un estudio de tiempos para cada una de las tareas que se describan en el diagrama de flujo. Y finalmente se definirá el modelo de simulación que servirá de base para la experimentación.

5.1.1. Definición de tareas: Diagrama de flujo

Tal y como se ha descrito en apartados anteriores, gracias a la división en varias etapas del proceso de implantación, se pudo aprovechar la primera etapa para definir los distintos procesos que forman parte del proceso completo.

A modo general y de forma no exhaustiva, a continuación, se especifica lo que está previsto realizar desde que se reciben los equipos y materiales hasta que son preparados y enviados para su instalación.

Una vez se reciban los equipos y materiales, habrá que darlos de alta en las bases de datos del centro logístico y almacenarlos.

Para la preparación de los kits de instalación será necesario que estos equipos y materiales se trasladen desde la zona de almacenamiento a la zona de trabajo. La tarea principal de este proceso, que además explica la existencia del propio centro logístico de concentradores, es la de ensamblar el módem. Esta tarea es compleja ya que requiere unir un cable del concentrador con 4 pines y uno del módem con 2 pines. Esto se hará utilizando regletas de conexión. Además, habrá que introducir la tarjeta SIM en el módem de forma que quede preparado para su instalación, sin que el personal de campo tenga que abrirlo ni manipularlo. Esta tarjeta SIM deberá asociarse a través de la base de datos al módem al que pertenece de forma que la relación sea unívoca.

Por último, para el envío de kits de instalación será necesario por un lado preparar los embalajes correspondientes junto a sus protecciones y por otro preparar los equipos que haya que introducir en dichos embalajes, así como asociar el módem con el concentrador correspondiente de forma que esta relación también sea unívoca y no se puedan separar.

5.1.1.1 Identificación de procesos

Una vez descrito el proceso general hay que definir los procesos, subprocesos y tareas que permitan realizar todo lo descrito anteriormente.

En primer lugar, se pueden distinguir 3 procesos principales: recepción de equipos y materiales, ensamblado y preparación de equipos (kits de instalación) y envío de kits de instalación.

Procesos principales
Recepción de equipos y materiales
Ensamblado y preparación de equipos
Envío de kits de instalación

Tabla 5-1: Procesos principales en el modelo

Hay que aclarar que, aunque los procesos de gestión de la información se pueden considerar como algo independiente, se ha decidido por simplicidad dividirlos e incluirlos dentro de los procesos principales que se han descrito anteriormente.

A continuación, se describen los subprocesos dentro de los tres procesos principales y las tareas involucradas en dichos procesos:

- Recepción de equipos y materiales: consiste en recibir correctamente los diferentes equipos y materiales previstos. Dentro de este proceso se encuentran los siguientes subprocesos:
 - Recepción de concentradores
 - Recepción de módems
 - Recepción de tarjetas SIM
- Ensamblado y preparación de equipos: consiste principalmente en el traslado de los equipos a la zona de trabajo, ensamblado del cable módem-concentrador y ensamblado del módem, incluyendo la introducción de la tarjeta SIM en el módem, dentro de este proceso.
 - Preparación concentradores
 - Preparación módem
 - Ensamblado de módem
- Envío de kits de instalación: consiste en la preparación del embalaje y materiales de protección para los equipos, en la introducción de dichos equipos en estos embalajes, la preparación para darle salida, como la asociación concentrador- módem en las bases de datos y el envío propiamente dicho a través de empresa de transporte.
 - Preparación de embalaje
 - Asociación concentrador-módem
 - Etiquetado y preparación para salida
 - Envío de kits de instalación

De esta forma los procesos y subprocesos quedan tal y como se relaciona a continuación:

Procesos principales	Subprocesos
Recepción de equipos y materiales	Recepción de concentradores
	Recepción de módems
	Recepción de tarjetas SIM
Ensamblado y preparación de	Preparación concentradores

equipos	Preparación de módems
	Ensamblado de módems
Envío de kits de instalación	Preparación de embalajes
	Asociación concentrador-módem
	Etiquetado y preparación para salida
	Envío de kits de instalación

Tabla 5-2: Subprocesos del modelo

5.1.1.2 Definición de tareas

Una vez se tienen definidos los procesos principales y los subprocesos se pueden definir las tareas que afectarán a cada uno de ellos:

- Recepción de equipos y materiales:
 - Recepción de concentradores:
 - Recepción del envío de concentradores: recepción física de los concentradores, descarga y firma de albaranes del proveedor.
 - Alta concentradores en la base de datos: digitalización de los códigos de cada concentrador para dar entrada en la base de datos.
 - Almacenamiento de concentradores: despaletizado de los concentradores y traslado a la zona de almacenamiento habilitada para los concentradores. Apilamiento según especificaciones del proveedor, en columnas de 5 cajas de altura como máximo.
 - Recepción de módems:
 - Recepción del envío de módems: recepción física de los módems, descarga y firma de albaranes del proveedor.
 - Alta módems en la base de datos: digitalización de los códigos de cada módem para dar entrada en la base de datos.
 - Almacenamiento de módems: despaletizado de los módems y traslado a la zona de almacenamiento habilitada para los módems. Apilamiento según especificaciones del proveedor, en columnas de 3 cajas de altura como máximo.
 - Recepción de tarjetas SIM:
 - Recepción del envío de tarjetas SIM: recepción física de las tarjetas SIM, descarga y firma de albaranes del proveedor.
 - Alta tarjetas SIM en la base de datos: digitalización de los códigos de cada tarjeta SIM para dar entrada en la base de datos.
 - Almacenamiento de tarjetas SIM: traslado a la zona de almacenamiento habilitada para las tarjetas SIM. Debido a su reducido tamaño, se estudia la posibilidad de mantener estas tarjetas siempre en la zona de trabajo, consiguiendo así reducir tiempos de traslado de materiales.
- Ensamblado y preparación de equipos
 - Preparación de concentradores:
 - Traslado de concentradores: traslado de los concentradores desde la zona de almacenamiento hasta la zona de trabajo.
 - Identificar con un logotipo: cada equipo debe llevar un logotipo de la empresa para identificarlo como elemento propio de la red.
 - Extracción del cable del concentrador: este subproceso se aprovecha precisamente para obtener el cable que hay que ensamblar con el módem.

- Preparación de módems:
 - Traslado de módem: traslado de los módems desde la zona de almacenamiento hasta la zona de trabajo.
 - Extracción del cable del módem: extracción del cable que permitirá ensamblarlo al cable del concentrador.
- Ensamblado de módems
 - Asociación módem-SIM: asociación en la base de datos del código de cada módem con el ID de la tarjeta SIM introducida.
 - Ensamblado cable concentrador-módem: conexionado, a través de una regleta de conexión, del cable del concentrador con el cable del módem.
 - Ensamblado módem: cierre del módem con la tarjeta SIM y el cable correctamente conexionado y ensamblado.
- Envío de kits de instalación
 - Preparación de embalajes:
 - Preparación de cajas: montaje de cajas con precinto, preparación de separadores y corte de plástico de burbujas para el interior de los paquetes.
 - Asociación concentrador-módem:
 - Asociación concentrador-módem: asociación en la base de datos del código de cada concentrador con código del módem que se enviarán de forma conjunta.
 - Introducción de equipos en los embalajes: introducción de concentrador y módem asociados previamente en un único embalaje, junto con los restantes elementos auxiliares y de protección. Incluye igualmente el precintado de los embalajes.
 - Etiquetado y preparación para la salida
 - Impresión y etiquetado de embalajes: se imprimirán etiquetas donde conste el concentrador, módem y tarjeta SIM que contiene cada embalaje. Esta tarea incluye tanto la tarea de preparar la impresión y la propia impresión como de pegado sobre cada una de las cajas del envío.
 - Envío de kits de instalación:
 - Embalado de los kits: introducir los equipos en el correspondiente embalaje de forma que se convierta en un conjunto indivisible en el envío.
 - Traslado de los Kits a la zona de salida: traslado de los kits en sus respectivos embalajes a la zona de salida.
 - Paletizado de los kits de instalación: los kits se agruparán en palets de forma que se gestione mejor la salida de los equipos.

Con esta definición de tareas se puede deducir la siguiente tabla con la consiguiente codificación:

Código	Descripción
1	Recepción de equipos y materiales
1.1	Recepción de concentradores:
1.1.1	Recepción del envío de concentradores
1.1.2	Alta concentradores en la base de datos
1.1.3	Almacenamiento de concentradores

1.2	Recepción de módems:
1.2.1	Recepción del envío de módems
1.2.2	Alta módems en la base de datos
1.2.3	Almacenamiento de modems
1.3	Recepción de tarjetas SIM:
1.3.1	Recepción del envío de tarjetas SIM
1.3.2	Alta tarjetas SIM en la base de datos
1.3.3	Almacenamiento de tarjetas SIM

Tabla 5-3: Tareas asociadas al proceso Recepción de equipos y materiales

Código	Descripción
2	Ensamblado y preparación de equipos
2.1	Preparación concentradores:
2.1.1	Traslado de concentradores
2.1.2	Identificar con un logotipo
2.1.3	Extracción del cable del concentrador
2.2	Preparación módem:
2.2.1	Traslado de módem
2.2.2	Extracción del cable del módem
2.4	Ensamblado de módem:
2.4.1	Asociación módem-SIM
2.4.2	Ensamblado cable concentrador-módem
2.4.3	Ensamblado módem

Tabla 5-4: Tareas asociadas al proceso Ensamblado y preparación de equipos

Código	Descripción
3	Envío de kits de instalación
3.1	Preparación de embalaje:
3.1.1	Preparación de cajas
3.2	Asociación concentrador-módem:
3.2.1	Asociación concentrador-módem
3.2.2	Introducción de equipos en los embalajes
3.3	Etiquetado y preparación para salida:
3.3.1	Impresión y etiquetado de embalajes
3.4	Envío de kits de instalación:

3.4.1	Embalado de los kits
3.4.2	Traslado de los Kits a la zona de salida
3.4.3	Paletizado de los kits

Tabla 5-5: Tareas asociadas al proceso Envío de kits de instalación

5.1.1.3 Diagrama de flujo

A partir de la información desarrollada en los apartados anteriores, se puede establecer un diagrama de flujo que recoja estos procesos. Para facilitar la comprensión algunas tareas se han desglosado del subproceso, de forma que se haga más comprensible los flujos del modelo:

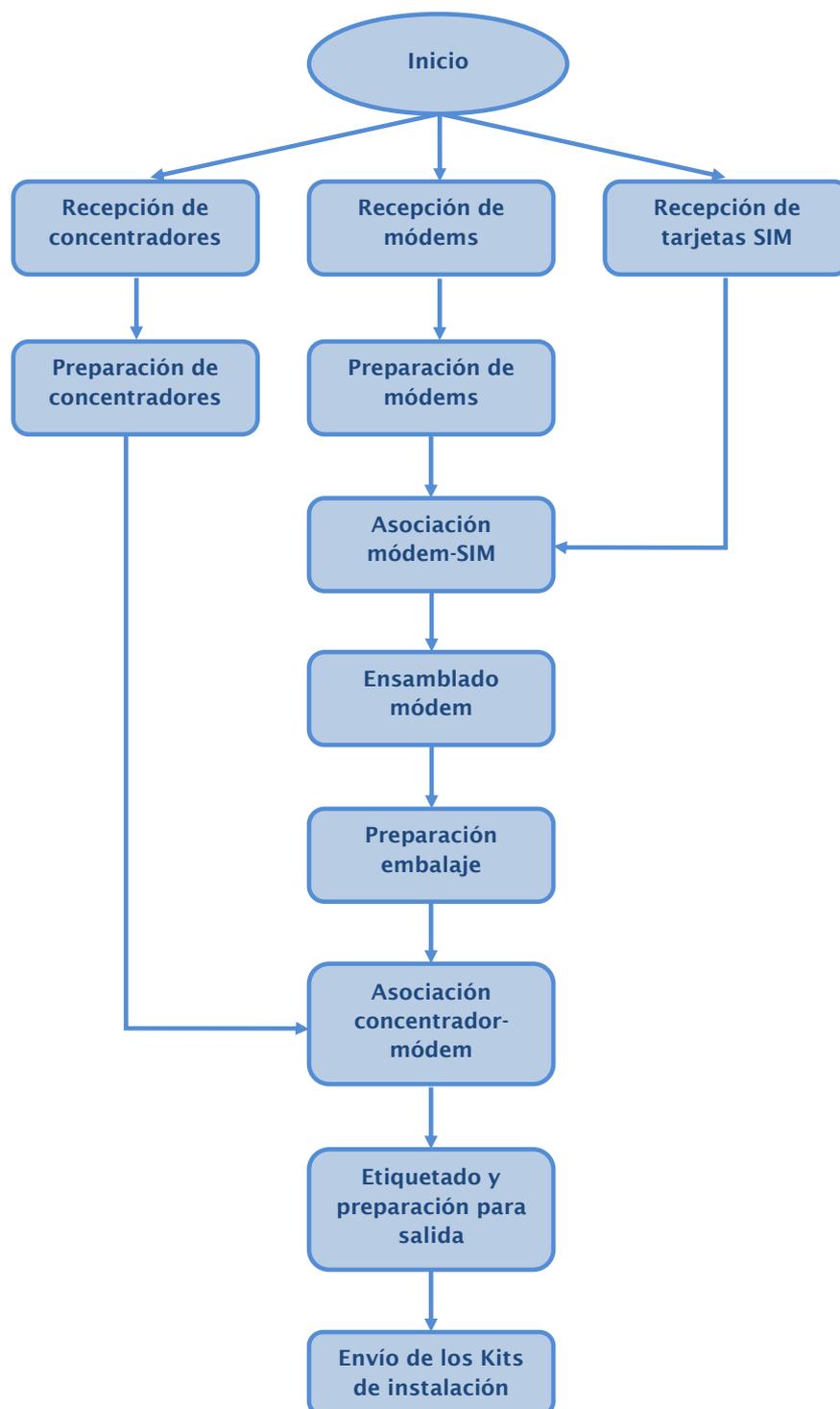


Figura 5-1: Diagrama de flujo del modelo

5.1.2. Tiempos de cada proceso

Como se ha explicado en apartados anteriores, uno de los objetivos por parte del centro logístico de concentradores en la segunda etapa es la de realizar una medición de tiempos exhaustiva de todas y cada una de las tareas descritas.

Estos tiempos medidos serán los que se utilizarán tanto en la simulación como en el estudio de equilibrado de líneas.

5.1.2.1 Estudio de tiempos:

Para analizar los tiempos de esta etapa se recurre a series de trabajo largas. Como muestra del volumen analizado se puede indicar que para los concentradores se llega hasta series de 3.312 unidades y para los módems y su ensamblado se alcanza la cifra de 805 unidades.

A continuación, se presentan los números obtenidos en dichas series, con los tiempos medios obtenidos para cada una de las tareas. Estos tiempos han sido medidos en minutos:

Código	Descripción	Tiempo Ud.	Min.	Uds.
1	Recepción de equipos y materiales	1,04		
1.1	Recepción de concentradores:	0,57		
1.1.1	Recepción del envío de concentradores	0,06	184	3.312
1.1.2	Alta concentradores en la base de datos	0,30	205	678
1.1.3	Almacenamiento de concentradores	0,21	695	3.312
1.2	Recepción de módems:	0,32		
1.2.1	Recepción del envío de módems	0,02	20	1.200
1.2.2	Alta módems en la base de datos	0,23	180	800
1.2.3	Almacenamiento de modems	0,08	90	1.200
1.3	Recepción de tarjetas SIM:	0,16		
1.3.1	Recepción del envío de tarjetas SIM	0,01	15	1.440
1.3.2	Alta tarjetas SIM en la base de datos	0,13	150	1.200
1.3.3	Almacenamiento de tarjetas SIM	0,02	24	1.200

Tabla 5-6: Tiempos asociados al proceso Ensamblado y preparación de equipos

Código	Descripción	Tiempo Ud.	Min.	Uds.
2	Ensamblado y preparación de equipos	7,29		
2.1	Preparación concentradores:	0,78		
2.1.1	Traslado de concentradores	0,19	150	804
2.1.2	Identificar con un logotipo	0,40	270	678
2.1.3	Extracción del cable del concentrador	0,20	135	678
2.2	Preparación módem:	0,21		
2.2.1	Traslado de módem	0,11	90	805

2.2.2	Extracción del cable del módem	0,10	80	805
2.4	Ensamblado de módem:	6,30		
2.4.1	Asociación módem-SIM	0,30	240	805
2.4.2	Ensamblado cable concentrador-módem	2,00	628	314
2.4.3	Ensamblado módem	4,00	3.220	805

Tabla 5-7: Tiempos asociados al proceso Ensamblado y preparación de equipos

Código	Descripción	Tiempo Ud.	Min.	Uds.
3	Envío de kits de instalación	4,63		
3.1	Preparación de embalaje:	0,49		
3.1.1	Preparación de cajas	0,49	405	820
3.2	Asociación concentrador-módem:	2,40		
3.2.1	Asociación concentrador-módem	0,90	359	399
3.2.2	Introducción de equipos en los embalajes	1,50	600	399
3.3	Etiquetado y preparación para salida:	0,43		
3.3.1	Impresión y etiquetado de embalajes	0,43	60	140
3.4	Envío de kits de instalación:	1,30		
3.4.1	Embalado de los kits	0,50	200	399
3.4.2	Traslado de los Kits a la zona de salida	0,50	375	750
3.4.3	Paletizado de los kits	0,30	225	750

Tabla 5-8: Tiempos asociados al proceso Envío de kits de instalación

Como resultado de la medición de tiempos, se comprueba que el proceso relativo al ensamblado y preparación de equipos es el más relevante, el cual supone el 56% del tiempo:

Código	Descripción	Tiempo Ud.	Peso (%)
1	Recepción de equipos y materiales	1,04	8,0%
2	Ensamblado y preparación de equipos	7,29	56,3%
3	Envío de kits de instalación	4,63	35,7%

Tabla 5-9: Peso relativo de cada uno de los procesos principales

Más concretamente el subproceso de ensamblado del módem, el cual y según este estudio de tiempos, necesita el 48% del tiempo total:

Código	Descripción	Tiempo Ud.	Peso (%)
1.1	Recepción de concentradores:	0,57	4,4%
1.2	Recepción de módems:	0,32	2,4%

1.3	Recepción de tarjetas SIM:	0,16	1,2%
2.1	Preparación concentradores:	0,78	6,0%
2.2	Preparación módem:	0,21	1,6%
2.4	Ensamblado de módem:	6,30	48,6%
3.1	Preparación de embalaje:	0,49	3,8%
3.2	Asociación concentrador-módem:	2,40	18,5%
3.3	Etiquetado y preparación para salida:	0,43	3,3%
3.4	Envío de kits de instalación:	1,30	10,0%

Tabla 5-10: Peso relativo de cada uno de los subprocessos

Con esta información recabada será con la que se realicen los estudios de simulación para identificar posibles cuellos de botella, así como encontrar el proceso más ventajoso a la hora de realizar las distintas tareas que nos ocupan.

5.1.3. Parametrización de los módulos utilizados en la simulación

Con la información recogida con los tiempos de proceso y el diagrama de flujo ya se puede comenzar a implementar el modelo en el software Arena. A continuación, se detalla cada módulo utilizado con sus parámetros fundamentales:

5.1.3.1 Create

En este caso necesitaremos crear 3 entidades al inicio de la simulación. Estas representarán a los concentradores, los módems y las tarjetas SIM. La tasa de creación se definió anteriormente y la definen los concentradores, los cuales se generan cada 120 horas (una semana de 5 días). Estos llegarán en 10 palets con 72 concentradores cada uno. Se ha creado un desfase entre las distintas entidades para ajustar los diferentes lotes de llegada al sistema. Así los módems llegan en lotes con 900 módems y las tarjetas SIM en lotes de 1.440 tarjetas por envío.

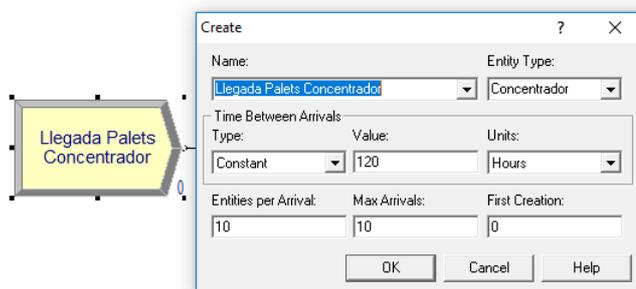


Figura 5-2: Módulo para la creación de la entidad Concentrador

Create - Basic Process								
	Name	Entity Type	Type	Value	Units	Entities per Arrival	Max Arrivals	First Creation
1	Llegada Palets Concentrador	Concentrador	Constant	120	Hours	10	10	0
2	Llegada Palets Modem	Modem	Constant	150	Hours	6	8	0
3	Llegada Cajas Tarjetas SIM	SIM	Constant	240	Hours	3	5	0

Figura 5-3: Parámetros de los módulos Create generados en el modelo

5.1.3.2 Dispose

Este módulo se ha colocado al final del proceso, por donde se eliminan del modelo al llegar los kits de instalación.

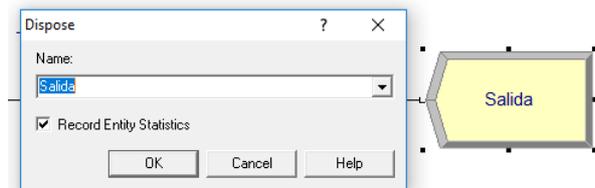


Figura 5-4: Módulo Dispose para la salida de las entidades del modelo

5.1.3.3 Process

Estos módulos serán alimentados con los tiempos descritos en el apartado anterior. Por otro lado y dado que lo que se pretende en primera instancia es la comparación entre diferentes escenarios, para el tiempo de proceso se considerará una función constante y no se le aplicará ninguna función variable, para evitar que el uso de ellas distorsione el resultado de la comparación.

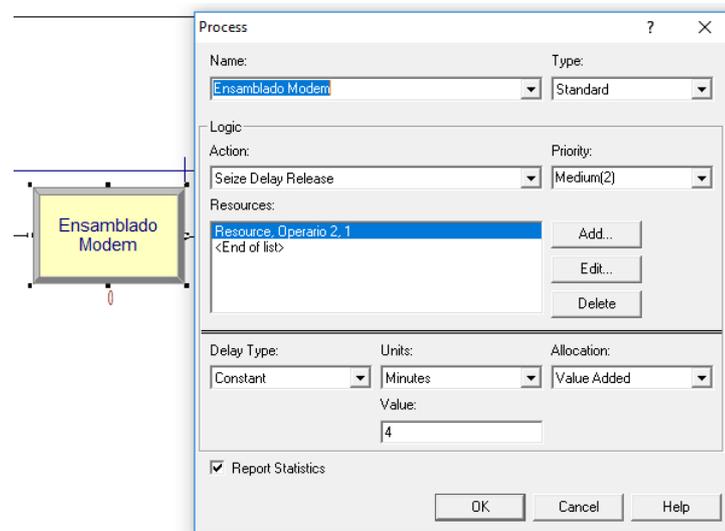


Figura 5-5: Módulo Process de la tarea Ensamblado Módem

En la siguiente tabla se muestra como se han codificado los procesos dentro del software y los tiempos asociados a dichos procesos:

Código	Tarea	T. (min.)
1	Recepción Concentrador	0,06
2	Almacenamiento Concentrador	0,21
3	Alta Concentrador	0,30
4	Recepción Modem	0,02
5	Almacenamiento Módem	0,08
6	Alta Módem	0,23

7	Recepción SIM	0,01
8	Almacenamiento Tarjeta SIM	0,02
9	Alta Tarjeta SIM	0,13
10	Pegar Etiqueta en Concentrador	0,40
11	Traslado Concentrador	0,19
12	Extracción Cable del Concentrador	0,20
13	Traslado Módem	0,11
14	Extracción Cable del Módem	0,10
15	Preparar Embalaje	0,49
16	Ensamblar cable	2,00
17	Ensamblar módem	4,00
18	Asociar Módem-SIM	0,30
19	Asociar Concentrador-Módem	0,90
20	Embalar el kit	1,50
21	Trasladar Kit	0,50
22	Etiquetar Kit	0,43
23	Paletizar kit	0,30

Tabla 5-11: Tiempos por tarea el modelo

Además, todos los procesos se han programado como un Seize-Delay-Release. Y no se han definido reglas de prioridad, salvo para los tres procesos de recepción de materiales, ya que se considera que estos procesos no deben esperar.

Process - Basic Process									
	Name	Type	Action	Priority	Resources	Delay Type	Units	Allocation	Value
1	Recepcion Concentrador	Standard	Seize Delay Release	High(1)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	4
2	Almacenamiento Concentrador	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	15.12
3	Alta Concentrador	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	21.6
4	Recepcion Modem	Standard	Seize Delay Release	High(1)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	5
5	Almacenamiento Modem	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	12
6	Alta Modem	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	34.5
7	Recepcion SIM	Standard	Seize Delay Release	High(1)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	5
8	Almacenamiento SIM	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	9.6
9	Alta SIM	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	62.4
10	Logo Corporativo	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	2.4
11	Traslado Concentrador	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	1.14
12	Extraccion Cable Concentrador	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	1.2
13	Traslado Modem	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	5.5
14	Extraccion Cable Modem	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0.1
15	Preparacion Embalaje	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0.49
16	Ensamblado Cable	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	2
17	Ensamblado Modem	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	4
18	Asociacion Modem SIM	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0.3
19	Asociacion Concentrador Modem	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	0.9
20	Embalado Kit	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	1.5
21	Traslado Kit	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	6
22	Etiquetado Kit	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	5.16
23	Paletizado Kit	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Constant	Minutes	Value Added	10.8

Figura 5-6: Parámetros de los módulos Process generados en el modelo

5.1.3.4 Batch

Este módulo se ha utilizado para realizar los diferentes ensamblados tanto del cable como del módem. Además, se ha utilizado para agrupar los kits a la hora de embalar, transportar y paletizarlos.

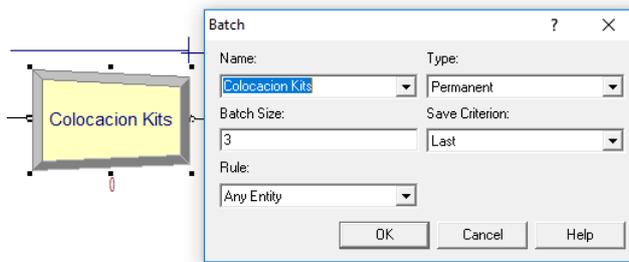


Figura 5-7: Módulo Batch de la tarea Colocación Kits

Batch - Basic Process					
	Name	Type	Batch Size	Save Criterion	Rule
1	Union Cables	Permanent	2	First	Any Entity
2	Union Modem	Permanent	3	First	Any Entity
3	Union Kit	Permanent	2	First	Any Entity
4	Agrupacion Kits	Temporary	12	Last	Any Entity
5	Colocacion Kits	Permanent	3	Last	Any Entity

Figura 5-8: Parámetros de los módulos Batch generados en el modelo

5.1.3.5 Separate

Este módulo se ha utilizado principalmente para desagregar los diferentes equipos. Es decir, para extraerlos de los palets o de las cajas. Otra utilización ha sido la de extraer un elemento como puede ser el cable del concentrador o del módem para su posterior ensamblado.

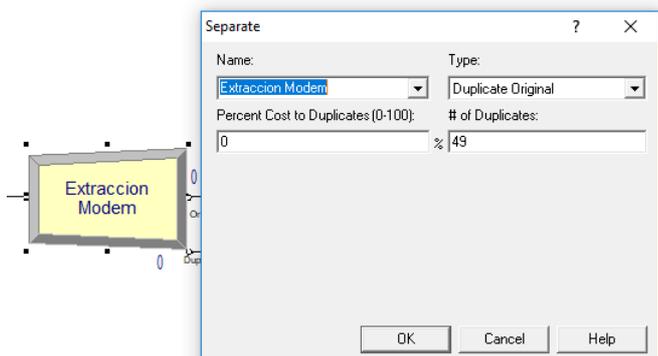


Figura 5-9: Módulo Separate de la tarea Extracción Módem

Separate - Basic Process				
	Name	Type	Cost to Duplicates	# of Duplicates
1	Despaletizado Concentrador	Duplicate Original	0	11
2	Almacenamiento Cable Concentrador	Duplicate Original	0	6
3	Despaletizado Modem	Duplicate Original	0	2
4	Extraccion Modem	Duplicate Original	0	49
5	Extraccion Concentrador	Duplicate Original	0	5
6	Extraccion SIM	Duplicate Original	0	479
7	Almacenamiento Cable Modem	Duplicate Original	0	1

Figura 5-10: Parámetros de los módulos Separate generados en el modelo

5.1.3.6 Match

Este módulo ha sido utilizado para garantizar que en los diferentes módulos Batch llegue una entidad de cada tipo. Esto ha sido necesario a la hora de ensamblar el cable, donde tenía que haber un cable de módem y un cable de concentrador, a la hora de ensamblar el módem, donde tenía que existir un módem, una tarjeta SIM y un cable ensamblado previamente, y a la hora de embalar los kits, donde era obligado que llegase un concentrador y un módem completamente ensamblado.

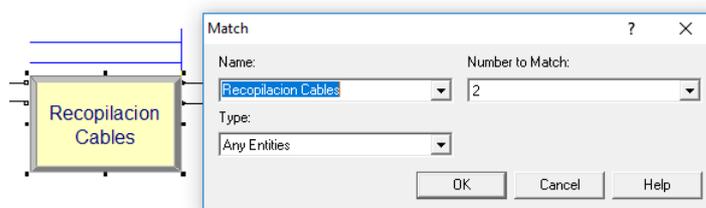


Figura 5-11: Módulo Match de la tarea Recopilación Cables

Match - Advanced Process			
	Match	Number to Match	Type
1	Recopilacion Cables	2	Any Entities
2	Recopilacion Modem	3	Any Entities
3	Recopilacion Kit	2	Any Entities

Figura 5-12: Parámetros de los módulos Match generados en el modelo

5.1.4. Parametrización de los módulos de datos utilizados en la simulación

Se describe a continuación los módulos de datos donde se han parametrizado alguna de sus características.

5.1.4.1 Entity

En este caso sólo se ha definido una imagen por cada entidad de cara a poder visualizar mejor el paso de las diferentes entidades por los distintos procesos.

Entity - Basic Process		
	Entity Type	Initial Picture
1	Concentrador	Picture.Box
2	Modem	Picture.Telephone
3	SIM	Picture.Report
4	Cable Concentrador	Picture.Yellow Page
5	Cable Modem	Picture.Blue Page

Figura 5-13: Parámetros del módulo de datos Entity generados en el modelo

5.1.4.2 Resource

Los recursos se han parametrizado de forma que se cumpla una jornada de trabajo de 8 horas en un día de 24 horas. Para ello, la capacidad se ha seleccionado basada en un calendario. Además, se ha seleccionado como regla (Pre-empt) que en el caso de que un recurso no haya finalizado una tarea cuando acaba su turno, este vuelva a iniciar el proceso en el instante que lo dejó.

Resource - Basic Process				
	Name	Type	Schedule Name	Schedule Rule
1	Operario 1	Based on Schedule	Jornada	Preempt
2	Operario 2	Based on Schedule	Jornada	Preempt
3	Operario 3	Based on Schedule	Jornada	Preempt
4	Operario 4	Based on Schedule	Jornada	Preempt

Figura 5-14: Parámetros del módulo de datos Resource generados en el modelo

5.1.4.3 Schedule

Como se ha indicado en el módulo Resource, este módulo se ha utilizado para definir una jornada laboral, definiendo la capacidad del recurso como cero en las primeras 8 horas y después de la hora 16.

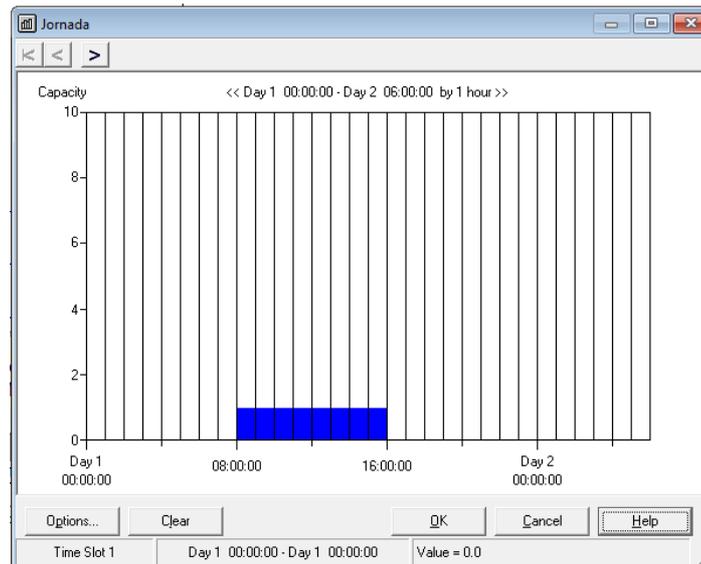


Figura 5-15: Definición del calendario Jornada que servirá para parametrizar los recursos

5.1.5. Modelo de simulación

Una vez definidos los módulos del modelo de simulación se muestra el modelo global con las relaciones entre los distintos módulos:

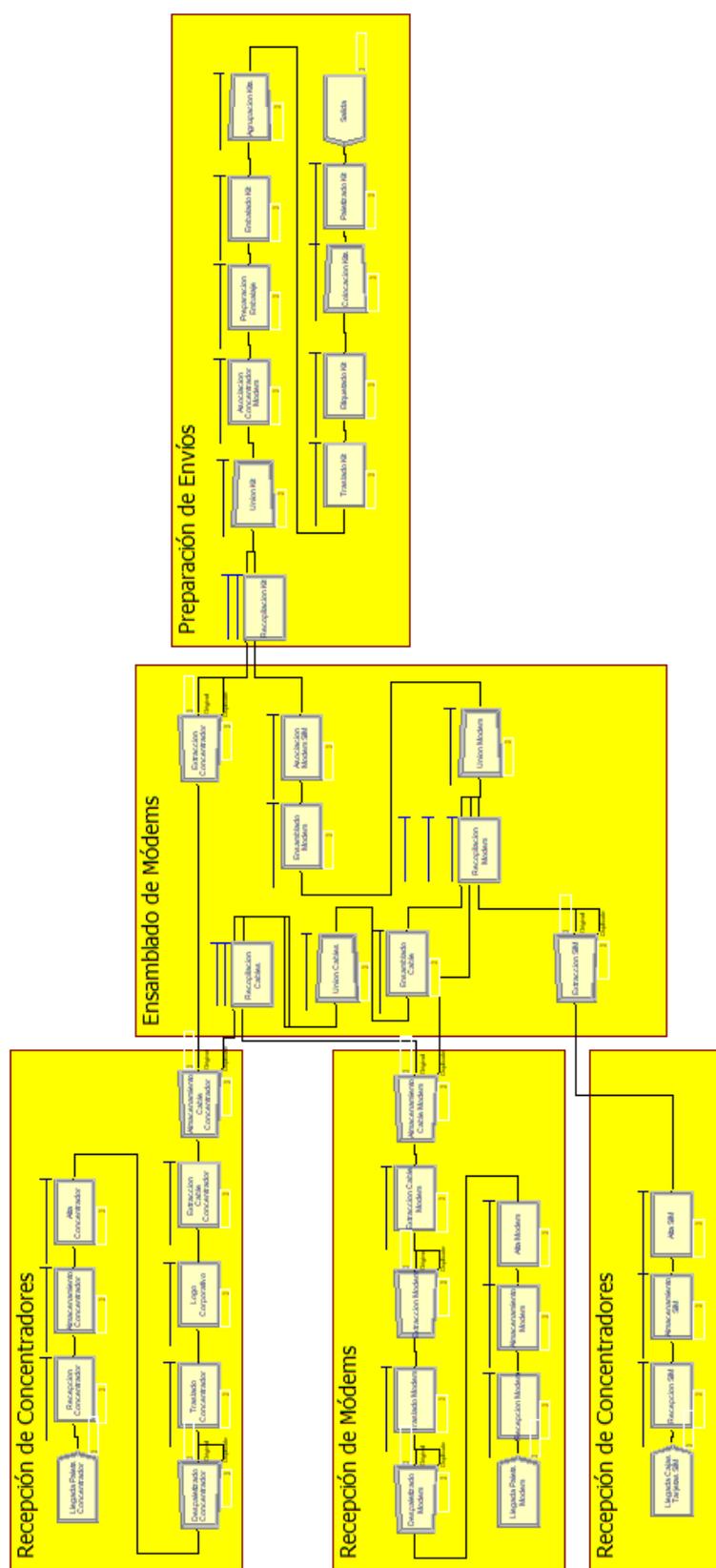


Figura 5-16: Vista completa del modelo de simulación en Arena

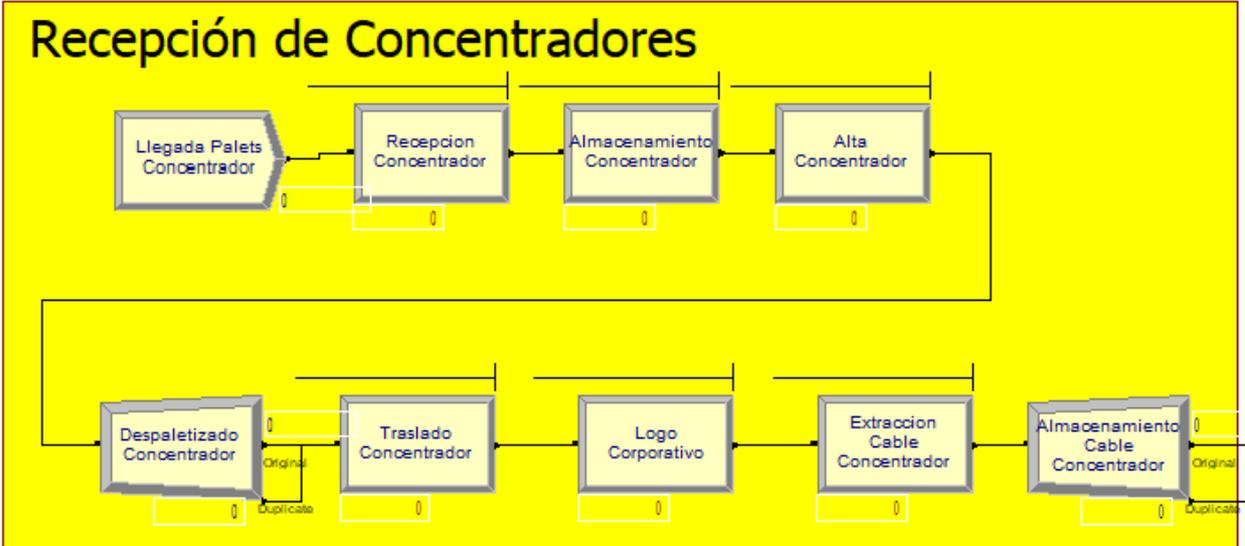


Figura 5-17: Modelado en Arena de los procesos de recepción y procesamiento de concentradores

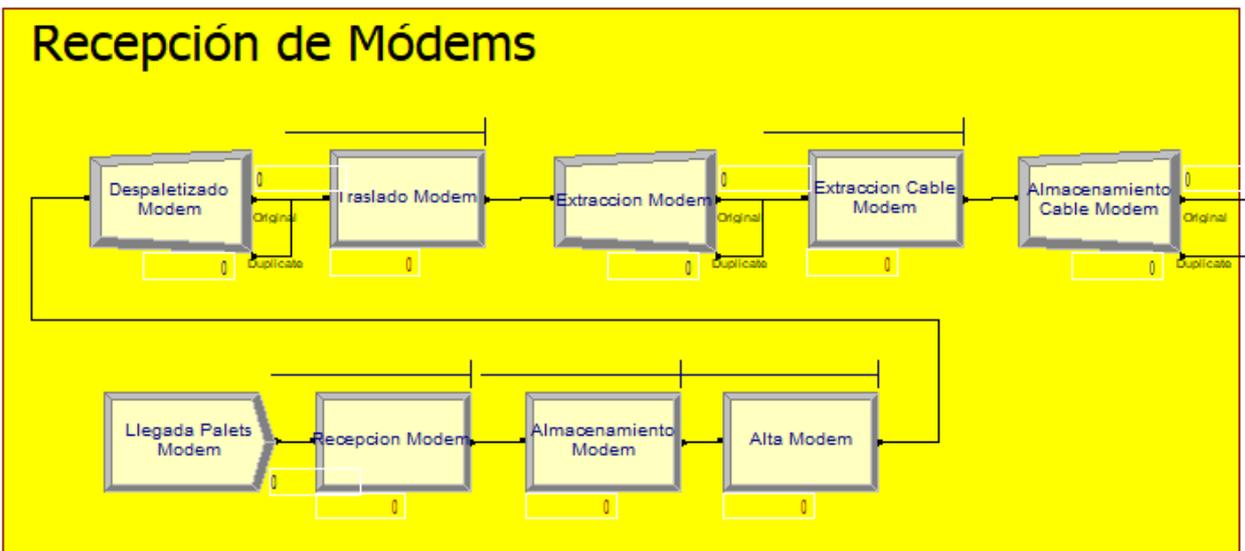


Figura 5-18: Modelado en Arena de los procesos de recepción y procesamiento de módem

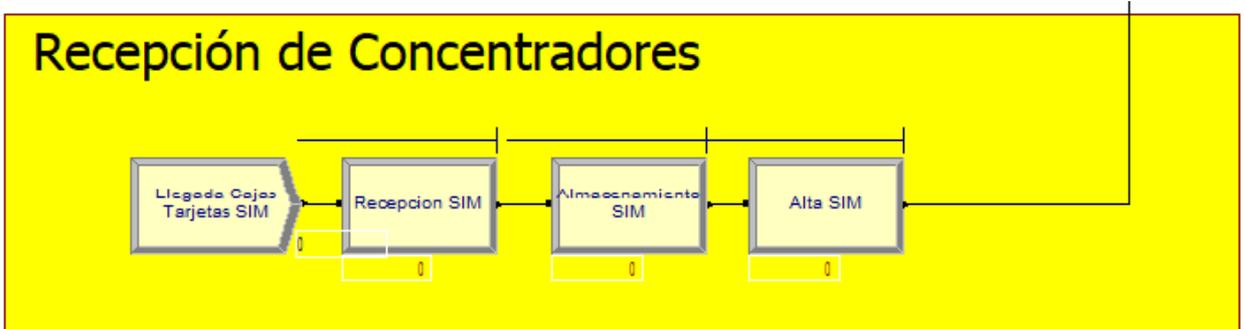


Figura 5-19: Modelado en Arena de los procesos de recepción de tarjetas SIM

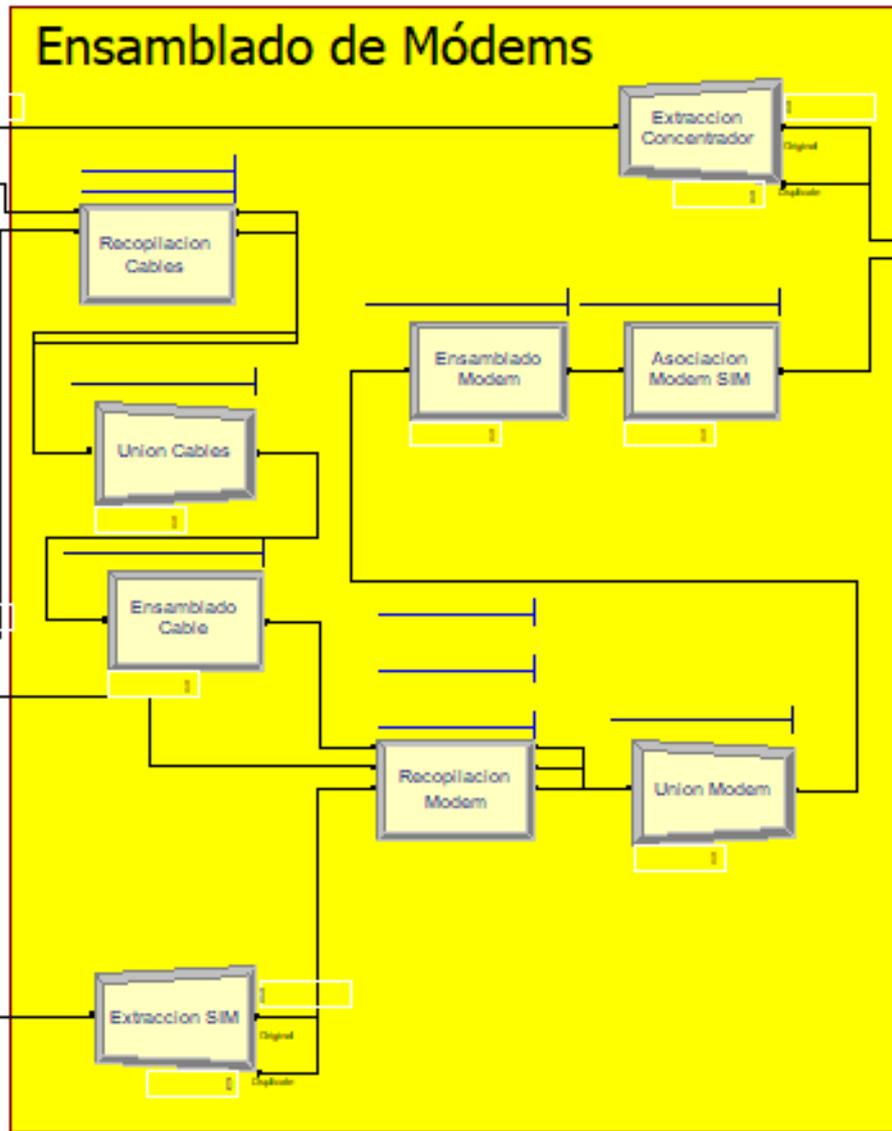


Figura 5-20: Modelado en Arena de los procesos de ensamble de cable y ensamble de módems

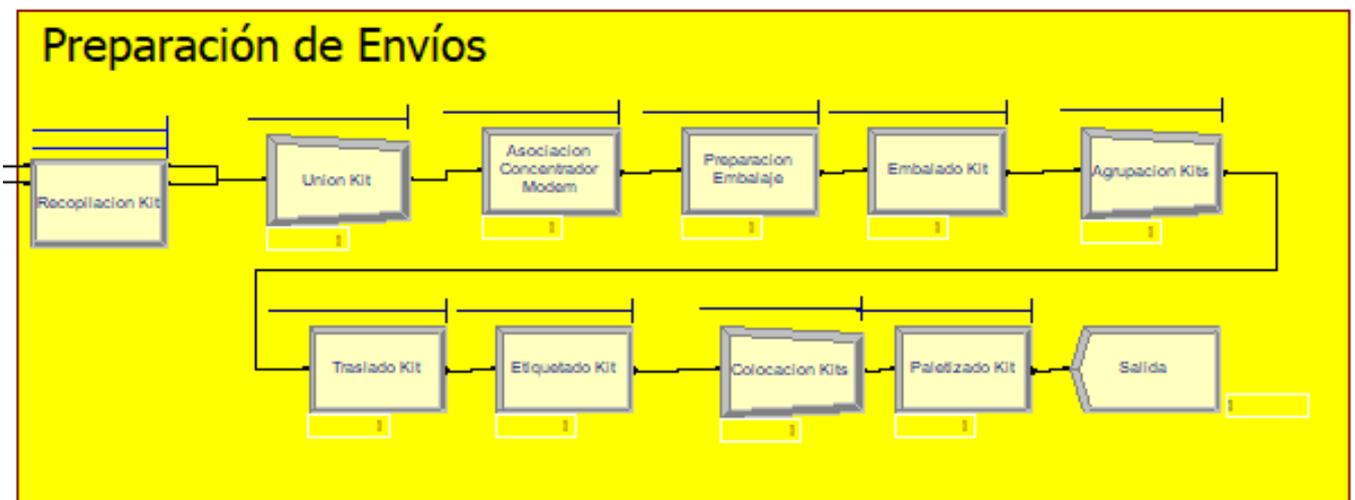


Figura 5-21: Modelado en Arena de los procesos preparación de envíos

5.2. El Equilibrado en las líneas de fabricación

Como se ha indicado anteriormente, el problema de equilibrado de líneas con un solo modelo se puede abordar principalmente desde dos perspectivas. Esto es, si se quiere minimizar el número de estaciones dado un tiempo de ciclo o por el contrario lo que se quiere minimizar es el tiempo de ciclo dado un número de estaciones.

Dado que en el problema que nos ocupa el tiempo de ciclo no está definido, lo que se pretende realizar es un estudio para buscar minimizar dicho tiempo de ciclo, de forma que se maximice la producción. Es decir, se resolverá el problema tipo SALBP-2.

Por otro lado, resulta evidente pensar que cuantos más recursos o estaciones se implementen en el sistema, mayor será la producción y por consiguiente menor será el tiempo de ciclo, pero en este problema el hecho de aumentar el número de estaciones supone a su vez un aumento en los costes de recursos.

Es por este motivo, por el que se va a proceder a analizar el problema no para un determinado número de estaciones, sino que se buscará el tiempo de ciclo mínimo para un determinado número de estaciones, pero a su vez se analizará para diferentes escenarios, cada uno de ellos con un número distinto de estaciones.

Por último, indicar que para definir el rango del número de estaciones a analizar en este estudio, se utilizarán los resultados obtenidos en la simulación, ya que nos permitirán ver en qué escenarios es posible aplicar esta técnica y en cuales esto puede resultar innecesario.

5.2.1. Modelado del problema SALBP 2

Dado C como el tiempo de ciclo, el problema SALBP-2 consiste en minimizar dicho C . Para poder definir el problema se necesita conocer el número de operaciones, que en este caso, como se ha definido en el modelo consiste en 23 operaciones, el número de estaciones máximas, que aunque es fija en el problema se procederá a realizar un estudio con distinto número de ellas, y las reglas de precedencia.

Para poder definir las reglas de precedencia es conveniente dibujar un diagrama de flujo donde se representen las operaciones con flechas que indiquen qué operaciones van antes que cuales operaciones.

Volviendo a la definición del modelo, estas son las 23 operaciones que se tienen definidas:

Código	Tarea
1	Recepción Concentrador
2	Almacenamiento Concentrador
3	Alta Concentrador
4	Recepción Módem
5	Almacenamiento Módem
6	Alta Módem
7	Recepción SIM
8	Almacenamiento Tarjeta SIM
9	Alta Tarjeta SIM
10	Pegar Etiqueta en Concentrador
11	Traslado Concentrador
12	Extracción Cable del Concentrador
13	Traslado Módem
14	Extracción Cable del Módem
15	Preparar Embalaje
16	Ensamblar cable
17	Ensamblar módem
18	Asociar Módem-SIM
19	Asociar Concentrador-Módem
20	Embalar el kit
21	Trasladar Kit
22	Etiquetar Kit

Tabla 5-12: Tareas del modelo

Y sus reglas de precedencia son las que se muestran en el siguiente gráfico:

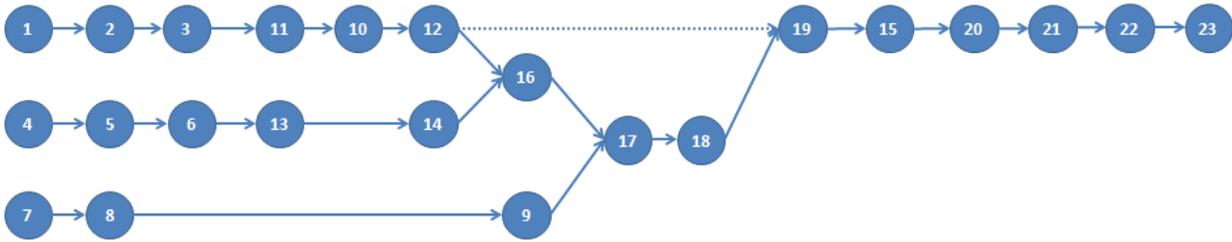


Figura 5-22: Diagrama de precedencias del modelo

Pues bien, una vez definido esto y atendiendo al siguiente modelo teórico del problema SALBP-2:

$Min C$

s.a

$$\sum_{i=1}^N t_i \cdot x_{ij} \leq C \quad j = 1, \dots, M \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^M j \cdot x_{kj} \leq \sum_{j=1}^M j \cdot x_{ij} \quad \forall k < i \quad (3)$$

- (4) Duración en cada estación, menor que C
- (5) Cada operación, a una estación
- (6) Cumpliendo las relaciones de precedencia

Donde C es el tiempo de ciclo, i es el número de operaciones, j el número de estaciones y t_i es el tiempo de procesamiento de la operación i .

Con el fin de mostrar algo de claridad en este problema a continuación se muestra un ejemplo con el conjunto de ecuaciones para el sistema de 23 operaciones con 4 estaciones:

$Min C$

s.a

Cada operación a una estación

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} = 1$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} = 1$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} = 1$$

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} = 1$$

...

$$x_{231} + x_{232} + x_{233} + x_{234} = 1$$

Duración de cada estación menor que C

$$t_1 \cdot x_{11} + t_2 \cdot x_{21} + t_3 \cdot x_{31} + \dots + t_{23} \cdot x_{231} \leq C$$

$$t_1 \cdot x_{12} + t_2 \cdot x_{22} + t_3 \cdot x_{32} + \dots + t_{23} \cdot x_{232} \leq C$$

$$t_1 \cdot x_{13} + t_2 \cdot x_{23} + t_3 \cdot x_{33} + \dots + t_{23} \cdot x_{233} \leq C$$

$$t_1 \cdot x_{14} + t_2 \cdot x_{24} + t_3 \cdot x_{34} + \dots + t_{23} \cdot x_{234} \leq C$$

Reglas de precedencia

$$1 \cdot x_{11} + 2 \cdot x_{12} + 3 \cdot x_{13} + 4 \cdot x_{14} \leq 1 \cdot x_{21} + 2 \cdot x_{22} + 3 \cdot x_{23} + 4 \cdot x_{24} \quad 1 \text{ precede a } 2$$

$$1 \cdot x_{21} + 2 \cdot x_{22} + 3 \cdot x_{23} + 4 \cdot x_{24} \leq 1 \cdot x_{31} + 2 \cdot x_{32} + 3 \cdot x_{33} + 4 \cdot x_{34} \quad 2 \text{ precede a } 3$$

...

$$1 \cdot x_{221} + 2 \cdot x_{222} + 3 \cdot x_{223} + 4 \cdot x_{224} \leq 1 \cdot x_{231} + 2 \cdot x_{232} + 3 \cdot x_{233} + 4 \cdot x_{234} \quad 22 \text{ precede a } 23$$

Con estas premisas es con las que se modelarán todos los problemas que se resolverán en la fase de experimentación.

5.2.2. Modelado en Solver de Microsoft Excel

Una vez que se tienen los modelos, solo falta implementarlo en Ms Excel y resolverlo a través del complemento Solver. Esto se hace de una forma muy sencilla pero antes de pueden tener algunas consideraciones de cara a simplificar el problema a la hora de introducir restricciones.

Por ejemplo, lo normal sería formular el tiempo de ciclo, de forma que el propio Solver busque el óptimo de dicha función. Pero también se puede modelar incluyendo en la celda donde se definen las variables (“Cambiando las celdas”) la celda de la propia función objetivo. De esta forma evitamos que un error en la función objetivo no nos permita resolver el problema.

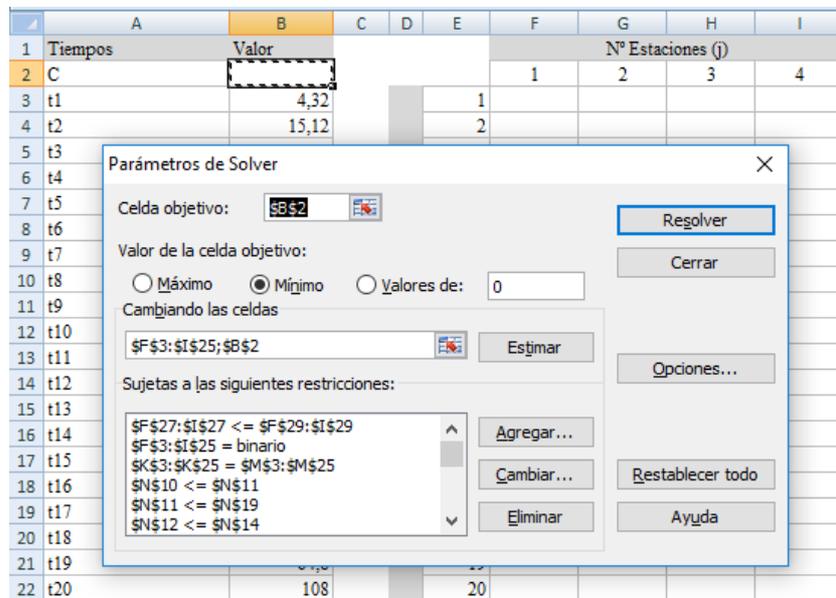


Figura 5-23: Introducción del tiempo de ciclo entre las variables del sistema

Otra modificación es cambiar las desigualdades: $t_1 \cdot x_{1j} + t_2 \cdot x_{2j} + t_3 \cdot x_{3j} + \dots + t_i \cdot x_{ij} \leq C$ por la siguiente: $t_1 \cdot x_{1j} + t_2 \cdot x_{2j} + t_3 \cdot x_{3j} + \dots + t_i \cdot x_{ij} - C \leq 0$.

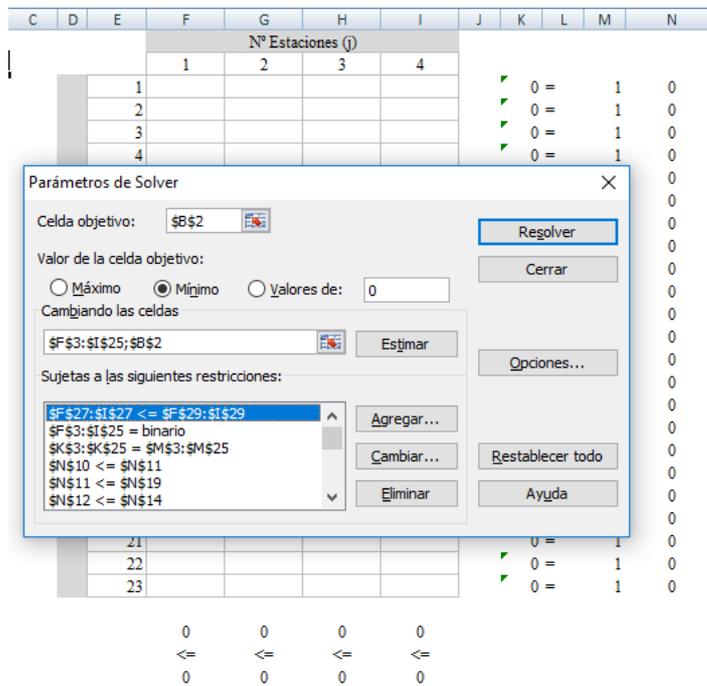


Figura 5-24: Introducción del tiempo de ciclo entre las variables del sistema

De esta forma el problema es más sencillo de formular. Además de estas dos consideraciones habrá que definir claramente las reglas de precedencia de forma que el programa pueda minimizar C .

5.3. Definición del precio

Como última parte del análisis, se procederá a realizar un análisis de costes, que vendrán definidos por los costes de almacén, por un lado y por los costes de los recursos por otra. De este modo cada escenario aportará unos valores de superficie mínima necesaria y de recursos mínimos, con el que se podrá calcular el coste en el que incurre dicho escenario.

Además, cada escenario aportará un valor de número de kits de instalación que es capaz de procesar por unidad de tiempo, por lo que se tendrá igualmente un volumen de kits a facturar.

Con estas dos consideraciones es como se procederá a calcular el precio objetivo de cada escenario. Esto se explicará en el último apartado de este capítulo, y se explicará que el criterio seleccionado será el de mantener un margen sobre facturación contante entre los diferentes escenarios.

5.3.1. Cálculo de costes e ingresos

En este proyecto el cálculo de costes se ha simplificado principalmente a tres conceptos en los que incurrirá el centro logístico: el almacén, los recursos y los costes de envío. Se entiende que puede haber más variables que intervengan, pero se estima que estos dos son los que más repercute en los costes globales del sistema.

Con respecto a los costes del almacén se tendrá en cuenta un valor fijo de costes de suministros (luz, agua, etc.) y un coste que, si bien es fijo a lo largo del tiempo, en cada escenario será diferente. Esto es, el coste del alquiler. Esto se debe a que en cada escenario se producirán diferentes colas y con ellos serán necesarias diferentes superficies para almacenar los materiales. por lo tanto, el coste de almacén se definirá como un coste de suministro, fijo en todos los escenarios, más un coste de alquiler, variable con cada escenario.

El coste de los recursos, está ligado al número de operarios, en forma de coste de salarios, que se decida utilizar en cada escenario. Por lo tanto, el coste de los recursos será el coste del salario de un operario multiplicado por el número de operarios de los que se dispone.

Por último, el coste de los envíos se debe a que al realizar un envío, este conlleva ciertos costes, como puede ser el coste de transporte hasta destino, pero también el coste de un palet, o el coste de los flejes o precintos utilizados. Una vez definido el coste unitario de envío, el coste de envío se definirá como el coste unitario por

el número de envíos de cada escenario.

5.3.2. Margen sobre ingresos: determinación del precio

El objetivo final del proyecto es determinar los diferentes precios a los que se puede facturar los kits de instalación para conocer cuál es el mejor escenario para producir. Como en este caso lo que se pretende es poder ofertar la mayor producción al menor precio posible, no se va a realizar un estudio ni de maximizar el beneficio, ni de minimizar los costes. Este estudio se realizará fijando un margen con respecto a la facturación y con ese dato fijar el precio de venta.

La fórmula que permitirá definir el precio es la siguiente:

$$Precio = \frac{Costes\ totales}{(N^{\circ}\ Kits \cdot (1 - Margen))}$$

Donde *Costes totales* será la suma de todos los costes fijos y variables del almacén, *N° Kits* será la cantidad de kits producidos y *Margen* será el margen buscado.

Una vez se tenga el precio objetivo de cada escenario se podrá analizar cuál es el escenario óptimo.

6 EXPERIMENTACIÓN

LA última fase del proyecto consiste en realizar la experimentación propiamente dicha. Es decir, realizar las simulaciones al modelo descrito, resolver el modelo de equilibrado de líneas para los diferentes escenarios previstos y, con los resultados obtenidos, buscar qué escenario es el más competitivo desde el punto de vista de la producción y los costes asociados, de modo que pueda ofrecer el precio más bajo.

El modo de proceder será realizar diferentes simulaciones con el mismo modelo, pero variando el número de recursos u operarios asignados al modelo. Además, para cada escenario se realizarán dos ensayos. Uno suponiendo que todos los recursos pueden realizar cualquier tarea en cualquier momento, desplazándose sin pérdida de tiempo entre los diferentes elementos de la línea de producción. Y otro donde cada operación tendrá asociada sólo un recurso. Para realizar esta asociación de recursos y operaciones, se tendrá en cuenta el tiempo de procesado de cada operación. Buscando igualar los tiempos de desempeño total de cada operario.

Estas simulaciones además de aportar un resultado cuantitativo, permitirán deducir qué escenarios pueden ser candidatos al óptimo y cuáles pueden ser descartados por no ser relevantes. Con esta selección será con los que se realice la optimización con el modelo SALBP-2, buscando minimizar el tiempo de ciclo y encontrar el punto óptimo.

Una vez se tengan todos los resultados de tiempo y producción se podrá realizar el estudio de costes y búsqueda del precio óptimo. Para ello se analizarán las colas generadas en cada escenario, deduciendo una superficie mínima necesaria y con ello un coste de almacén, así como el número de salidas, y el número de operarios asignados a cada escenario.

6.1. Diferentes escenarios de simulación

Como se ha indicado en la introducción de este capítulo, la idea que se ha llevado a cabo es la de probar diferentes escenarios. Para realizarlo se va a realizar una simulación variando el número de operarios y asignando o no procesos a operarios específicos.

En estas simulaciones se ha probado desde un operario hasta seis y entre dos situaciones. Una primera donde no se asignaba ningún operario a ningún proceso, sino que cualquier operario podría realizar cualquier tarea siempre que estuviese libre, y una segunda donde a cada operación o proceso se le ha asignado sólo un proceso. De este modo se tienen 12 escenarios.

Es importante indicar que todas las simulaciones se van a realizar para un volumen determinado de entregas. Con esto lo que se pretende es comparar entre los diferentes escenarios, buscando el tiempo más bajo entre ellos. En total se simulará para gestionar 7.200 equipos.

Por último, desde el punto de vista de los recursos, en estos escenarios cuando un proceso tenga una cola y se asigne un operario a dicho proceso este no lo abandonará hasta que acabe con la cola de espera. Además, como se explicó en el capítulo anterior, se han asignado jornadas de 8 horas a través del módulo de datos Schedule. Y como regla hay que tener en cuenta que si una jornada finaliza y un operario está en mitad de un proceso, este lo recuperará en el momento que lo ha dejado.

6.1.1. Operarios sin asignar a ningún proceso

Los primeros 6 ensayos se han realizado con la premisa de “libertad total” para los recursos. Esto es, en el momento que quedan libres pueden pasar a realizar la primera tarea que esté en espera. O lo que sería lo mismo sería como un solo recurso que tuviese la capacidad de n operarios siendo n el número de operarios.

Estos escenarios se pueden considerar escenarios poco realistas, pero se pueden utilizar como medida de comparación entre las demás posibilidades, o dicho de otra forma, se puede considerar el objetivo a batir, por el resto de escenarios.

6.1.2. Operarios asignados a procesos concretos

Para los siguientes 6 ensayos, la premisa ha sido la de igualar lo máximo posible los tiempos de cada operario. Esto se ha realizado teniendo en cuenta los tiempos unitarios de cada operación.

A continuación, se describe como se ha realizado la asignación de tareas a cada operario.

6.1.2.1 Asignación de operarios

Como se ha indicado, el objetivo es conseguir que todos los operarios tengan el mismo tiempo de procesado total. Este tiempo de procesado se calcula sumando los tiempos unitarios de cada tarea asignada.

Para asignar lo primero que se ha hecho es calcular el tiempo objetivo en cada escenario. Para ello se recurre nuevamente a la tabla de tiempos unitarios:

Código	Tarea	T. (min.)
1	Recepción Concentrador	0,06
2	Almacenamiento Concentrador	0,21
3	Alta Concentrador	0,30
4	Recepción Modem	0,02
5	Almacenamiento Módem	0,08
6	Alta Módem	0,23
7	Recepción SIM	0,01
8	Almacenamiento Tarjeta SIM	0,02
9	Alta Tarjeta SIM	0,13
10	Pegar Etiqueta en Concentrador	0,40
11	Traslado Concentrador	0,19
12	Extracción Cable del Concentrador	0,20
13	Traslado Módem	0,11
14	Extracción Cable del Módem	0,10
15	Preparar Embalaje	0,49
16	Ensamblar cable	2,00
17	Ensamblar módem	4,00
18	Asociar Módem-SIM	0,30
19	Asociar Concentrador-Módem	0,90
20	Embalar el kit	1,50
21	Trasladar Kit	0,50
22	Etiquetar Kit	0,43
23	Paletizar kit	0,30

Tabla 6-1: Tiempos unitarios

Con estos tiempos, se tiene un tiempo total de 12,48 minutos por equipo. De este modo se calcula el tiempo de medio por operario de cada escenario:

Nº de operarios	T. (min.)
1 operario	12,48
2 operarios	6,24
3 operarios	4,16
4 operarios	3,12

5 operarios	2,50
6 operarios	2,08

Tabla 6-2: Tiempos medios por operario

Pero analizando los tiempos unitarios, se comprueba que a partir del escenario de 4 operarios existe una tarea que supera el tiempo medio. Este es el proceso del ensamblado del módem, el cual necesita 4 minutos.

En estos casos lo que se ha realizado es asignar el proceso de ensamblado de módem a un operario y para el resto de operarios se ha intentado mantener las cargas igualadas.

A continuación, se muestra la distribución de tareas realizado a cada operario en los 6 escenarios (se omite la distribución de un solo operario):

Operario	Tiempo (min.)
Operario 1	6,25
Almacenamiento Concentrador	0,21
Almacenamiento Módem	0,08
Almacenamiento Tarjeta SIM	0,02
Alta Concentrador	0,30
Alta Módem	0,23
Alta Tarjeta SIM	0,13
Asociar Concentrador-Módem	0,90
Asociar Módem-SIM	0,30
Embalar el kit	1,50
Etiquetar Kit	0,43
Extracción Cable del Concentrador	0,20
Paletizar kit	0,30
Pegar Etiqueta en Concentrador	0,40
Preparar Embalaje	0,49
Recepción Concentrador	0,06
Recepción SIM	0,01
Trasladar Kit	0,50
Traslado Concentrador	0,19
Operario 2	6,23
Ensamblar cable	2,00
Ensamblar módem	4,00
Extracción Cable del Módem	0,10
Recepción Modem	0,02
Traslado Módem	0,11
Total	12,48

Tabla 6-3: Distribución de operaciones para dos operarios

Operario	Tiempo (min.)
Operario 1	4,18
Almacenamiento Módem	0,08
Almacenamiento Tarjeta SIM	0,02
Alta Módem	0,23
Alta Tarjeta SIM	0,13

Asociar Módem-SIM	0,30
Embalar el kit	1,50
Etiquetar Kit	0,43
Paletizar kit	0,30
Preparar Embalaje	0,49
Recepción SIM	0,01
Trasladar Kit	0,50
Traslado Concentrador	0,19
Operario 2	4,13
Ensamblar módem	4,00
Recepción Modem	0,02
Traslado Módem	0,11
Operario 3	4,17
Almacenamiento Concentrador	0,21
Alta Concentrador	0,30
Asociar Concentrador-Módem	0,90
Ensamblar cable	2,00
Extracción Cable del Concentrador	0,20
Extracción Cable del Módem	0,10
Pegar Etiqueta en Concentrador	0,40
Recepción Concentrador	0,06
Total	12,48

Tabla 6-4: Distribución de operaciones para tres operarios

Operario	Tiempo (min.)
Operario 1	2,81
Almacenamiento Concentrador	0,21
Almacenamiento Tarjeta SIM	0,02
Alta Concentrador	0,30
Etiquetar Kit	0,43
Extracción Cable del Concentrador	0,20
Pegar Etiqueta en Concentrador	0,40
Preparar Embalaje	0,49
Recepción Concentrador	0,06
Recepción SIM	0,01
Trasladar Kit	0,50
Traslado Concentrador	0,19
Operario 2	2,83
Asociar Módem-SIM	0,30
Ensamblar cable	2,00
Extracción Cable del Módem	0,10
Paletizar kit	0,30
Recepción Modem	0,02
Traslado Módem	0,11
Operario 3	2,84
Almacenamiento Módem	0,08
Alta Módem	0,23
Alta Tarjeta SIM	0,13

Asociar Concentrador-Módem	0,90
Embalar el kit	1,50
Operario 4	4,00
Ensamblar módem	4,00
Total	12,48

Tabla 6-5: Distribución de operaciones para cuatro operarios

Operario	Tiempo (min.)
Operario 1	2,11
Almacenamiento Concentrador	0,21
Almacenamiento Tarjeta SIM	0,02
Etiquetar Kit	0,43
Extracción Cable del Concentrador	0,20
Preparar Embalaje	0,49
Recepción Concentrador	0,06
Recepción SIM	0,01
Trasladar Kit	0,50
Traslado Concentrador	0,19
Operario 2	2,13
Ensamblar cable	2,00
Recepción Modem	0,02
Traslado Módem	0,11
Operario 3	2,04
Almacenamiento Módem	0,08
Alta Módem	0,23
Alta Tarjeta SIM	0,13
Embalar el kit	1,50
Extracción Cable del Módem	0,10
Operario 4	4,00
Ensamblar módem	4,00
Operario 5	2,20
Alta Concentrador	0,30
Asociar Concentrador-Módem	0,90
Asociar Módem-SIM	0,30
Paletizar kit	0,30
Pegar Etiqueta en Concentrador	0,40
Total	12,48

Tabla 6-6: Distribución de operaciones para cinco operarios

Operario	Tiempo (min.)
Operario 1	1,62
Almacenamiento Concentrador	0,21
Almacenamiento Tarjeta SIM	0,02
Etiquetar Kit	0,43
Extracción Cable del Concentrador	0,20
Recepción Concentrador	0,06

Recepción SIM	0,01
Trasladar Kit	0,50
Traslado Concentrador	0,19
Operario 2	2,00
Ensamblar cable	2,00
Operario 3	1,63
Alta Tarjeta SIM	0,13
Embalar el kit	1,50
Operario 4	4,00
Ensamblar módem	4,00
Operario 5	1,60
Alta Concentrador	0,30
Asociar Concentrador-Módem	0,90
Pegar Etiqueta en Concentrador	0,40
Operario 6	1,63
Almacenamiento Módem	0,08
Alta Módem	0,23
Asociar Módem-SIM	0,30
Extracción Cable del Módem	0,10
Paletizar kit	0,30
Preparar Embalaje	0,49
Recepción Modem	0,02
Traslado Módem	0,11
Total	12,48

Tabla 6-7: Distribución de operaciones para seis operarios

Y de forma resumida se obtiene la siguiente tabla:

Operario	Tiempos 1	Tiempos 2	Tiempos 3	Tiempos 4	Tiempos 5	Tiempos 6
Operario 1	12,48	6,25	4,18	2,81	2,11	1,62
Operario 2		6,23	4,13	2,83	2,13	2,00
Operario 3			4,17	2,84	2,04	1,63
Operario 4				4,00	4,00	4,00
Operario 5					2,20	1,60
Operario 6						1,63

Tabla 6-8: Distribución de tiempos por operario

6.2. Resultados obtenidos

Con la información descrita en la sección anterior es con la que se han montado los diferentes modelos para el total de 12 escenarios. En los siguientes apartados se mostrarán los resultados obtenidos en dichas simulaciones, tanto a nivel de tiempos, como a nivel de producción de cada escenario. Además, se realizará un análisis de las colas generadas, que más tarde se podrá utilizar a la hora de definir posibles costes de almacenamiento.

6.2.1. Tiempos obtenidos

Una vez realizadas las simulaciones, se obtiene un tiempo total de simulación, que sería equivalente al tiempo en el que se han conseguido procesar el total de equipos entregados, que en este caso es de 7.200 unidades. Estos son los tiempos obtenidos:

6.2.1.1 Tiempos con operarios sin asignar

Código	Nº Operarios	Asignados	RESULTADOS SIMULACIÓN		
			Tiempo (horas)	Salidas	Kits
1_O_0ASIG	1	Sin Asignar	4.480	200	7.200
2_O_0ASIG	2	Sin Asignar	2.248	200	7.200
3_O_0ASIG	3	Sin Asignar	1.504	200	7.200
4_O_0ASIG	4	Sin Asignar	1.192	200	7.200
5_O_0ASIG	5	Sin Asignar	1.168	200	7.200
6_O_0ASIG	6	Sin Asignar	1.144	200	7.200

Tabla 6-9: Tiempos obtenidos para los escenarios de operarios sin asignar

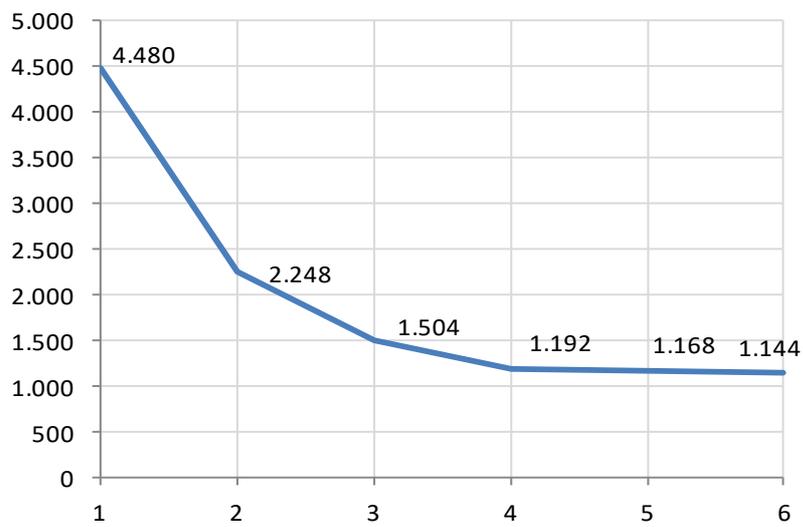


Figura 6-1: Gráfica de evolución del tiempo respecto al número de operarios

Como se aprecia en esta gráfica, los tiempos se van reduciendo a medida que se agregan más operarios al proceso. Si bien se observa que esta disminución no es lineal, sino que el diferencial se va reduciendo también.

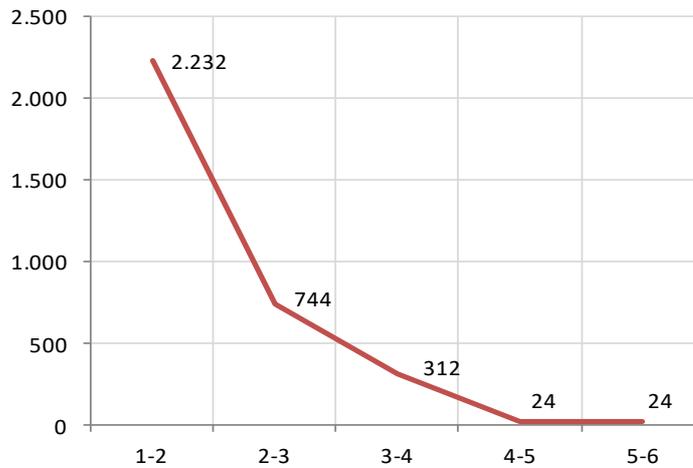


Figura 6-2: Gráfica de variación de horas al aumentar el número de operarios

Mientras que el paso de un operario a dos prácticamente reduce a la mitad, el sexto operario, con un aumento del 20% en recursos, solo aporta una disminución de 24 horas, o un 2% sobre las 1.168 horas de cinco

operarios. Además se aprecia que la disminución de 24 horas es la misma que la que aportaba el quinto operario con respecto al escenario de 4 operarios.

6.2.1.2 Tiempos con operarios asignados

Código	Nº Operarios	Asignados	RESULTADOS SIMULACIÓN		
			Tiempo (horas)	Salidas	Kits
1_O_ASIG	1	Asignados	4.480	200	7.200
2_O_ASIG	2	Asignados	2.344	200	7.200
3_O_ASIG	3	Asignados	1.672	200	7.200
4_O_ASIG	4	Asignados	1.480	200	7.200
5_O_ASIG	5	Asignados	1.456	200	7.200
6_O_ASIG	6	Asignados	1.456	200	7.200

Tabla 6-10: Tiempos obtenidos para los escenarios de operarios con tareas asignadas

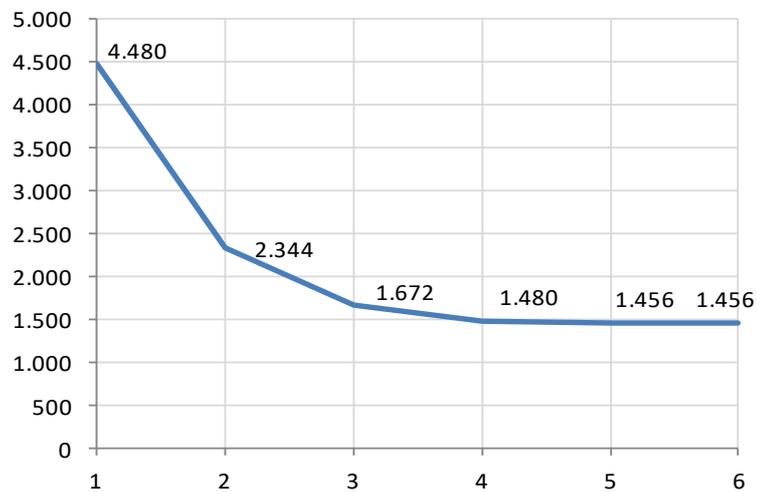


Figura 6-3: Gráfica de evolución del tiempo respecto al número de operarios

Al igual que ocurría en los casos de operarios sin asignar, los tiempos se van reduciendo a medida que se agregan más operarios al proceso. Si bien en este caso, el agregar un sexto operario no aporta disminución de tiempo como se aprecia en la siguiente gráfica.

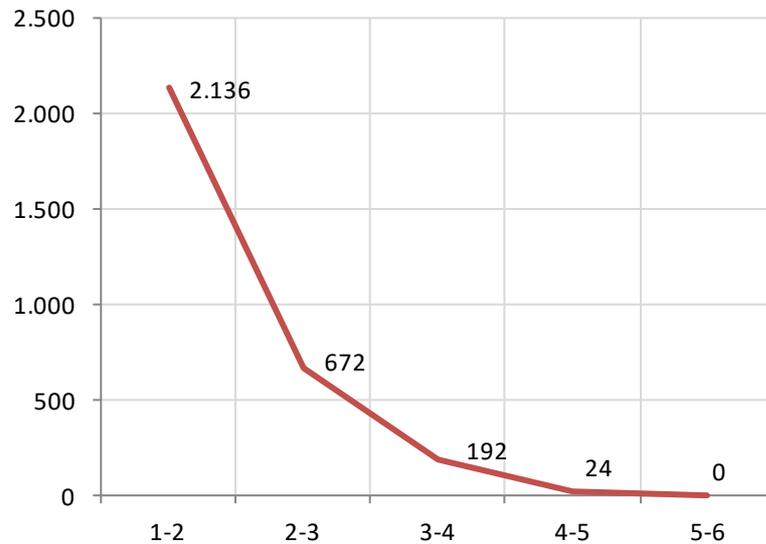


Figura 6-4: Gráfica de variación de horas al aumentar el número de operarios

Y comparando las dos situaciones descritas, se obtiene la siguiente gráfica:

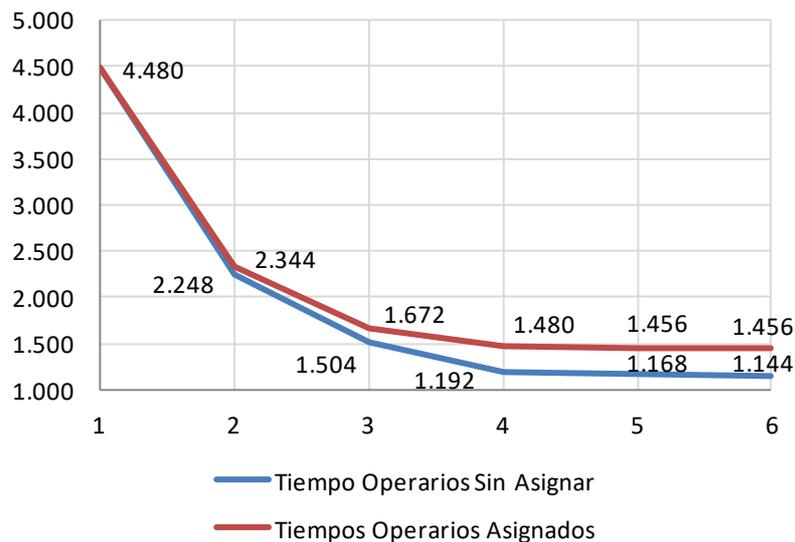


Figura 6-5: Gráfica de comparación de tiempos entre operarios sin asignar y asignados

6.2.2. Producción de kits

Para poder realizar un estudio de costes, es preferible referenciar la producción a una unidad de tiempo como la semana o el mes. Con este fin es con lo que se realiza el siguiente análisis, trasladando la producción total a unidades de tiempo de semanas o meses.

6.2.2.1 Producción con operarios sin asignar

Por último, se han trasladado las cantidades obtenidas a una unidad de tiempo que nos permita conocer sus cotes a posteriori. Esto es, pasarlo a cantidades mensuales o semanales.

Código	Nº Operarios	Asignados	CANTIDADES MENSUALES		CANTIDADES SEMANALES	
			Salidas	Kits	Salidas	Kits
1_O_0ASIG	1	Sin Asignar	21	756	5,25	189

2_O_0ASIG	2	Sin Asignar	43	1.548	10,75	387
3_O_0ASIG	3	Sin Asignar	64	2.304	16,00	576
4_O_0ASIG	4	Sin Asignar	81	2.916	20,25	729
5_O_0ASIG	5	Sin Asignar	82	2.952	20,50	738
6_O_0ASIG	6	Sin Asignar	84	3.024	21,00	756

Tabla 6-11: Producción mensual y semanal obtenida para operarios sin asignar

De este modo se puede comprobar que la producción semanal de los escenarios de 4, 5 y 6 operarios superan la tasa de producción de los proveedores de 720 unidades semanales. Si bien los escenarios de 4 y 5 operarios no se alejan demasiado, el de 6 operarios está claramente alejado de este punto.

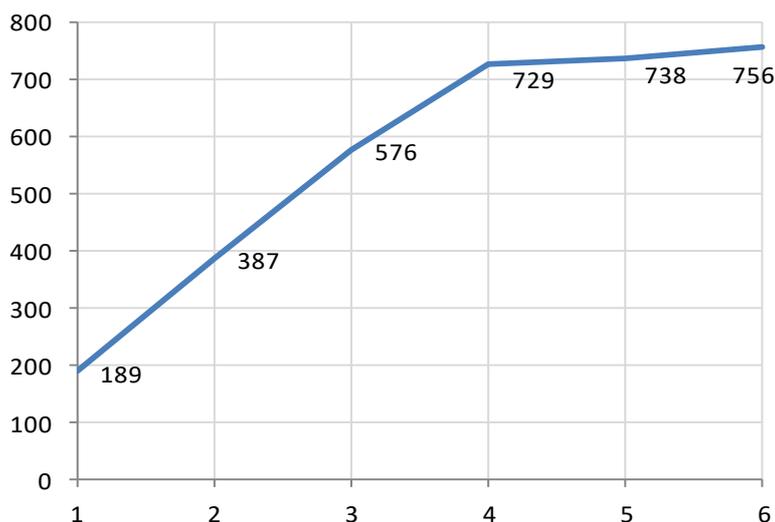


Figura 6-6: Gráfica de producción semanal por número de operarios para operarios sin asignar

6.2.2.2 Producción con operarios asignados

Al trasladar los datos de producción anteriormente vistos a periodos mensuales y semanales, se obtiene lo siguiente:

Código	Nº Operarios	Asignados	CANTIDADES MENSUALES		CANTIDADES SEMANALES	
			Salidas	Kits	Salidas	Kits
1_O_ASIG	1	Asignados	21	756	5,25	189
2_O_ASIG	2	Asignados	41	1.476	10,25	369
3_O_ASIG	3	Asignados	57	2.052	14,25	513
4_O_ASIG	4	Asignados	65	2.340	16,25	585
5_O_ASIG	5	Asignados	66	2.376	16,50	594
6_O_ASIG	6	Asignados	66	2.376	16,50	594

Tabla 6-12: Producción mensual y semanal obtenida para operarios asignados

En comparación con la primera simulación, se comprueba que en general, esta asignación de tareas no ha conseguido mejorar los resultados, con lo que se tienen tiempos peores y por consiguiente, producciones inferiores. En este caso se puede apreciar como ningún escenario consigue superar el límite de entrega de los proveedores de 720 equipos semanales.

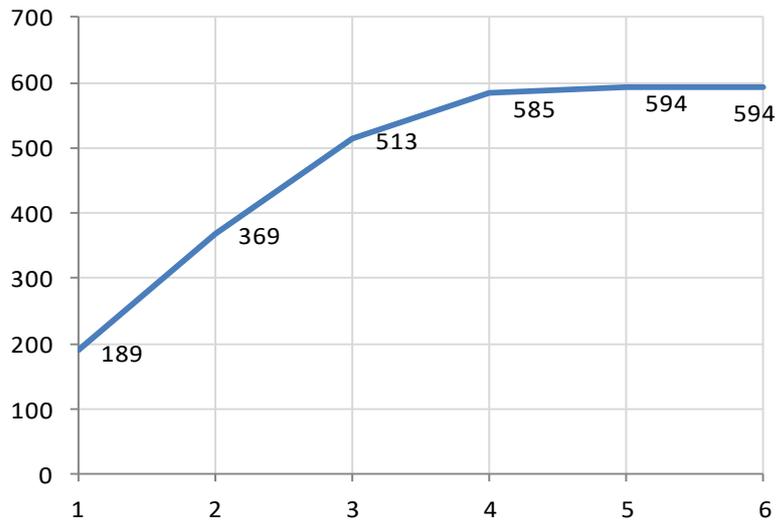


Figura 6-7: Gráfica de producción semanal por número de operarios para operarios asignados

6.2.3. Colas resultantes

Una vez que se tienen tanto los tiempos como las producciones, falta analizar cómo se comportan las colas para conocer las necesidades de espacio y por consiguiente los posibles costes de almacenamiento.

Para estos cálculos se han tenido en cuenta las dimensiones dadas en apartados anteriores de los distintos equipos, y a su vez se ha tenido en cuenta la posibilidad de apilamiento de los mismos. De esta forma se obtienen las siguientes superficies:

Elemento	m2
Cable	0,00
Caja Concentrador	0,24
Caja Módem	0,25
Caja SIM	0,20
Concentrador	0,08
kit	0,08
Módem	0,02
Palet	0,96
SIM	0,00

Tabla 6-13: Superficie ocupada por cada elemento del modelo

Se han considerado despreciables tanto el cable como las tarjetas SIM por el poco espacio que ocupan en comparación con el resto.

Por otro lado, el modelo calcula tanto el número máximo de elementos en una cola como el máximo. Para el problema que nos ocupa, el dato a tener en cuenta será el valor máximo de la cola, ya que si se alcanza ese valor el almacén deberá tener espacio para contenerlo.

Dado que en cada proceso se puede tener un equipo individual o agrupado, ya sea en cajas o palets, se ha relacionado cada cola del modelo con un tipo de embalaje y por consiguiente con una superficie:

Identifíer	Unidad
Alta SIM.Queue.NumberInQueue	Caja SIM
Logo Corporativo.Queue.NumberInQueue	Caja Concentrador
Union Modem.Queue.NumberInQueue	Módem

Union Cables.Queue.NumberInQueue	Cable
Recepcion Modem.Queue.NumberInQueue	Palet
Extraccion Cable Concentrador.Queue.Number	Caja Concentrador
Traslado Modem.Queue.NumberInQueue	Caja Módem
Recepcion Concentrador.Queue.NumberInQueue	Palet
Asociacion Concentrador Modem.Queue.Number	kit
Recepcion SIM.Queue.NumberInQueue	Caja SIM
Ensamblado Modem.Queue.NumberInQueue	Módem
Recopilacion Kit.Queue1.NumberInQueue	Concentrador
Recopilacion Kit.Queue2.NumberInQueue	Módem
Extraccion Cable Modem.Queue.NumberInQueue	Módem
Embalado Kit.Queue.NumberInQueue	kit
Union Kit.Queue.NumberInQueue	Cable
Almacenamiento Concentrador.Queue.NumberIn	Palet
Ensamblado Cable.Queue.NumberInQueue	Cable
Almacenamiento Modem.Queue.NumberInQueue	Palet
Preparacion Embalaje.Queue.NumberInQueue	kit
Etiquetado Kit.Queue.NumberInQueue	Palet
Alta Modem.Queue.NumberInQueue	Palet
Asociacion Modem SIM.Queue.NumberInQueue	Módem
Almacenamiento SIM.Queue.NumberInQueue	Caja SIM
Recopilacion Modem.Queue1.NumberInQueue	Cable
Recopilacion Modem.Queue2.NumberInQueue	Módem
Recopilacion Modem.Queue3.NumberInQueue	SIM
Paletizado Kit.Queue.NumberInQueue	Envío
Colocacion Kits.Queue.NumberInQueue	Palet
Traslado Concentrador.Queue.NumberInQueue	Caja Concentrador
Traslado Kit.Queue.NumberInQueue	Palet
Recopilacion Cables.Queue1.NumberInQueue	Cable
Recopilacion Cables.Queue2.NumberInQueue	Cable
Agrupacion Kits.Queue.NumberInQueue	kit
Alta Concentrador.Queue.NumberInQueue	Palet

Tabla 6-14: Relación de colas y el elemento asociado

Por lo que ahora se podrá asociar cada valor de la cola con una superficie mínima necesaria. La suma de todas las superficies será la superficie total que necesitará el almacén para gestionar todas y cada una de las colas del modelo.

Estas son los máximos de cada cola en cada escenario simulado:

Identifier	1_O_SAS	2_O_SAS	3_O_SAS	4_O_SAS
Alta SIM.Queue.NumberInQueue	6	3	3	3
Logo Corporativo.Queue.NumberInQueue	360	238	120	117
Union Modem.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Union Cables.Queue.NumberInQueue	2	2	2	2
Recepcion Modem.Queue.NumberInQueue	6	6	6	6
Extraccion Cable Concentrador.Queue.Number	360	238	120	116
Traslado Modem.Queue.NumberInQueue	36	18	18	18

Recepcion Concentrador.Queue.NumberInQueue	10	10	10	10
Asociacion Concentrador Modem.Queue.Number	2.160	1.438	720	716
Recepcion SIM.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Ensamblado Modem.Queue.NumberInQueue	2.160	1.438	720	716
Recopilacion Kit.Queue1.NumberInQueue	3.600	2.160	1.368	720
Recopilacion Kit.Queue2.NumberInQueue	1	1	1	1
Extraccion Cable Modem.Queue.NumberInQueue	1.800	900	900	900
Embalado Kit.Queue.NumberInQueue	2.160	1.438	720	716
Union Kit.Queue.NumberInQueue	2	2	2	2
Almacenamiento Concentrador.Queue.NumberIn	30	20	10	10
Ensamblado Cable.Queue.NumberInQueue	2.160	1.438	720	716
Almacenamiento Modem.Queue.NumberInQueue	12	6	6	6
Preparacion Embalaje.Queue.NumberInQueue	2.160	1.438	720	716
Etiquetado Kit.Queue.NumberInQueue	179	118	60	56
Alta Modem.Queue.NumberInQueue	12	6	6	6
Asociacion Modem SIM.Queue.NumberInQueue	2.160	1.438	720	716
Almacenamiento SIM.Queue.NumberInQueue	6	3	3	3
Recopilacion Modem.Queue1.NumberInQueue	1	1	1	1
Recopilacion Modem.Queue2.NumberInQueue	2.880	2.058	1.032	900
Recopilacion Modem.Queue3.NumberInQueue	4.320	2.880	2.160	1.440
Paletizado Kit.Queue.NumberInQueue	59	39	20	18
Colocacion Kits.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Traslado Concentrador.Queue.NumberInQueue	360	240	120	120
Traslado Kit.Queue.NumberInQueue	180	119	60	59
Recopilacion Cables.Queue1.NumberInQueue	180	540	540	540
Recopilacion Cables.Queue2.NumberInQueue	2.160	1.440	900	762
Agrupacion Kits.Queue.NumberInQueue	12	12	12	12
Alta Concentrador.Queue.NumberInQueue	30	20	10	10

Tabla 6-15: Colas máximas por escenarios (1 de 3)

Identifíer	5_O_SAS	6_O_SAS	1_O_ASIG	2_O_ASIG
Alta SIM.Queue.NumberInQueue	3	3	6	3
Logo Corporativo.Queue.NumberInQueue	116	120	360	120
Union Modem.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Union Cables.Queue.NumberInQueue	2	2	2	2
Recepcion Modem.Queue.NumberInQueue	6	6	6	6
Extraccion Cable Concentrador.Queue.Number	115	114	360	120
Traslado Modem.Queue.NumberInQueue	15	18	36	36
Recepcion Concentrador.Queue.NumberInQueue	10	10	10	10
Asociacion Concentrador Modem.Queue.Number	715	714	2.160	427
Recepcion SIM.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Ensamblado Modem.Queue.NumberInQueue	715	714	2.160	1.799
Recopilacion Kit.Queue1.NumberInQueue	720	720	3.600	3.241
Recopilacion Kit.Queue2.NumberInQueue	1	1	1	1
Extraccion Cable Modem.Queue.NumberInQueue	799	900	1.800	1.800
Embalado Kit.Queue.NumberInQueue	715	714	2.160	427

Union Kit.Queue.NumberInQueue	2	2	2	2
Almacenamiento Concentrador.Queue.NumberIn	9	10	30	10
Ensamblado Cable.Queue.NumberInQueue	715	714	2.160	1.800
Almacenamiento Modem.Queue.NumberInQueue	6	6	12	6
Preparacion Embalaje.Queue.NumberInQueue	715	714	2.160	427
Etiquetado Kit.Queue.NumberInQueue	55	54	179	36
Alta Modem.Queue.NumberInQueue	6	6	12	6
Asociacion Modem SIM.Queue.NumberInQueue	715	714	2.160	427
Almacenamiento SIM.Queue.NumberInQueue	3	3	6	3
Recopilacion Modem.Queue1.NumberInQueue	1	1	1	1
Recopilacion Modem.Queue2.NumberInQueue	900	900	2.880	1.800
Recopilacion Modem.Queue3.NumberInQueue	1.440	1.440	4.320	3.600
Paletizado Kit.Queue.NumberInQueue	18	18	59	12
Colocacion Kits.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Traslado Concentrador.Queue.NumberInQueue	118	120	360	120
Traslado Kit.Queue.NumberInQueue	59	59	180	36
Recopilacion Cables.Queue1.NumberInQueue	540	540	180	1.800
Recopilacion Cables.Queue2.NumberInQueue	720	900	2.160	900
Agrupacion Kits.Queue.NumberInQueue	12	12	12	12
Alta Concentrador.Queue.NumberInQueue	8	10	30	10

Tabla 6-16: Colas máximas por escenarios (2 de 3)

Identifier	3_O_ASIG	4_O_ASIG	5_O_ASIG	6_O_ASIG
Alta SIM.Queue.NumberInQueue	3	3	3	2
Logo Corporativo.Queue.NumberInQueue	360	120	99	98
Union Modem.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Union Cables.Queue.NumberInQueue	2	2	2	2
Recepcion Modem.Queue.NumberInQueue	6	6	6	6
Extraccion Cable Concentrador.Queue.Number	360	120	34	40
Traslado Modem.Queue.NumberInQueue	18	18	9	18
Recepcion Concentrador.Queue.NumberInQueue	10	10	10	10
Asociacion Concentrador Modem.Queue.Number	1.495	293	67	111
Recepcion SIM.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Ensamblado Modem.Queue.NumberInQueue	1.212	4.764	1.413	1.408
Recopilacion Kit.Queue1.NumberInQueue	2.336	5.125	1.775	1.713
Recopilacion Kit.Queue2.NumberInQueue	1	1	1	1
Extraccion Cable Modem.Queue.NumberInQueue	1.800	900	900	900
Embalado Kit.Queue.NumberInQueue	662	225	66	61
Union Kit.Queue.NumberInQueue	2	2	2	2
Almacenamiento Concentrador.Queue.NumberIn	30	10	10	10
Ensamblado Cable.Queue.NumberInQueue	2.160	648	617	653
Almacenamiento Modem.Queue.NumberInQueue	6	6	5	6
Preparacion Embalaje.Queue.NumberInQueue	662	317	29	54
Etiquetado Kit.Queue.NumberInQueue	55	19	3	7
Alta Modem.Queue.NumberInQueue	6	6	6	6
Asociacion Modem SIM.Queue.NumberInQueue	359	327	68	54
Almacenamiento SIM.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Recopilacion Modem.Queue1.NumberInQueue	1	1	1	1

Recopilacion Modem.Queue2.NumberInQueue	5.760	900	867	856
Recopilacion Modem.Queue3.NumberInQueue	7.285	1.641	1.440	1.440
Paletizado Kit.Queue.NumberInQueue	19	16	2	2
Colocacion Kits.Queue.NumberInQueue	3	3	3	3
Traslado Concentrador.Queue.NumberInQueue	120	120	86	86
Traslado Kit.Queue.NumberInQueue	55	19	3	7
Recopilacion Cables.Queue1.NumberInQueue	540	540	540	540
Recopilacion Cables.Queue2.NumberInQueue	4.320	900	720	720
Agrupacion Kits.Queue.NumberInQueue	12	12	12	12
Alta Concentrador.Queue.NumberInQueue	30	10	4	5

Tabla 6-17: Colas máximas por escenarios (3 de 3)

Y al multiplicar estas colas por las superficies descritas anteriormente se obtienen los siguientes resultados:

Código	m2	Código	m2
1_O_SAS	855	1_O_ASIG	855
2_O_SAS	564	2_O_ASIG	271
3_O_SAS	308	3_O_ASIG	409
4_O_SAS	286	4_O_ASIG	278
5_O_SAS	281	5_O_ASIG	112
6_O_SAS	284	6_O_ASIG	123

Tabla 6-18: Superficie mínima de cada escenario

6.3. Optimización utilizando SALBP-2

El hecho de haber utilizado la simulación en primer lugar ha permitido conocer el comportamiento a nivel cualitativo del sistema. Y gracias a ello se puede sacar alguna conclusión de cara a la siguiente fase de optimizar utilizando el equilibrado de líneas.

- El objetivo es mejorar los resultados de la simulación, y más concretamente los obtenidos al simular con operarios sin asignar a ningún proceso concreto.
- Los escenarios de 1 y 2 operarios quedan descartado al existir otros escenarios bastante más favorables, ya que como se ha visto, es a partir de 3 operarios cuando la curva empieza a suavizarse.
- El escenario de 6 operarios queda descartado por dos motivos. En primer lugar, la primera simulación ya indicaba que se podría superar la tasa de entrega de equipos de los proveedores. Y en segundo lugar, se aprecia que este escenario apenas aporta mayor producción al sistema.

Por lo que el problema se reduce a buscar el óptimo entre los escenarios que van desde 3 hasta 5 operarios.

6.3.1. Escenarios planteados

Con el fin de aproximar el estudio lo máximo posible a la realidad para los cálculos a realizar en este apartado se ha optado por considerar lotes de 72 equipos. Es decir, cada operario gestionará un lote de 72 equipos antes de proceder a pasarlo al siguiente operario o estación. Esto se debe también a que los tiempos unitarios conseguido se han alcanzado a través de realizar tandas largas por lo que podría no alcanzarse estos tiempos si se hace de forma unitaria.

Esto además aporta una segunda ventaja que consiste en la posibilidad de duplicar estaciones si se considera necesario. En el caso se comportará como si el tiempo de procesado se redujese a la mitad. En realidad esto no ocurre así, sino que se cada estación gestionará la mitad de equipos, por lo que el tiempo total de la estación será la mitad.

La idea de duplicar una estación surge ante la evidencia de que existe un proceso limitante que, además, se aprecia está en mitad del modelo, por lo que es muy complicado mejorar el tiempo de ciclo sin intervenir sobre este proceso. Para mayor claridad se vuelve a aportar el modelo de precedencia:

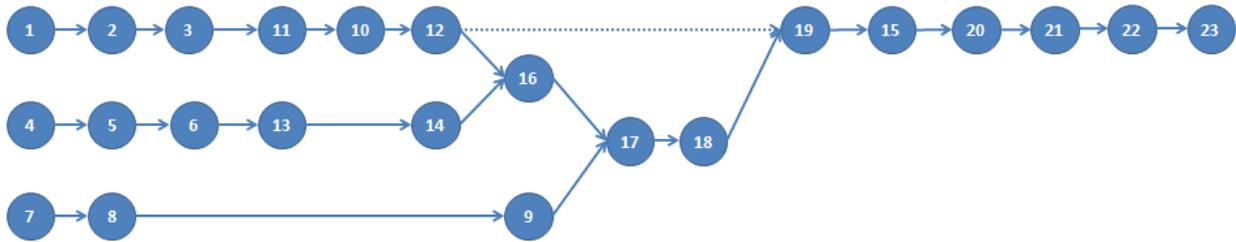


Figura 6-8: Modelo de precedencias

El proceso 17 es el que contempla el ensamblado del módem y necesita el mayor tiempo (4 minutos) para su procesado. A continuación, se detallan los distintos casos estudiados en función del número de estaciones:

Código	Equilibrado	Descripción
3_O_EQUI	3 operarios	3 estaciones con un operario cada una
4_O_EQUI	4 operarios	4 estaciones con un operario cada una
4_O_EQUI21	4 oper. (dupl1)	1 estación al inicio, 1 estación duplicada en el centro del proceso y 1 estación al final
4_O_EQUI22	4 oper. (dupl2)	1 estación duplicada al inicio y 1 estación duplicada al final
4_O_EQUI23	4 oper. (dupl3)	1 estación triplicada al principio y 1 estación individual al final
4_O_EQUI24	4 oper. (dupl4)	1 estación individual al principio y 1 estación triplicada al final
5_O_EQUI	5 operarios	5 estaciones con un operario cada una
5_O_EQUI21	5 oper. (dupl1)	2 estaciones individuales al principio, 1 estación duplicada y una estación individual al final
5_O_EQUI22	5 oper. (dupl2)	1 estación duplicada al inicio, 1 estación duplicada a continuación y una estación individual al final
5_O_EQUI23	5 oper. (dupl3)	1 estación duplicada al principio y 1 estación triplicada al final
5_O_EQUI24	5 oper. (dupl4)	1 estación triplicada al principio y 1 estación duplicada al final
5_O_EQUI25	5 oper. (dupl5)	1 estación individual al principio y 1 estación cuadruplicada al final
5_O_EQUI26	5 oper. (dupl6)	1 estación cuadruplicada al principio y 1 estación individual al final

Tabla 6-19: Superficie mínima de cada escenario

Código	Esquema
3_O_EQUI	
4_O_EQUI	

4_O_EQUI21	
4_O_EQUI22	
4_O_EQUI23	
4_O_EQUI24	
5_O_EQUI	
5_O_EQUI21	

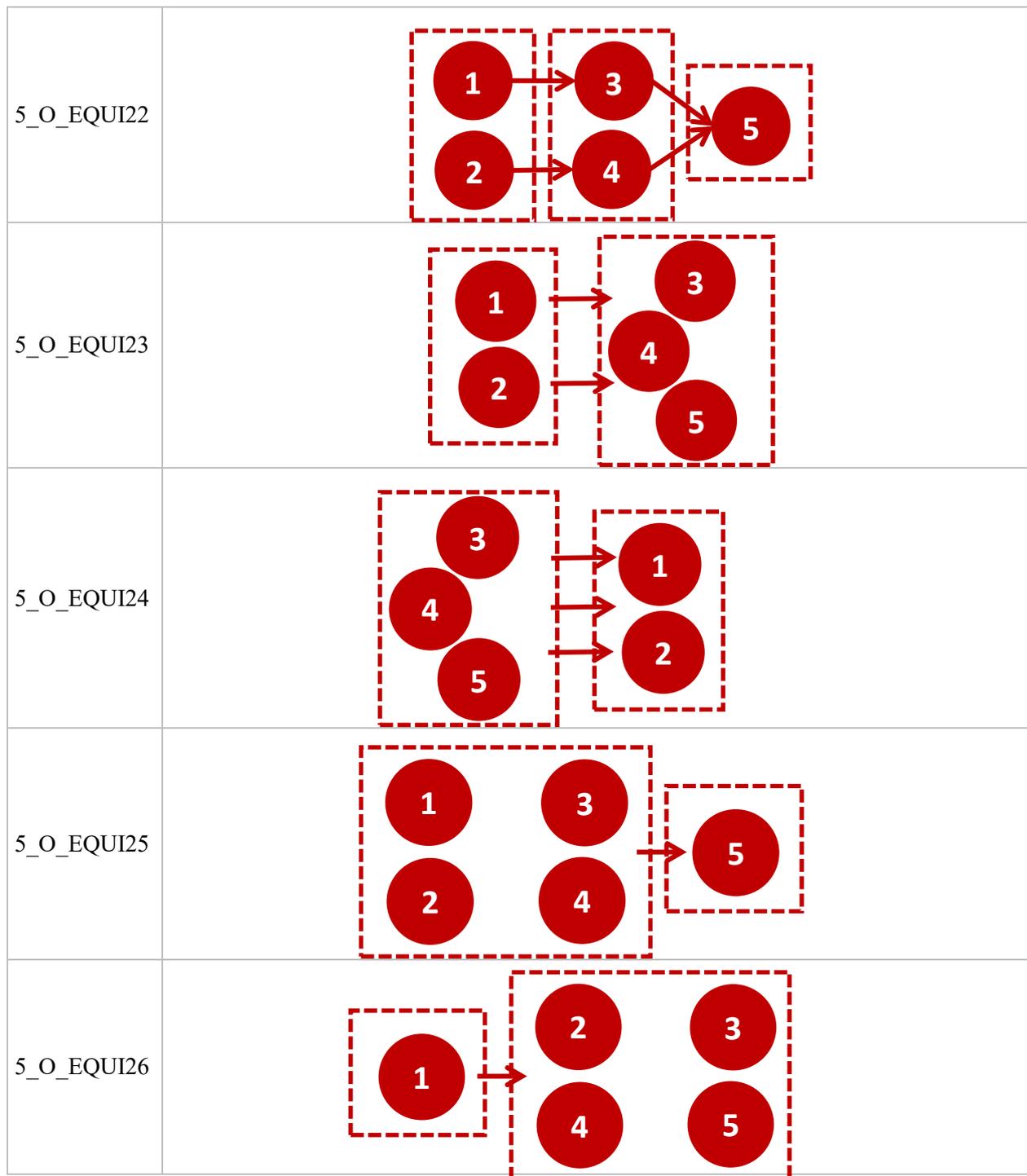


Tabla 6-20: Esquemas utilizados para el equilibrado de líneas

6.3.2. Resultado en el Solver

Una vez resuelto a través de Solver, se obtienen los siguientes tiempos por cada estación:

Equilibrado	1ª Estac. (h)	2ª Estac. (h)	3ª Estac. (h)	4ª Estac. (h)	5ª Estac. (h)
3_O_EQUI	4,87	5,16	4,94		
4_O_EQUI	4,87	4,80	2,03	3,28	
4_O_EQUI21	2,47	4,32	4,32	3,86	
4_O_EQUI22	4,84	4,84	2,65	2,65	
4_O_EQUI23	3,70	3,70	3,70	3,86	
4_O_EQUI24	3,90	2,86	2,86	2,86	
5_O_EQUI	2,47	2,40	4,80	3,83	1,48

5_O_EQUI21	2,28	2,59	3,41	3,41	3,28
5_O_EQUI22	2,03	2,03	2,85	2,85	2,73
5_O_EQUI23	2,44	2,44	3,37	3,37	3,37
5_O_EQUI24	3,22	3,22	3,22	2,65	2,65
5_O_EQUI25	4,68	2,57	2,57	2,57	2,57
5_O_EQUI26	2,93	2,93	2,93	2,93	3,28

Tabla 6-21: Tiempos (h) por estación

Por otro lado, con estos tiempos se puede deducir el tiempo de ciclo, como el máximo de cada escenario, y el tiempo total de procesado. Esto último se calcula como la suma del tiempo de todas las estaciones más el tiempo de ciclo por el número total de equipos menos uno (7.199 uds.), obteniendo lo siguiente:

Equilibrado	Cmin	Tiempo
3_O_EQUI	5,16	1.577
4_O_EQUI	4,87	1.492
4_O_EQUI21	4,32	1.328
4_O_EQUI22	4,84	1.481
4_O_EQUI23	3,86	1.193
4_O_EQUI24	3,90	1.196
5_O_EQUI	4,80	1.471
5_O_EQUI21	3,41	1.059
5_O_EQUI22	2,85	882
5_O_EQUI23	3,37	1.045
5_O_EQUI24	3,22	1.002
5_O_EQUI25	4,68	1.435
5_O_EQUI26	3,28	1.018

Tabla 6-22: Tiempo de ciclo (h) y tiempo total (h) de cada escenario

Ahora que se tiene el tiempo global de producción se pueden realizar los mismos cálculos que para los escenarios de simulación y comprobar la producción de estos nuevos escenarios:

			RESULTADOS SALBP2		
Código	Nº Operarios	Asignados	Tiempo (horas)	Salidas	Kits
3_O_EQUI	3	Equilibrado	1.577	200	7.200
4_O_EQUI	4	Equilibrado	1.492	200	7.200
4_O_EQUI21	4	Equilibrado	1.328	200	7.200
4_O_EQUI22	4	Equilibrado	1.481	200	7.200
4_O_EQUI23	4	Equilibrado	1.193	200	7.200
4_O_EQUI24	4	Equilibrado	1.196	200	7.200
5_O_EQUI	5	Equilibrado	1.471	200	7.200
5_O_EQUI21	5	Equilibrado	1.059	200	7.200
5_O_EQUI22	5	Equilibrado	882	200	7.200
5_O_EQUI23	5	Equilibrado	1.045	200	7.200
5_O_EQUI24	5	Equilibrado	1.002	200	7.200
5_O_EQUI25	5	Equilibrado	1.435	200	7.200
5_O_EQUI26	5	Equilibrado	1.018	200	7.200

Tabla 6-23: Tiempos obtenidos para los escenarios resueltos a través de SALBP2

Código	N° Operarios	Asignados	CANTIDADES MENSUALES		CANTIDADES SEMANALES	
			Salidas	Kits	Salidas	Kits
3_O_EQUI	3	Equilibrado	61	2.196	15,25	549
4_O_EQUI	4	Equilibrado	64	2.304	16,00	576
4_O_EQUI21	4	Equilibrado	72	2.592	18,00	648
4_O_EQUI22	4	Equilibrado	65	2.340	16,25	585
4_O_EQUI23	4	Equilibrado	81	2.916	20,25	729
4_O_EQUI24	4	Equilibrado	80	2.880	20,00	720
5_O_EQUI	5	Equilibrado	65	2.340	16,25	585
5_O_EQUI21	5	Equilibrado	91	3.276	22,75	819
5_O_EQUI22	5	Equilibrado	109	3.924	27,25	981
5_O_EQUI23	5	Equilibrado	92	3.312	23,00	828
5_O_EQUI24	5	Equilibrado	96	3.456	24,00	864
5_O_EQUI25	5	Equilibrado	67	2.412	16,75	603
5_O_EQUI26	5	Equilibrado	94	3.384	23,50	846

Tabla 6-24: Producción mensual y semanal obtenida a través de SALBP2

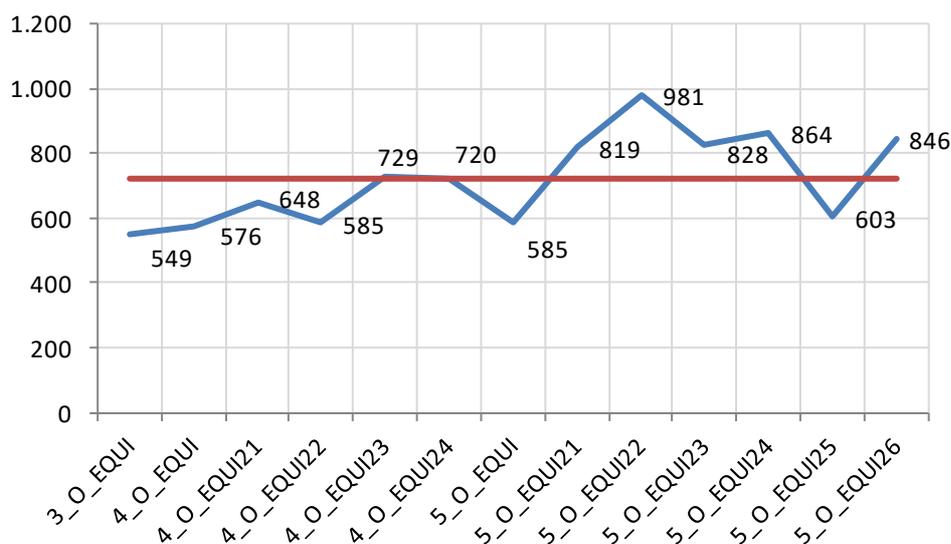


Figura 6-9: Modelo de precedencias

Como se puede comprobar, con el equilibrado se ha mejorado mucho la producción con respecto a los escenarios simulados, pero en alguno de ellos se vuelve a superar el límite de 720 unidades a la semana, por lo que no serían viables de implementar.

6.3.2.1 Cálculo de necesidades de almacenamiento

Por último y para finalizar el estudio realizado a través de SALBP2, faltaría por realizar el cálculo de las necesidades de almacenamiento. Para ello se parte de la base de que se necesitará un espacio para recibir el material, otro para darle salida, y después cada estación solo necesitará almacenar el espacio que ocupe el lote de transferencia, en este caso los 72 equipos entre concentradores, módems y tarjetas SIM.

Para calcular el espacio en la entrada, se puede hacer suponiendo que se llegue al máximo entre entradas, esto es, 10 palets de concentradores y 6 palets de módems. Con esto las necesidades en la zona de llegada de materiales es de 15,36m² (16uds.x0,96m²).

Y para la zona de salidas ocurriría lo mismo, pero calculándolo a partir del número de salidas semanales (se entiende que se hará un envío por semana).

Para las estaciones se calcula como las dimensiones de 72 concentradores y módems o como las dimensiones de 72 cajas de kits, en el caso de que sus tareas incluyan solo operaciones con kits. Hay que tener en cuenta que el caso más desfavorable es la suma de concentradores y módems, por lo que en el caso de que existan tareas que recojan ambas opciones se optará por la primera.

Escenario	Entrada	1ª Estación	2ª Estación	3ª Estación	4ª Estación	5ª Estación	Salida
3_O_EQUI	15,36	1,50	1,50	0,94			132,48
4_O_EQUI	15,36	1,50	1,50	1,50	0,94		138,24
4_O_EQUI21	15,36	1,50	0,75	0,75	0,94		155,52
4_O_EQUI22	15,36	0,75	0,75	0,47	0,47		141,12
4_O_EQUI23	15,36	0,50	0,50	0,50	0,94		175,68
4_O_EQUI24	15,36	1,50	0,50	0,50	0,50		172,80
5_O_EQUI	15,36	1,50	1,50	1,50	0,94	0,94	141,12
5_O_EQUI21	15,36	1,50	1,50	0,75	0,75	0,94	198,72
5_O_EQUI22	15,36	0,75	0,75	0,75	0,75	0,94	236,16
5_O_EQUI23	15,36	0,75	0,75	0,50	0,50	0,50	198,72
5_O_EQUI24	15,36	0,50	0,50	0,50	0,47	0,47	207,36
5_O_EQUI25	15,36	1,50	0,38	0,38	0,38	0,38	146,88
5_O_EQUI26	15,36	0,38	0,38	0,38	0,38	0,94	204,48

Tabla 6-25: Necesidades parciales de almacenamiento en cada escenario de SALBP2

Escenario	Total
3_O_EQUI	152
4_O_EQUI	160
4_O_EQUI21	175
4_O_EQUI22	159
4_O_EQUI23	194
4_O_EQUI24	192
5_O_EQUI	163
5_O_EQUI21	220
5_O_EQUI22	256
5_O_EQUI23	218
5_O_EQUI24	226
5_O_EQUI25	166
5_O_EQUI26	223

Tabla 6-26: Necesidades totales de almacenamiento en cada escenario de SALBP2

6.4. Análisis de costes de cada escenario

Una vez realizados todas las simulaciones y realizadas las optimizaciones a través de SALBP2, solo falta calcular los costes asociados a estos escenarios y proceder a calcular el precio objetivo en cada escenario.

6.4.1. Costes de almacenamiento

Para calcular los costes de almacenamiento se fijará un coste medio mensual de suministros de 120€ y se estima un coste de 4€/m² de almacén, obteniendo los siguientes costes:

Código	Nº Operarios	Asignados	SUPERFICIE ALMACENAMIENTO	COSTES ALMACÉN	
			m2	Alquiler	Gastos
1_O_0ASIG	1	Sin Asignar	855	3.420 €	120 €
2_O_0ASIG	2	Sin Asignar	564	2.256 €	120 €
3_O_0ASIG	3	Sin Asignar	308	1.232 €	120 €
4_O_0ASIG	4	Sin Asignar	286	1.144 €	120 €
5_O_0ASIG	5	Sin Asignar	281	1.124 €	120 €
6_O_0ASIG	6	Sin Asignar	284	1.136 €	120 €

Tabla 6-27: Costes almacenamiento (1 de 3)

Código	Nº Operarios	Asignados	SUPERFICIE ALMACENAMIENTO	COSTES ALMACÉN	
			m2	Alquiler	Gastos
1_O_ASIG	1	Asignados	855	3.420 €	120 €
2_O_ASIG	2	Asignados	271	1.084 €	120 €
3_O_ASIG	3	Asignados	409	1.636 €	120 €
4_O_ASIG	4	Asignados	278	1.112 €	120 €
5_O_ASIG	5	Asignados	112	448 €	120 €
6_O_ASIG	6	Asignados	123	492 €	120 €

Tabla 6-28: Costes almacenamiento (2 de 3)

Código	Nº Operarios	Asignados	SUPERFICIE ALMACENAMIENTO	COSTES ALMACÉN	
			m2	Alquiler	Gastos
3_O_EQUI	3	Equilibrado	152	608 €	120 €
4_O_EQUI	4	Equilibrado	160	640 €	120 €
4_O_EQUI21	4	Equilibrado	175	700 €	120 €
4_O_EQUI22	4	Equilibrado	159	636 €	120 €
4_O_EQUI23	4	Equilibrado	194	776 €	120 €
4_O_EQUI24	4	Equilibrado	192	768 €	120 €
5_O_EQUI	5	Equilibrado	163	652 €	120 €
5_O_EQUI21	5	Equilibrado	220	880 €	120 €
5_O_EQUI22	5	Equilibrado	256	1.024 €	120 €
5_O_EQUI23	5	Equilibrado	218	872 €	120 €
5_O_EQUI24	5	Equilibrado	226	904 €	120 €
5_O_EQUI25	5	Equilibrado	166	664 €	120 €
5_O_EQUI26	5	Equilibrado	223	892 €	120 €

Tabla 6-29: Costes almacenamiento (3 de 3)

6.4.2. Costes de mano de obra y envíos

El cálculo de la mano de obra se realiza multiplicando el coste unitario de un operario por el número de operarios de cada escenario. El coste estimado ha sido de 1.170€ mensuales.

Por otro lado, el coste de cada envío se fija en unos 250€. Este valor incluye los gastos de transporte, así como de los materiales asociados como el palet, fleje, etc. El importe total mensual será variable en función del

número de salidas que se realicen cada mes.

Código	Nº Operarios	Asignados	CANTIDADES MENSUALES		COSTES ENVÍOS	
			Salidas	Kits	Mano de obra	Salidas
1_O_0ASIG	1	Sin Asignar	21	756	1.170 €	5.250 €
2_O_0ASIG	2	Sin Asignar	43	1.548	2.340 €	10.750 €
3_O_0ASIG	3	Sin Asignar	64	2.304	3.510 €	16.000 €
4_O_0ASIG	4	Sin Asignar	81	2.916	4.680 €	20.250 €
5_O_0ASIG	5	Sin Asignar	82	2.952	5.850 €	20.500 €
6_O_0ASIG	6	Sin Asignar	84	3.024	7.020 €	21.000 €

Tabla 6-30: Costes envíos (1 de 3)

Código	Nº Operarios	Asignados	CANTIDADES MENSUALES		COSTES ENVÍOS	
			Salidas	Kits	Mano de obra	Salidas
1_O_ASIG	1	Asignados	21	756	1.170 €	5.250 €
2_O_ASIG	2	Asignados	41	1.476	2.340 €	10.250 €
3_O_ASIG	3	Asignados	57	2.052	3.510 €	14.250 €
4_O_ASIG	4	Asignados	65	2.340	4.680 €	16.250 €
5_O_ASIG	5	Asignados	66	2.376	5.850 €	16.500 €
6_O_ASIG	6	Asignados	66	2.376	7.020 €	16.500 €

Tabla 6-31: Costes envíos (2 de 3)

Código	Nº Operarios	Asignados	CANTIDADES MENSUALES		COSTES ENVÍOS	
			Salidas	Kits	Mano de obra	Salidas
3_O_EQUI	3	Equilibrado	61	2.196	3.510 €	15.250 €
4_O_EQUI	4	Equilibrado	64	2.304	4.680 €	16.000 €
4_O_EQUI21	4	Equilibrado	72	2.592	4.680 €	18.000 €
4_O_EQUI22	4	Equilibrado	65	2.340	4.680 €	16.250 €
4_O_EQUI23	4	Equilibrado	81	2.916	4.680 €	20.250 €
4_O_EQUI24	4	Equilibrado	80	2.880	4.680 €	20.000 €
5_O_EQUI	5	Equilibrado	65	2.340	5.850 €	16.250 €
5_O_EQUI21	5	Equilibrado	91	3.276	5.850 €	22.750 €
5_O_EQUI22	5	Equilibrado	109	3.924	5.850 €	27.250 €
5_O_EQUI23	5	Equilibrado	92	3.312	5.850 €	23.000 €
5_O_EQUI24	5	Equilibrado	96	3.456	5.850 €	24.000 €
5_O_EQUI25	5	Equilibrado	67	2.412	5.850 €	16.750 €
5_O_EQUI26	5	Equilibrado	94	3.384	5.850 €	23.500 €

Tabla 6-32: Costes envíos (3 de 3)

6.4.3. Cálculo de precios y selección del mínimo

Finalmente ya se tiene la información necesaria para poder realizar el cálculo del precio objetivo. Como se indicó con anterioridad, este se calcula dividiendo la suma de todos los costes mensuales por la cantidad total de kits producidos en un mes, multiplicada esta por la diferencia entre 1 y el margen expresado en tanto por uno. El margen que se ha fijado para este proyecto es del 20%.

Estos son los precios que se obtienen:

Código	Nº Operarios	Asignados	Precio Kit	CANTIDADES SEMANALES	
				Salidas	Kits
1_O_0ASIG	1	Sin Asignar	16,47 €	5,25	189
2_O_0ASIG	2	Sin Asignar	12,49 €	10,75	387
3_O_0ASIG	3	Sin Asignar	11,32 €	16,00	576
4_O_0ASIG	4	Sin Asignar	11,23 €	20,25	729
5_O_0ASIG	5	Sin Asignar	11,68 €	20,50	738
6_O_0ASIG	6	Sin Asignar	12,10 €	21,00	756
1_O_ASIG	1	Asignados	16,47 €	5,25	189
2_O_ASIG	2	Asignados	11,68 €	10,25	369
3_O_ASIG	3	Asignados	11,89 €	14,25	513
4_O_ASIG	4	Asignados	11,84 €	16,25	585
5_O_ASIG	5	Asignados	12,06 €	16,50	594
6_O_ASIG	6	Asignados	12,70 €	16,50	594
3_O_EQUI	3	Equilibrado	11,09 €	15,25	549
4_O_EQUI	4	Equilibrado	11,63 €	16,00	576
4_O_EQUI21	4	Equilibrado	11,33 €	18,00	648
4_O_EQUI22	4	Equilibrado	11,58 €	16,25	585
4_O_EQUI23	4	Equilibrado	11,07 €	20,25	729
4_O_EQUI24	4	Equilibrado	11,10 €	20,00	720
5_O_EQUI	5	Equilibrado	12,22 €	16,25	585
5_O_EQUI21	5	Equilibrado	11,29 €	22,75	819
5_O_EQUI22	5	Equilibrado	10,91 €	27,25	981
5_O_EQUI23	5	Equilibrado	11,26 €	23,00	828
5_O_EQUI24	5	Equilibrado	11,17 €	24,00	864
5_O_EQUI25	5	Equilibrado	12,12 €	16,75	603
5_O_EQUI26	5	Equilibrado	11,22 €	23,50	846

Tabla 6-33: Precio objetivo de cada escenario

Como se ve en la tabla, el precio más bajo se consigue para el valor de 10,91€, que se corresponde con el escenario de 5 operarios y 3 estaciones, donde las dos primeras se duplican. Pero al analizar la producción se observa que se excede con mucho de los 720 equipos por semana, que se había fijado como máximo al que los proveedores se han comprometido a entregar.

El siguiente precio más bajo se encuentra en el valor de 11,07€, que se corresponde con un escenario de 4 operarios y dos estaciones. La primera con tres operarios y la segunda con 1.

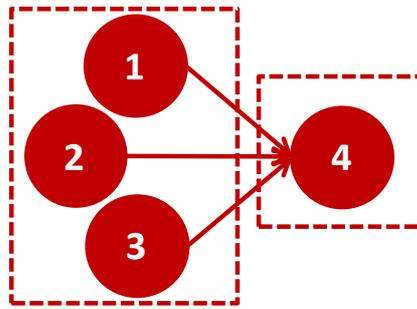


Figura 6-10: Modelo de precedencias

Cuya resolución a través de Solver da la siguiente configuración:

		N° Estaciones (j)	
		1	2
N° Operaciones (i)	1	1	0
	2	1	0
	3	1	0
	4	1	0
	5	1	0
	6	1	0
	7	1	0
	8	1	0
	9	1	0
	10	1	0
	11	1	0
	12	1	0
	13	1	0
	14	1	0
	15	0	1
	16	1	0
	17	1	0
	18	1	0
	19	1	0
	20	0	1
	21	0	1
	22	0	1
	23	0	1

Tabla 6-34: Configuración de tareas por estación

Es decir, 3 operarios estarían realizando cada uno las tareas que van de la 1 a la 19, y sólo uno se encargaría de preparar las salidas en las operaciones 15, 20, 21, 22 y 23.

Por último, indicar que este supuesto también excede el límite de los 720 equipos pero sólo por 9 unidades. Teniendo en cuenta que el tiempo de ciclo resultante es de 3,37 horas para un lote de 72 unidades, se puede deducir que el tiempo de ciclo unitario es de 2,81 minutos, por lo que esas nueve unidades semanales provocarían una parada equivalente a 25 minutos a la semana (o 5 minutos al día), lo cual podría ser asumible, por lo que se puede dar como el óptimo.

7 CONCLUSIONES

Como se ha podido comprobar en la fase de experimentación, gracias al estudio de equilibrado de líneas se ha conseguido optimizar el proceso global del centro de gestión de concentradores, de ensamblado de los módems. Pero también hay que tener en cuenta que este experimento no buscaba sólo maximizar la producción, ya que, con las premisas del proyecto, esto se podría conseguir simplemente aumentando el número de operarios, aunque estos aportasen poco diferencial.

Pero en este caso lo que se buscaba era optimizar el proceso para que se maximizase la producción al precio más reducido posible. Esto es lo que ha llevado a que además de realizar los estudios de optimización de la producción haya habido que aplicarle restricciones que permitan buscar el precio objetivo más bajo.

A continuación, se detallan las principales conclusiones extraídas del proyecto, así como posibles líneas de actuación que se han dejado al margen pero que podrían ser estudiadas también.

7.1. Análisis de los resultados obtenidos

En un principio el problema se ha planteado como un estudio de simulación donde elegir entre diferentes escenarios cuál de ellos era el que mejor se comportaba.

Primeramente, se estudiaron los escenarios donde no se le asignaba ninguna tarea concreta a ningún operario, sino que estos tenían completa libertad de movimientos con una estrategia FIFO (*First In First Out*). En estas simulaciones se comprobó que el hecho de aumentar el número de operarios no conseguía aumentar la producción de forma constante.

Además, hay que destacar un par de consideraciones. Por un lado, se comprobaba que para los escenarios de más de 3 operarios se superaba la supuesta tasa máxima de producción y, por otro lado, hay que tener en cuenta que estos escenarios simulados no dejan de ser algo irreales porque se está suponiendo que no existen pérdidas en los desplazamientos entre tareas y los operarios se pueden desplazar de una a otra sin pérdida de tiempo.

Con la segunda fase de ensayos se pretendía mejorar los resultados obtenidos y ser más realista, asignando los operarios a tareas concretas. Para ello el criterio elegido era el de igualar los tiempos de cada operario de forma que se minimizasen sus tiempos ociosos o tiempos muertos. Pero se comprobó que, en lugar de mejorar los resultados, éstos empeoraban. Esto se debe a dos motivos principalmente. El primero de ellos se puede deber a que la asignación de tareas, si bien igualaba los tiempos de operación, no tenía en cuenta ninguna regla de precedencia y el segundo de ellos a que, del análisis de tiempos y del diagrama de flujo, se puede verificar que existen dos procesos con mucho peso situado precisamente en el centro del proceso de montaje.

Sin embargo, en este segundo bloque de ensayos, el sistema se comportaba de forma similar al caso anterior, en el sentido de que, al ir aumentando el número de operarios, se reducía el tiempo total de procesado, pero no de forma lineal. De hecho, en este segundo bloque de ensayos, al llegar a 6 operarios, no se consigue reducir el tiempo total de producción de un mismo volumen de concentradores dado.

Teniendo todo esto en cuenta, se plantea el problema de diseño y equilibrado de una línea de montaje para los concentradores. Por un lado, se descartan los escenarios de uno o dos operarios por considerarse escenarios poco productivos y, por otro lado, se descarta ningún escenario por encima de 5 operarios, por dos motivos principalmente. En primer lugar, porque en ambos casos se ha comprobado que aportan poca mejora y, en segundo lugar, porque en el primer bloque de ensayos se supera la tasa máxima de producción, por lo que es probable que esto llegue a suceder si finalmente se mejoran los resultados de dichas simulaciones.

Además, se decide plantear el estudio con bloques de 72 unidades para así dar más verosimilitud a los tiempos conseguidos en la fase de estimación de tiempos de cada tarea, ya que de hacerse de forma unitaria no se

garantizarían esos tiempos estimados.

Al realizar los estudios de los problemas de equilibrado para los distintos escenarios, se vuelve a comprobar que el hecho de que exista un proceso en el centro del mismo que, además conlleva una gran parte del tiempo total de procesado, provoca que estos no consigan mejorar los resultados de los primeros ensayos.

Y es precisamente por este motivo por el que se decide plantear una propuesta de mejora y observar sus resultados. Consiste en la posibilidad de duplicar estaciones. Esto es, mantener el flujo igual, pero en determinadas fases optar por desdoblar las estaciones.

Esta solución no sería posible en flujos unitarios, pero en este caso al ser por lotes, es posible realizarlo. El hecho de duplicar una estación no afecta al tiempo de procesado unitario, sino que la estación deberá soportar la mitad de carga, por lo que el tiempo total de procesado sí disminuye.

Con estas consideraciones se consiguen plantear diferentes problemas y se calcularon las soluciones de todos y cada uno de ellos. Encontrando ahora sí varios escenarios que sí mejoran los resultados de las primeras simulaciones.

Finalmente, con el análisis de costes de almacenamiento, de mano de obra y de envíos, se calcularon todos los precios unitarios objetivos y se analizaron las soluciones. Y la forma de seleccionar el escenario óptimo fue el precio más bajo que no superase la tasa máxima de producción semanal.

7.2. Futuras líneas de actuación

Aun cuando el proyecto abarca varios estudios en diferentes disciplinas, es posible encontrar otras vías sobre las que actuar y poder mejorar aún más los resultados o encontrar otras soluciones óptimas, pero que han quedado fuera del alcance del presente proyecto.

Principalmente se podría realizar un estudio de la distribución de las estaciones en planta (en línea, en “U”, etc.), de forma que estudiando las tareas y las reglas de precedencia se consiguiese optimizar el trabajo de cada operario.

También se puede rediseñar el modelo de simulación para considerar la línea de montaje diseñada, e incorporar aleatoriedad a los tiempos de cada tarea y también curva de aprendizaje de los operarios.

Y, por último, con esas nuevas disposiciones físicas se podría analizar el impacto en los resultados al incorporar los tiempos de desplazamiento de los operarios entre tareas.

REFERENCIAS

- [1] A. García Sánchez y Ortega Mier, Miguel, Simulación de sistema discretos, vol. 2, 2016.
- [2] A. Fuentes Tzec y O. Camal Sulu, «Etapas del proceso de simulación,» 2016. [En línea].
- [3] I. Pascual García, Metodologías de resolución para el problema simple de equilibrado de líneas de montaje, 2015.
- [4] J. H. Restrepo, P. D. Medina y E. A. Cruz, «Problemas de Balanceo de línea SALBP-1 y SALBP-2: un caso de estudio,» 2008.
- [5] P. Berton, Niagara: a history of the Falls, 1997.
- [6] A. Zulueta Casal, A. E. Sáez Aldana y I. Méndez Roldán, «Comunicación por las líneas eléctricas (PLC),» 2012. [En línea].
- [7] N. Hernández, «Redes electricas inteligentes (REI) o Smartgrids,» 2014. [En línea].
- [8] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, nº 13, 2012.
- [9] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.

