

# PROYECTO FIN DE CARRERA

*“SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UN BLOQUE  
DE CONSTRUCCIÓN DE FONDO DE UN BARCO”*

**FRANCISCO ARACIL FERNÁNDEZ**

**OCTUBRE 2008**

## Contenido

<b>1. Objetivos del proyecto.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Lista de actividades a simular. ....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Características de las actividades.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 Lista de elementos propuestos.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Secuencias de ensamblaje. ....</b>	<b>6</b>
<b>1.5 Actividades globales de trabajo por tipo de elemento. ....</b>	<b>8</b>
<b>1.6 Secuencia de actividades para el elemento BP01_01. ....</b>	<b>9</b>
<b>1.7 Principios de trabajo.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Cuándo la simulación es la herramienta apropiada. ....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Ventajas e inconvenientes de la simulación.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Áreas de aplicación.....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Los sistemas y su ambiente.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5 Componentes de un sistema .....</b>	<b>17</b>
<b>2.6 Sistemas discretos y continuos. ....</b>	<b>18</b>
<b>2.7 Modelo de un sistema .....</b>	<b>19</b>
<b>2.8 Tipos de modelos.....</b>	<b>20</b>
<b>2.9 Sistemas de simulación de eventos discretos.....</b>	<b>21</b>
<b>2.10 pasos en un estudio de simulación. ....</b>	<b>21</b>
<b>3. Principios generales de la simulación.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Conceptos en simulación de eventos discretos. ....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 El algoritmo de eventos horario/tiempo. ....</b>	<b>31</b>
<b>4. Descripción de la herramienta informática. ....</b>	<b>38</b>
<b>5. Modelizado. ....</b>	<b>53</b>
<b>5.1 Descripción del modelo.....</b>	<b>53</b>
<b>5.2 Descripción de las Frames.....</b>	<b>55</b>
<b>5.3 Áreas de trabajo.....</b>	<b>59</b>
<b>5.4 Funcionamiento de las aéreas de trabajo.....</b>	<b>61</b>

<b>5.5 Secuencias de montaje. ....</b>	<b>62</b>
<b>5.6 Puestos de trabajo. Bucle interno.....</b>	<b>69</b>
<b>5.7 Tiempo de producción. ....</b>	<b>69</b>
<b>5.8 Trabajadores.....</b>	<b>71</b>
<b>5.9 Grúa.....</b>	<b>72</b>
<b>5.10 Proceso de fabricación.....</b>	<b>73</b>
<b>6. Resultados. ....</b>	<b>75</b>
<b>6.1 Escenario 1. ....</b>	<b>76</b>
<b>6.1.1 HITOS. ....</b>	<b>83</b>
Área de trabajo 1 .....	85
Área de trabajo 2 .....	87
Área de trabajo 3 .....	88
Área de trabajo 4 .....	90
<b>6.2 Resto de escenarios. ....</b>	<b>93</b>
<b>Caso 22222-22222: .....</b>	<b>94</b>
<b>Caso 23323-23333: .....</b>	<b>96</b>
<b>Caso 24423-24443: .....</b>	<b>99</b>
<b>Caso 24523-25543: .....</b>	<b>102</b>
<b>Caso 24623-26643: .....</b>	<b>105</b>
<b>Caso 24623-27743: .....</b>	<b>108</b>
<b>Caso 24623-28843: .....</b>	<b>111</b>
<b>Caso 24623-28943: .....</b>	<b>114</b>
<b>Conclusiones: .....</b>	<b>117</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>118</b>

## 1. Objetivos del proyecto.

El objetivo es modelar y simular las actividades de construcción y de pre-armamento de un bloque largo de construcción ("Large Building Block" LBB) de un barco.

El objeto a construir es una sección del pantoque, constituida por dos bloques de fondo consecutivos, de uno de los costados del buque, como se muestra en la figura.

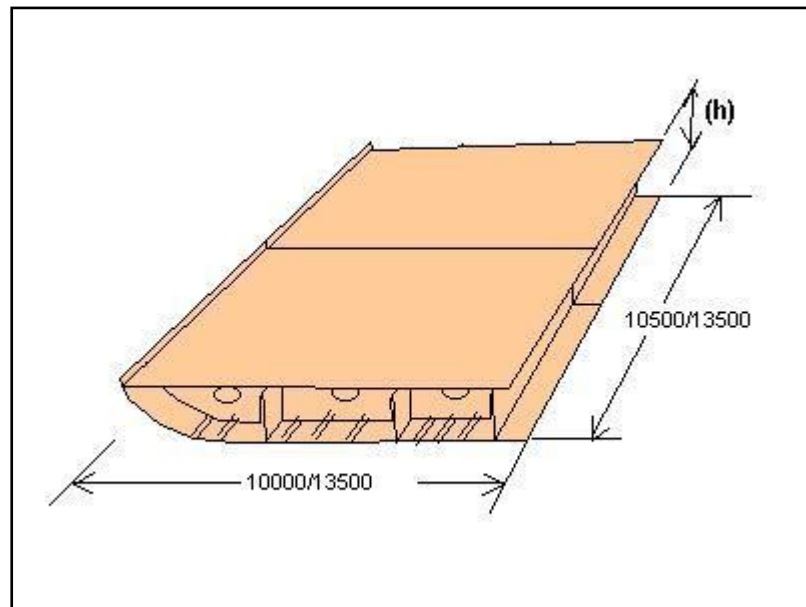


Fig. 1

### 1.1 Lista de actividades a simular.

1. Posicionamiento del primer panel en el área de construcción (2 bloques de fondo y 2 de doble fondo).
2. Montaje y posicionamiento de los elementos constituyentes del panel (planchas, refuerzos).
3. Soldadura de los elementos.
4. Montaje del doble fondo con el fondo (para ambas sub-secciones).
5. Soldadura.
6. Unión de las dos sub-secciones.
7. Soldadura.
8. Armamento:

- Montaje de tuberías
- Montaje de cables
- Montaje de bombas
- Montaje de maquinaria

## 1.2 Características de las actividades.

Algunas de estas actividades pueden realizarse de forma contemporánea, y otras deben ser realizadas de forma secuencial.

Cada actividad está caracterizada por una carga de trabajo expresada en hombres-hora (***h***).

Para cada actividad existe un número de hombres (***n***) variable desde un mínimo de dos hasta un máximo (cada actividad tiene su número máximo), por consiguiente la duración (***d***) de cada actividad estará ligada al número hombres, de la forma:

$d=h/n$ . Este valor podrá cambiar a lo largo del tiempo.

Los turnos de trabajo serán de 8 horas con dos turnos por día.

Algunas actividades requieren equipamiento específico, concretamente la ayuda de una grúa para la realización del posicionamiento y alineación entre piezas.

## 1.3 Lista de elementos propuestos.

Tipo	Descripción	cantidad
SF02	Bloque Largo de Construcción	1
FL01	Bloque Doble Fondo	2
BP01	Bloque de Fondo	2
PA18	Panel Sencillo	1
BP04	Panel con Sub-Ensamblaje	6
BP80	Panel con Sub-Ensamblaje	4
BP84	Panel con Sub-Ensamblaje	2
SA29	Sub-Ensamblaje	18
SA41	Sub-Ensamblaje	3
PA14	Panel Sencillo	1
SA26	Sub-Ensamblaje	15
SA39	Sub-Ensamblaje	4

**Tabla 1**

### **1.4 Secuencias de ensamblaje.**

Para la consecución del bloque de fondo necesitamos una serie de piezas intermedias que se irán ensamblando entre sí para ir formando elementos de mayor valor añadido, hasta alcanzar el bloque final de construcción. Estas piezas intermedias tienen una secuencia de construcción intrínseca a su propia construcción y a la vez una secuencia de ensamblaje global para alcanzar el bloque final.

La secuencia de construcción de cada pieza se muestra en la siguiente tabla, que también nos muestra la secuencia global de construcción.

Área de trabajo 1	Área de trabajo 2	Área de trabajo 3	Área de trabajo 4
<b>BP01_01</b>	<b>BP01_02</b>	<b>FL01_01</b>	<b>FL01_02</b>
PA14_01	PA14_02	PA18_01	PA18_02
SA26_01	SA26_16	BP04_01	BP04_07
SA26_02	SA26_17	BP04_02	BP04_08
SA26_03	SA26_18	BP04_03	BP04_09
SA26_04	SA26_19	BP04_04	BP04_10
SA26_05	SA26_20	BP04_05	BP04_11
SA26_06	SA26_21	BP04_06	BP04_12
SA26_07	SA26_22	BP80_01	BP80_05
SA26_08	SA26_23	BP80_02	BP80_06
SA26_09	SA26_24	BP80_03	BP80_07
SA26_10	SA26_25	BP80_04	BP80_08
SA26_11	SA26_26	BP84_01	BP84_03
SA26_12	SA26_27	BP84_02	BP84_04
SA26_13	SA26_28	SA29_01	SA29_19
SA26_14	SA26_29	SA29_02	SA29_20
SA26_15	SA26_30	SA29_03	SA29_21
SA39_01	SA39_05	SA29_04	SA29_22
SA39_02	SA39_06	SA29_05	SA29_23
SA39_03	SA39_07	SA29_06	SA29_24
SA39_04	SA39_08	SA29_07	SA29_25
		SA29_08	SA29_26
		SA29_09	SA29_27
		SA29_10	SA29_28
		SA29_11	SA29_29
		SA29_12	SA29_30
		SA29_13	SA29_31
		SA29_14	SA29_32
		SA29_15	SA29_33
		SA29_16	SA29_34
		SA29_17	SA29_35
		SA29_18	SA29_36
		SA41_01	SA41_04
		SA41_02	SA41_05
		SA41_03	SA41_06

Área de Trabajo 1	Área de Trabajo 2
<b>SF02_a</b>	<b>SF02_b</b>
BP01_01	BP01_02
FL01_01	FL01_02

Área de trabajo 1&2
<b>SF02</b>
SF02_a
SF02_b

Tabla 2

Para construir SF02 LBB, las 4 áreas de trabajo son necesarias, en cada una de las cuales las actividades pueden desarrollarse independientemente y contemporáneamente.

## 1.5 Actividades globales de trabajo por tipo de elemento.

Tipo	Paso	Actividad	Horas Hombre	Hombres(máx)
SF02	1	Level setup	39.6	2
SF02	2	Assembly	554.4	8
SF02	3	Welding	660.0	10
SF02	4	Finishing	66.0	4
SF02	5	Outfitting (pipes, pumps)	80.0	3

FL01	1	Level setup	29.8	2
FL01	2	Assembly	249.9	4
FL01	3	Welding	297.5	6
FL01	4	Finishing	17.9	2
FL01	5	Outfitting (pipes)	40.0	3
FL01	6	Outfitting (accessories)	12.0	3

BP01	1	Level setup	4.8	2
BP01	2	Assembly	211.2	4
BP01	3	Welding	240.0	6
BP01	4	Finishing	24.0	2
BP01	5	Outfitting	40.0	3
BP01	6	Outfitting (accessories)	12.0	3

**Tabla 3**

Las actividades de la tabla se han escrito en inglés para facilitar el seguimiento en la simulación, ya que en ella se ha utilizado el inglés como lenguaje de referencia.

El número de horas-hombre es el total necesario para realizar toda la actividad. Esto quiere decir que si hemos de repetir la actividad 15 veces, el tiempo horas-hombre de la tabla será el tiempo total para realizar 15 veces dicha actividad.



## 1.6 Secuencia de actividades para el elemento BP01\_01.

Bloque	Paso	Actividad
<b>BP01_01</b>	1	Level setup
PA14_01	2a_1	Assembly with crane (first block positioning)
SA26_01	2a_2	Assembly with crane
SA26_01	2b_2	Assembly without crane
SA26_01	3_2	Welding
SA26_02	2a_3	Assembly with crane
SA26_02	2b_3	Assembly without crane
SA26_02	3_3	Welding
SA26_03	2a_4	Assembly with crane
SA26_03	2b_4	Assembly without crane
SA26_03	3_4	Welding
SA26_04	2a_5	Assembly with crane
SA26_04	2b_5	Assembly without crane
SA26_04	3_5	Welding
SA26_05	2a_6	Assembly with crane
SA26_05	2b_6	Assembly without crane
SA26_05	3_6	Welding
SA26_06	2a_7	Assembly with crane
SA26_06	2b_7	Assembly without crane
SA26_06	3_7	Welding
SA26_07	2a_8	Assembly with crane
SA26_07	2b_8	Assembly without crane
SA26_07	3_8	Welding
SA26_08	2a_9	Assembly with crane
SA26_08	2b_9	Assembly without crane
SA26_08	3_9	Welding
SA26_09	2a_10	Assembly with crane
SA26_09	2b_10	Assembly without crane
SA26_09	3_10	Welding
SA26_10	2a_11	Assembly with crane
SA26_10	2b_11	Assembly without crane
SA26_10	3_11	Welding
SA26_11	2a_12	Assembly with crane
SA26_11	2b_12	Assembly without crane
SA26_11	3_12	Welding
SA26_12	2a_13	Assembly with crane
SA26_12	2b_13	Assembly without crane
SA26_12	3_13	Welding
SA26_13	2a_14	Assembly with crane
SA26_13	2b_14	Assembly without crane
SA26_13	3_14	Welding
SA26_14	2a_15	Assembly with crane

SA26_14	2b_15	Assembly without crane
SA26_14	3_15	Welding
SA26_15	2a_16	Assembly with crane
SA26_15	2b_16	Assembly without crane
SA26_15	3_16	Welding
SA39_01	2a_17	Assembly with crane
SA39_01	2b_17	Assembly without crane
SA39_01	3_17	Welding
SA39_02	2a_18	Assembly with crane
SA39_02	2b_18	Assembly without crane
SA39_02	3_18	Welding
SA39_03	2a_19	Assembly with crane
SA39_03	2b_19	Assembly without crane
SA39_03	3_19	Welding
SA39_04	2a_20	Assembly with crane
SA39_04	2b_20	Assembly without crane
SA39_04	3_20	Welding
<b>BP01_01</b>	4	Finishing

**Tabla 4**

Para el resto de piezas a fabricar, la lista de actividades es similar a esta, variando el número de actividades a realizar.

## **1.7 Principios de trabajo.**

Para que los resultados sean comparables con el resto de participantes del proyecto Marstruc, debemos seguir unas pautas generales dispuestas a tal efecto.

La duración de cada actividad depende de la carga de trabajo expresada en horas-hombre, de la tabla 3, y está dado en tiempos globales.

Esta carga de trabajo debe ser dividida entre todos los componentes de cada actividad, excepto el primer panel.

La primera actividad es “Level Setup”.

Los componentes deben ensamblarse uno detrás de otro, como se describe en la tabla 4.

El orden de llegada de los constituyentes está fijado, no así el de soldadura, que queda a nuestra disposición. No obstante, al tratarse de una superficie de montaje y no de una línea de producción, la secuencia de soldadura no tendrá una gran relevancia en el resultado final. La solución adoptada finalmente, tras consultar con el resto de

participantes, ha sido la de proceder a las actividades de soldadura una vez realizadas las actividades de montaje siguiendo un proceso secuencial.

EL número de trabajadores de la tabla 3 es el máximo número posible en cada estación de trabajo. El mínimo es de dos. La actividad no podrá comenzar si no existen al menos dos trabajadores disponibles. Así mismo, en la actividad "Assembly whith crane", el requerimiento para que la actividad comience será de dos trabajadores como mínimo más la grúa. Ambas condiciones son necesarias para desarrollar la actividad.

El tiempo de "Assembly whith crane" será el 30% del tiempo total de "Assembly" de la tabla 3.

## 2. Introducción a la simulación.

Una simulación es la reproducción de una operación de un proceso o un sistema real a través del tiempo. Puede estar hecho a la mano o por ordenador. La simulación incluye la generación de una historia artificial de un sistema y la observación de esta historia artificial para sacar las conclusiones necesarias con respecto a las características de operación del sistema real.

El comportamiento del sistema mientras evoluciona a través del tiempo está estudiado por el desarrollo de un modelo de simulación. Este modelo normalmente asume ciertos supuestos con respecto a la operación del sistema. Estos supuestos están expresados en relaciones matemáticas, lógicas y simbólicas entre las entidades u objetos de interés del sistema. Una vez que está desarrollado y validado, un modelo puede ser utilizado para investigar una amplia variedad de escenarios sobre el sistema real. Los cambios potenciales al sistema pueden ser simulados para predecir su impacto en la funcionalidad del sistema. La simulación también puede ser utilizada para estudiar sistemas en la etapa de diseño, antes de que estos estén construidos. La modelización de un sistema para la simulación, puede ser usada como una herramienta de análisis para predecir el efecto de cambios en los sistemas existentes y como una herramienta de diseño para predecir la funcionalidad de nuevos sistemas en distintas circunstancias.

En algunos casos, un modelo puede ser desarrollado de forma suficientemente sencilla para ser solucionado por métodos matemáticos. Estas soluciones pueden ser encontradas mediante el uso de cálculos diferenciales, teoría de probabilidad, métodos algebraicos u otras técnicas matemáticas.

La solución normalmente consiste en uno o más parámetros numéricos llamados medidas de funcionalidad del sistema. Sin embargo muchos sistemas del mundo real son tan complejos que, modelos de estos sistemas, son virtualmente imposibles de solucionar matemáticamente. En estos instantes, la simulación numérica por ordenador, puede ser usada para imitar el comportamiento de sistemas a través del tiempo. Desde el punto de vista de la simulación, los datos son coleccionados como si un sistema real estuviera siendo observado. Estos datos generados por simulación son usados para estimar las medidas de funcionalidad del sistema.

Aquí trataremos los modelos utilizados por la mayoría de los programas de simulación, incluyendo el que nosotros hemos utilizado para la simulación –modelos de simulación discreta.

## 2.1 Cuándo la simulación es la herramienta apropiada.

La disponibilidad de lenguajes de simulación especiales, capacidades informáticas a un precio que disminuye con cada operación, y los avances en metodología de simulación, han hecho que la simulación sea una de las herramientas más usadas y aceptadas en operaciones de investigación y en análisis de sistemas. Las circunstancias en que la simulación es una herramienta apropiada para usar, han sido discutidas por muchos autores.

La simulación puede ser usada para los siguientes propósitos:

1. La simulación nos permite estudiar y experimentar con las interacciones internas de un sistema complejo o de un subsistema dentro de un sistema complejo.
2. Cambios de información, organización y del entorno pueden ser simulados y el efecto de estas alteraciones sobre el comportamiento del modelo puede ser observado.
3. El conocimiento conseguido en diseñar un modelo de simulación puede ser de gran valor para ayudarnos a encontrar posibles mejoras en el sistema que se está investigando.
4. Cambiando los datos de entrada de la simulación y observando cómo repercuten en las salidas, gran cantidad de información valiosa puede ser obtenida con respecto a las variables más importantes y cómo interactúan entre ellas.
5. La simulación puede ser usada como un dispositivo pedagógico para reforzar metodologías de soluciones analíticas.
6. La simulación puede ser usada para experimentar con nuevos diseños o políticas antes de la implementación.
7. La simulación puede ser usada para verificar soluciones analíticas.

## 2.2 Ventajas e inconvenientes de la simulación.

El cliente de la simulación es atraído a ella porque imita lo que pasa en un sistema real y lo que pasará a un sistema que esté en la fase de diseño. Los datos extraídos de una simulación corresponden directamente a las salidas que pueden ser atribuidas a un sistema real. También es posible desarrollar un modelo de simulación de un sistema sin asumir hipótesis de dudosa calidad, mediante modelos solucionables matemáticamente (utilizando distribuciones estadísticas para cada variable aleatoria, en lugar de hipótesis poco estudiadas). Por estas razones y otras, la simulación es frecuentemente la elección preferida para solucionar problemas.

En comparación con modelos de optimización, los modelos de simulación se “prueban”, en lugar de “obtener soluciones”. Únicamente con las características del

modelo y algunas entradas, el modelo está listo para ser probado y el comportamiento simulado ser observado. Durante el proceso de simulación, se producen cambios en las entradas para estudiar los resultados característicos ( generación de escenarios). Una buena solución en el análisis de un sistema existente o el diseño de un nuevo sistema, es recomendado para la implementación total de la simulación.

La simulación tiene tanto ventajas como inconvenientes.

Las ventajas son:

1. Nuevas políticas de procesos de operación, reglas de decisión, flujos de información, procesos de organización, y demás, pueden ser explorados sin interrumpir operaciones del sistema real.
2. Nuevos diseños de hardware, disposición física, sistemas de transporte, pueden ser probados sin invertir grandes recursos para su obtención.
3. Pueden probarse diferentes hipótesis de cómo y porqué ciertos fenómenos ocurren.
4. El tiempo puede ser comprimido o descomprimido para permitir la aceleración o desaceleración del fenómeno investigado.
5. Información sobre la interacción de las variables puede ser obtenida.
6. Puede obtenerse información sobre la importancia de variables y sobre la funcionalidad del sistema.
7. Análisis de cuellos de botella pueden ser realizados para indicar los puntos donde el proceso de trabajo, información, materiales, y otros están excesivamente retrasados.
8. Un estudio de simulación puede ayudar a entender cómo funciona el sistema en lugar de cómo los individuos piensan que el sistema funciona.
9. Cuestiones generales del tipo ¿qué pasa si...? pueden ser contestadas. Esto es particularmente útil en el diseño de nuevos sistemas.

Los inconvenientes son:

1. La construcción del modelo requiere entrenamiento especial. Es un arte que se aprende a través del tiempo y también por la experiencia. Además si dos modelos están contruidos por dos individuos competentes, es posible que tengan similitudes pero es poco probable que sean exactamente iguales.
2. Es posible que los resultados de simulación sean difíciles de interpretar. Debido a que las mayorías de las salidas de la simulación son variables aleatorias (normalmente están basadas en entradas aleatorias), es posible que sea difícil determinar si una observación es un resultado de interrelaciones del sistema o un resultado aleatorio.
3. Los modelos de simulación y su análisis requieren mucho tiempo y mucho dinero. Sin invertir todos los recursos posibles para modelar, puede resultar un modelo de simulación o análisis que no sea suficiente para los objetivos marcados.
4. En algunos casos la simulación es usada cuando una simulación analítica es posible o preferible.

En defensa de la simulación hay que recalcar que estos cuatro inconvenientes pueden ser evitados con las reglas siguientes:

1. Fabricantes de software de simulación han estado desarrollando productos que contienen modelos que solo necesitan datos de entrada para su operación. Modelos así tienen el nombre genérico de “simuladores” o “templates” (con modelos ya cargados en su base de datos).

2. Muchos software de simulación han desarrollado capacidades de análisis de los datos de salida para llevar a cabo un análisis muy completo y más sencillo.

3. Se puede realizar la simulación más rápidamente hoy que ayer, y también más rápido mañana. Esto se puede atribuir a los avances de hardware que permiten una funcionalidad más rápida de escenarios. También se puede atribuir a los avances en muchos productos de simulación. Por ejemplo existe software de simulación que contiene construcciones para la modelización de manipulación de material utilizando transportes como carretillas elevadoras, cintas transportadoras y vehículos guiados automáticamente.

4. Modelos de forma cerrada no son capaces de analizar la mayoría de los sistemas complejos que se encuentran en desarrollo.

## 2.3 Áreas de aplicación.

Hay muchas aplicaciones para la simulación que globalmente se pueden dividir en sistemas de fabricación, sistemas públicos y otros. Algunas de las áreas de aplicación en las que se ha utilizado el estudio mediante simulación son las siguientes:

### **Sistemas de fabricación**

- Diseño de sistemas de manipulación de materiales para la fabricación de materiales semiconductores.
- Interoperabilidad para la planificación de stock.
- Operaciones de montaje de aeronaves
- Control ágil de la fabricación de aeronaves
- Representación espacial y autonomía de diseño de sistemas de manipulación de materiales.
- Modelo distribuido para la fabricación de ordenadores integrados.

- Herramientas compartidas para sistemas de fabricación flexible.
- Fabricación inmediata.
- Sistemas de capacidad finita para hacer horarios.
- Inventario de costes del modelo de producción “just-in-time”.
- Seguimiento del inventario para sistemas de producción Kanban.
- Dificultades en sistemas de fabricación manual.

#### **Sistemas públicos**

- Sistemas sanitarios.
- Militares.
- Recursos naturales.

#### **Sistemas de transporte**

- Transferencia de carga y personas.
- Operaciones con contenedores.

#### **Sistemas de construcción**

- Aplicaciones en movimiento de tierra.
- Forzando la interface entre diseño y construcción.
- Planificación de proyectos avanzados

## **2.4 Los sistemas y su ambiente.**

Para modelar un sistema, es necesario entender el concepto de sistema y la frontera de un sistema. Un *sistema* es definido como un grupo de objetos que son unidos en interacción regular o interdependencia hacia el cumplimiento de algún propósito. Un ejemplo de un sistema de producción es la fabricación de vehículos. Las maquinas, los componentes y los trabajadores trabajan juntos en una línea de montaje, para producir un vehículo.

A menudo un sistema está afectado por cambios que ocurren fuera del sistema. Los cambios ocurren en el *ambiente del sistema*. En modelos de sistema, es necesario decidir



cuál es la frontera entre el sistema y su ambiente. Esta decisión puede depender del propósito del sistema

En el caso de un sistema de fabricación, por ejemplo, los factores que controlan la llegada de órdenes pueden ser considerados como fuera de la influencia de la fabricación y entonces, parte del ambiente. Sin embargo, si el efecto del suministro en la demanda va a ser considerado, habrá una relación entre la salida de una fábrica y la llegada de pedidos, y esta relación debe ser considerada como una actividad del sistema. Igualmente, en el caso de un sistema de banco, es posible que haya un límite en el nivel de interés máximo que puede ser pagado a los clientes. Para el estudio de solo un banco, sería visto como una restricción impuesta por el ambiente. En un estudio de los efectos de leyes monetarias en la industria bancaria, el escenario del límite sería una actividad del sistema.

## 2.5 Componentes de un sistema

Para entender y analizar un sistema necesitamos conocer ciertas definiciones.

Una *entidad* es un objeto de interés en un sistema. Un *atributo* es una propiedad de una entidad. Una *actividad* representa un periodo de tiempo especificado. Si se estudia un banco, los clientes pueden ser una de sus entidades, la balanza de sus cuentas pueden ser un atributo, y la transferencia de dinero puede ser una actividad.

El conjunto de entidades que componen un sistema para un estudio puede ser un subconjunto del sistema general. Por ejemplo si el banco está siendo estudiado para determinar el número de cajeros necesarios para pagar y recibir dinero, el sistema puede ser definido como la porción del banco que consiste en los cajeros regulares y los clientes que esperan en la cola. Si el propósito del estudio es ampliado para determinar el número de cajeros especiales necesarios (para preparar los cheques de los cajeros, para vender cheques de viaje, etc.) la definición del sistema debe ser ampliada.

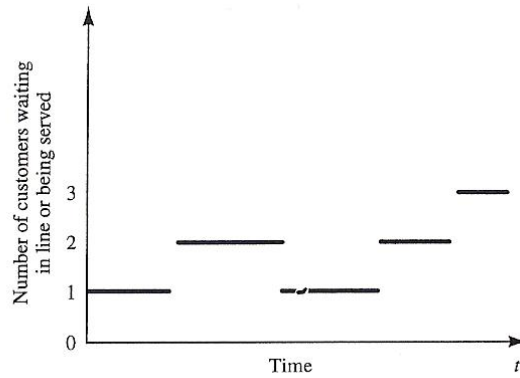
El *estado* de un sistema es definido como la colección de variables necesarias para describir el sistema en cualquier instante, relativo a los objetivos del estudio. En el estudio de un banco, variables posibles del estado son el número de cajeros ocupados, el número de clientes esperando en la cola o siendo atendidos, y la hora de llegada del siguiente cliente. Un *evento* es definido como un suceso instantáneo que puede cambiar el estado del sistema. El término *endógeno* es utilizado para describir actividades y eventos que ocurren dentro de un sistema y el término *exógeno* es usado para describir actividades y eventos en el ambiente que afectan al sistema. En el estudio del banco, la llegada de un

cliente es un evento exógeno y la finalización de servicio de un cliente es un evento endógeno.

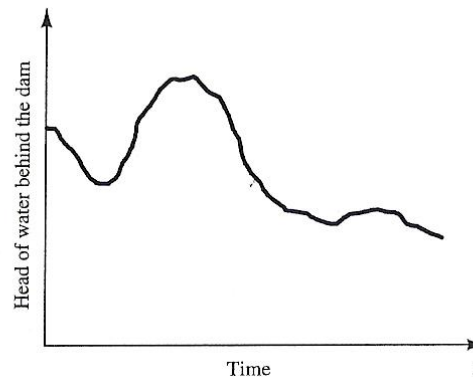
## **2.6 Sistemas discretos y continuos.**

Los sistemas pueden ser discretos o continuos. Pocos sistemas en la práctica son totalmente discretos o continuos, pero como un tipo de cambio predomina para la mayoría de sistemas, normalmente será posible clasificar un sistema como discreto o continuo. Un sistema discreto es uno en que el estado de las variables solo puede variar de forma discreta en el tiempo. El banco es un ejemplo de un sistema discreto porque el estado de la variable, el número de clientes en el banco, solo cambia cuando un cliente llega o cuando el servicio dado al cliente termina.

Un sistema continuo es uno en el cual el estado de las variables cambia de forma continua a través del tiempo. Un ejemplo de esto es el nivel del agua en la cabecera de una presa. Durante y después de una tormenta, el agua fluye hasta el lago detrás de la presa. Se desaloja agua de la presa para controlar las crecidas y generar electricidad. La evaporación también disminuye el nivel de agua. Todo esto ocurre de forma continua en el tiempo.



**Figure 1.1.** Discrete system state variable.



**Variables discretas y continuas**

## 2.7 Modelo de un sistema

A veces es interesante estudiar un sistema para entender las relaciones entre sus componentes o para predecir como el sistema operará bajo unas nuevas condiciones. Para estudiar el sistema, a veces es posible experimentar con el propio sistema. Sin embargo, esto no es siempre posible. Un nuevo sistema quizás no pueda existir todavía, es posible solo se encuentre de forma hipotética o en la etapa de diseño. Incluso si el sistema existe, es posible que sea impracticable experimentar con él.

Un modelo es definido como una representación de un sistema con el propósito de estudiar el sistema. Para la mayoría de estudios, solo es necesario considerar aquellos aspectos del sistema que afectan al sistema bajo investigación. Estos aspectos están representados en un modelo del sistema y el modelo, por definición, es una simplificación del sistema. Por otro lado el modelo debería ser lo suficientemente detallado para extraer conclusiones validas sobre el sistema real. Modelos diferentes de un mismo sistema pueden ser requeridos cuando el propósito de la investigación cambia.

Así como los componentes de un sistema son entidades, atributos y actividades, los modelos son representados de forma similar. Sin embargo el modelo contiene solo aquellos componentes que resultan relevantes al estudio.

## 2.8 Tipos de modelos

Pueden ser clasificados en matemáticos o físicos. Modelos matemáticos utilizan notación simbólica y ecuaciones matemáticas para representar el sistema. Un modelo de simulación es un tipo particular de un modelo matemático de un sistema.

Los modelos de simulación también pueden ser clasificados en estáticos o dinámicos, deterministas o estocásticos y discretos o continuos. Un modelo estático de simulación, a veces llamado simulación de Montecarlo, representa un sistema en un punto particular del tiempo. Modelos dinámicos de simulación representan sistemas que cambian a través del tiempo. La simulación de un banco de 8:00A.M. a 3:00 P.M. es un ejemplo de simulación dinámica.

Modelos de simulación que no contienen variables aleatorias pueden ser clasificados como deterministas. Modelos deterministas tienen un conjunto de entradas conocidas que darán como resultado un conjunto de salidas únicas. Un ejemplo de modelo determinista ocurrirá cuando en una consulta se conozca con exactitud la hora de llegada de los pacientes, y se sepa que estos llegarán puntuales a la cita. Modelo de simulación estocástico, tienen una o más variables aleatorias como entradas. Entradas aleatorias dan como resultado salidas aleatorias. Como las salidas son aleatorias, estas solo pueden considerarse como estimaciones de las características reales del modelo. En una simulación estocástica, los datos de salida -por ejemplo el tiempo de espera de los clientes de un banco, tiempo de espera medio- debe ser tratado como una estimación estadística de las verdaderas características del sistema.

Los sistemas discretos y continuos han sido tratados en el punto 1.6. Una simulación discreta de un modelo, no siempre es utilizado para modelar sistemas discretos, ni simulaciones continuas son siempre utilizadas para modelar sistemas continuos. Adicionalmente, modelos de simulación pueden ser mixtos, discretos y continuos. La elección para utilizar un sistema discreto o continuo (o ambos, discreto y continuo) para un modelo de simulación, es función de las características del sistema y de los objetivos del estudio. Por ejemplo, un sistema de comunicación mediante canales puede ser modelado de forma discreta si las características y movimientos de cada mensaje es considerada

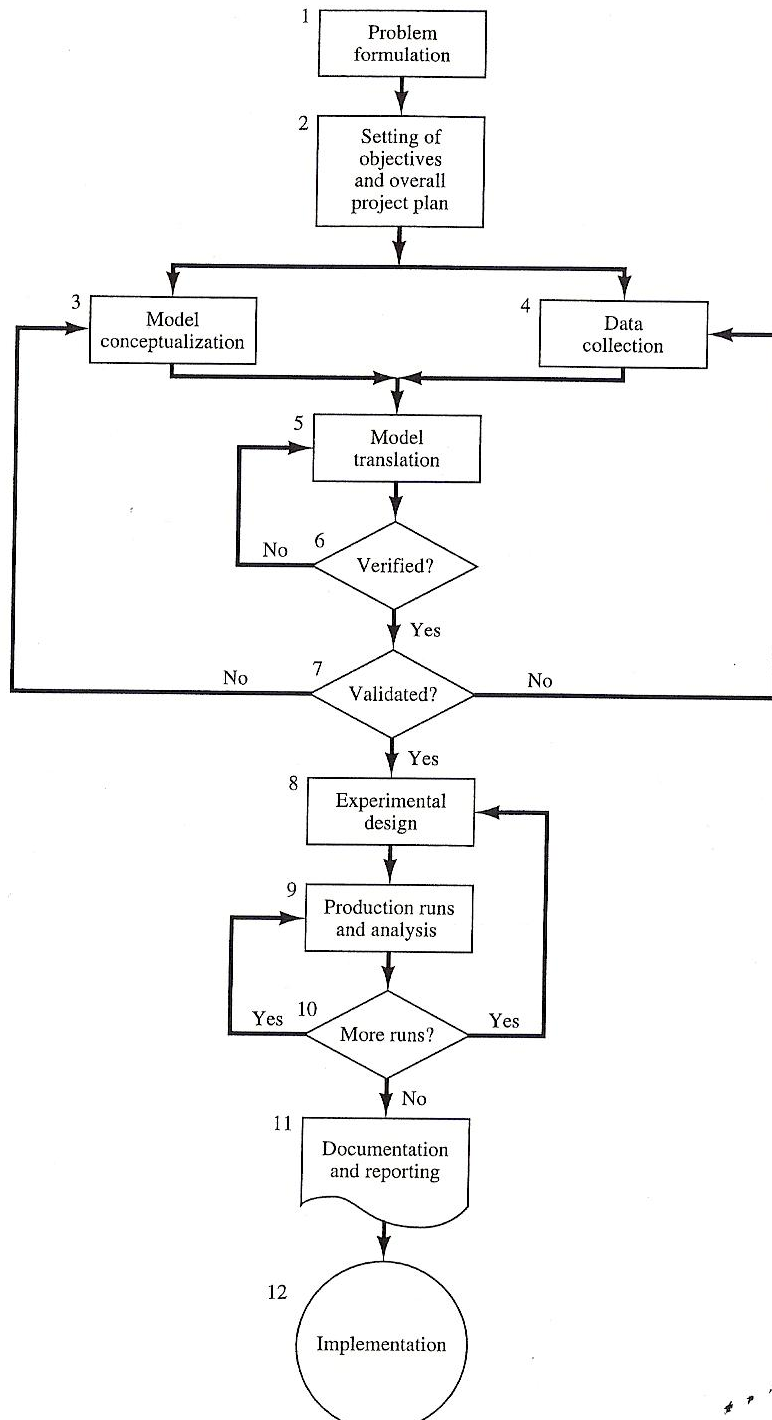
importante. Por el contrario, si el flujo de mensajes enviado a través del canal fuera elevado, la modelización del sistema utilizando simulación continua sería más apropiada.

## **2.9 Sistemas de simulación de eventos discretos.**

Los sistemas de simulación de eventos discretos son los encargados de la modelización de sistemas en los cuales el estado de las variables cambia solo de forma discreta en ciertos puntos en el tiempo. Los modelos de simulación son analizados por métodos numéricos en lugar de métodos analíticos. Los métodos analíticos emplean razonamientos deductivos matemáticos para “solucionar” el modelo. Por ejemplo, cálculos diferenciales pueden ser utilizados para determinar la política de coste mínimo para modelos de inventario. Métodos numéricos emplean procedimientos computacionales para “resolver” modelos matemáticos. En el caso de modelos de simulación, aquellos que usan métodos numéricos, los modelos son “probados” en lugar de “solucionados”; esto es, una historia artificial del sistema es generada en base a las hipótesis del modelo, y las observaciones son recogidas para ser analizadas, y estimar las medidas de la funcionalidad verdadera del sistema.

## **2.10 pasos en un estudio de simulación.**

La figura siguiente muestra la serie de pasos para guiar a un constructor de modelos por un estudio de simulación profunda. Los pasos en un estudio de simulación son los siguientes:



**La formulación de problemas.** Cada estudio debería empezar con una declaración del problema. Si la declaración es hecha por la persona que cree las reglas, o por aquellos que tienen el problema, el analista debe asegurar que el problema que está siendo descrito es claramente entendido. Si una declaración de problemas está siendo desarrollada por el analista, es importante que la persona que hace las reglas, entienda y esté de acuerdo con

la formulación. Hay ocasiones donde el problema debe ser reformulado mientras el estudio continúa. En muchos casos, la persona que formula las reglas y los analistas que las ponen de manifiesto son conscientes que hay un problema mucho antes que la naturaleza del problema sea conocida.

***Establecimiento de objetivos y plan de proyecto general.*** Los objetivos indican las preguntas que van a ser respondidas por la simulación. En este habrá que determinar si la simulación es la metodología apropiada para el problema formulado y los objetivos declarados. Una vez decidido que la simulación es lo apropiado, el plan de proyecto general debería incluir una declaración de los sistemas alternativos para ser considerados, y un método para evaluar la eficacia de estas alternativas. También debería incluir los planes para el estudio en términos de número de personal involucrado, el coste del estudio, y el número de días requeridos para cumplir cada fase de trabajo con los resultados anticipados al final de cada fase.

***Conceptualización del modelo.*** La construcción de un modelo de un sistema es tanto un arte como una ciencia. Aunque no es posible dar a la gente que va a construir el modelo unas instrucciones exactas que conduzcan a la construcción con éxito del modelo apropiado en cada caso, si se pueden dar líneas generales que pueden ser seguidas. El arte de modelar es la capacidad de extraer las características esenciales de un problema, para seleccionar y modificar hipótesis básicas que caractericen el sistema, y luego enriquezcan y elaboren el modelo hasta que los resultados den aproximaciones útiles. Para realizar tal tarea es mejor empezar con un modelo sencillo e ir hacia uno más complejo. Sin embargo el nivel de complejidad del modelo no necesita exceder el requerido para cumplir los propósitos para los cuales ha sido realizado. La violación de este principio solo añadirá a la construcción del modelo gastos informáticos innecesarios. No es necesario tener una convergencia de uno a uno entre modelo y realidad. Solo la esencia del sistema real es necesaria.

Es aconsejable involucrar a la persona que usa el modelo en la conceptualización del modelo.

***Recopilación de datos.*** Es una realimentación constante entre la construcción del modelo y la recopilación de los datos de entrada necesarios. Cuando la complejidad del modelo cambia, los elementos de datos requeridos también deberían cambiar. Hay que tener en cuenta que la colección de datos absorbe una proporción grande del tiempo total requerido para la realización de la simulación, y por tanto es necesario empezarla tan

pronto como sea posible, normalmente junto con las fases más tempranas de la construcción del modelo.

Los objetivos del estudio dictan, en gran parte, el modo en que los datos deben ser recogidos. En el estudio de un banco por ejemplo, si lo que se desea es aprender sobre la distancia de las colas por el número de cajeros que están disponibles, los tipos de datos necesarios deberían ser las distribuciones del tiempo entre llegadas (a diferentes horas del día), las distribuciones de tiempo-servicio para los cajeros y las distribuciones históricas de la longitud de las colas bajo condiciones variables. Estos últimos datos serán utilizados para validar el modelo de simulación.

**Traducción del modelo.** Como la mayoría de sistemas reales resultan en modelos que requieren mucho almacenamiento y procesamiento de información, el modelo debe ser introducido en el ordenador en un formato reconocible por este. Se utiliza el término “programa” incluso cuando es posible cumplir con el resultado deseado en muchas situaciones con poca o sin ninguna codificación. Los modeladores deben decidir programar el modelo en un lenguaje de simulación tales como GPSS/H, SIMAN V, SIMSCRIPT II.5 O SLAMSYSTEM, o utilizar software de simulación con un propósito específico. Los lenguajes de simulación tienen generalmente más poder y más flexibilidad que los programas específicos. Sin embargo, si el problema es susceptible de llegar a una solución con un software específico, el tiempo de desarrollo del modelo es bastante reducido. Además la mayoría de los paquetes de software con propósitos específicos, han añadido figuras o características para aumentar su flexibilidad, aunque esta flexibilidad varía sustancialmente entre ellos.

**Verificación.** La verificación pertenece a la programación de la computadora que está preparada para la simulación del modelo. ¿Está el programa funcionando correctamente? Con modelos complejos es difícil, sino imposible, traducir con éxito su integridad sin grandes inconvenientes. Si los parámetros de entrada y la estructura lógica del modelo están correctamente representados en el ordenador, la verificación ha sido completada. En la mayor parte de los casos, el sentido común es usado para completar esta fase.

**¿Validado?.** La validación es la determinación del modelo como una representación muy aproximada del sistema real. La validación es normalmente conseguida a través de la calibración del modelo, en un proceso iterativo, comparando el comportamiento del sistema actual con el modelo anterior y utilizando las discrepancias entre ellos para obtener mejoras en el modelo. Este proceso es repetido hasta que la exactitud del modelo es



considerada aceptable. En el ejemplo del banco mencionado antes, los datos fueron recogidos con respecto a la distancia de las colas de espera bajo las condiciones actuales en el momento de la toma de datos. ¿Puede el modelo de simulación repetir las medidas del sistema? La respuesta a esta pregunta es la validación de un sistema.

**Diseño experimental.** Las alternativas para ser simuladas deben ser determinadas. A menudo, la decisión concerniente a qué alternativas se utilizan para la simulación, debe ser función de pruebas que han sido completadas y analizadas. Para cada diseño de sistema que es simulado, las decisiones han de ser realizadas en lo concerniente a la magnitud del periodo de iniciación, la magnitud de las pruebas de simulación y el número de repeticiones a realizar para cada prueba.

**Realización de pruebas y su análisis.** La producción de pruebas y su análisis subsiguiente son utilizados para estimar la medida de la funcionalidad del diseño de sistema que está siendo simulado.

**¿Más pruebas?** Basándose en los análisis de las pruebas que han sido completadas, el analista determina si pruebas adicionales son necesarias y que diseño de esos experimentos adicionales han de ser seguidos.

**Documentación y realización de informes.** Hay dos tipos de documentación: programa y progreso. La documentación del programa es necesaria por numerosas razones. Si el programa va a ser utilizado otra vez por el mismo o diferente analista, será necesario entender cómo opera este. Esto dará confianza sobre el programa de modo que los usuarios del modelo y los encargados de fijar las normas, puedan tomar decisiones basadas en los análisis. También si el programa va a ser modificado por el mismo o por diferente analista, esto puede ser sustancialmente facilitado por la documentación del programa. Una experiencia con un programa inadecuadamente documentado, suele ser suficiente para convencer al analista de que esta fase es importante. Otra razón para documentar un modelo es que los usuarios del modelo pueden cambiar los parámetros del modelo cuando quieran para determinar las relaciones de los parámetros de entrada y las medidas de salida, o determinar los parámetros de entrada que “optimizan” algunas medidas de salida del proceso.

Los informes de los proyectos dan una cronología de trabajos hechos y decisiones realizadas. Esto puede probar la gran valía en mantener el proyecto en curso.

**Implementación.** El éxito de la fase de implementación depende de cómo hayan sido realizados los once pasos o fases anteriores. También es importante el nivel de implicación del usuario del modelo a la hora de la realización por parte del analista de este

modelo. Si el usuario del modelo se ha involucrado de una forma importante durante el proceso de construcción del modelo y si comprende la naturaleza del modelo y sus datos de salida, la probabilidad de una buena implementación elevada. Contrariamente, si el modelo y sus hipótesis no han sido debidamente comunicada, la implementación probablemente sufrirá de escasa validez en el proceso de simulación.

La simulación del proceso de construcción del modelo puede ser dividida en cuatro fases. La primera fase consiste en la formulación del problema y la fijación del objetivo y su diseño general. Es un periodo de descubrimiento y orientación. Es una fase difusa, los objetivos iniciales deberán ser normalmente restablecidos y el plan de proyecto original deberá ser normalmente de nuevo estudiado para su mejora. Estos replanteamientos y aclaraciones deberían ocurrir en esta fase.

La segunda fase se refiere a la construcción del modelo y a la recogida de datos e incluye las fases tres (conceptualización del modelo), cuatro (recogida de datos), cinco (traducción del modelo), seis (verificación) y siete (validación). Una continua interacción es requerida entre estas fases.

La tercera fase concierne a las pruebas del modelo. Esta contiene los pasos ocho (diseño experimental), nueve (producción de pruebas y análisis) y diez (pruebas adicionales). Esta fase debe tener un plan profundamente estudiado para la experimentación con modelos de simulación. Una simulación de un evento discreto estocástico es, en realidad, un experimento estadístico. Las variables de salida son estimadas, contiene errores aleatorios, y por lo tanto, un adecuado análisis estadístico es requerido.

La cuarta fase, implementación, contiene el paso once (documentación y realización de informes) y doce (implementación). El éxito de la implementación depende de la continua involucración del usuario del modelo y de la complementación con éxito de cada paso en el proceso. Quizás el punto más crucial en el éxito del proceso es el paso siete (validación), porque un modelo no validado va a conducir a resultados erróneos, lo cual puede ser peligroso y costoso.

### 3. Principios generales de la simulación.

Este capítulo desarrolla una línea de trabajo común para modelizar sistemas complejos, usando sistemas de simulación discretos, lo cual cubre los bloques de construcción básicos de todos los modelos de las simulaciones discretas: entidades y atributos, actividades y eventos.

En la simulación de eventos discretos un sistema es modelado en términos de su estado en cada punto del tiempo; las entidades que pasan a través del sistema; las entidades que representan sistemas de búsqueda y las actividades y eventos que son la causa del cambio de estado del sistema.

Los modelos de eventos discretos son apropiados para aquellos sistemas en los cuales cambios en el estado del sistema ocurren solo en puntos discretos durante el tiempo real.

El lenguaje de simulación y la simulación de producción son fundamentalmente paquetes para el sistema de simulación discreto. Unos pocos de esos paquetes también incluyen la capacidad de modelizar con variables continuas, en una simulación continua ideal o un modelo mixto compuesto de una simulación discreta-continua. Aquí trataremos los eventos discretos por tratarse del lenguaje utilizado por nuestra herramienta informática.

El propósito de este capítulo es introducir y explicar los conceptos y metodologías fundamentales, subrayando todos los paquetes de simulación de eventos discretos. Muchos de los paquetes utilizan diferente terminología de la utilizada aquí y muchos tienen un alto nivel de construcciones diseñadas para hacer el modelado más simple y más directo para sus aplicaciones.

El siguiente apartado cubre los principios generales y los conceptos de la simulación de eventos discretos, el algoritmo de eventos horario/tiempo y las tres vistas previas globales: el horario de los eventos, la interacción de procesos y el seguimiento de las actividades. La siguiente sección introduce alguna de las nociones de una lista de procesos, una de las más importantes metodologías usadas en software de simulación de eventos discretos.

### 3.1 Conceptos en simulación de eventos discretos.

Vamos a tratar los sistemas hipotéticos o estocástico (con la implicación del tiempo y conteniendo gran variedad de elementos aleatorios) los cuales cambian de una forma discreta

Los principales conceptos son brevemente definidos y después ilustrados con su correspondiente ejemplo:

**Sistema:** definimos por sistema una colección de entidades (ya sean trabajadores o maquinas) que interactúan juntos durante un tiempo determinado para acometer uno a varios objetivos, o metas parciales.

**Modelos:** los modelos vienen a ser básicamente una representación abstracta de un sistema real, normalmente conteniendo relaciones estructurales lógicas o matemáticas las cuales describen a un sistema en términos de estado, entidades y sus atributos generales, conjuntos, procesos de eventos de actividades y retrasos de los mismos.

**Estado del sistema:** el estado de sistema es una colección de variables que contienen toda la información necesaria para describir el sistema en cualquier momento.

**Entidades:** las entidades son cualquier objeto o componente dentro del sistema, el cual requiere representación explícita en el modelo (por ejemplo un cliente o una maquina).

**Atributos:** son las propiedades de una entidad dada (por ejemplo la prioridad de un cliente esperando).

**Lista:** la lista es una colección (permanentes o temporales) de entidades asociadas y ordenadas de alguna forma lógica (tales como todos los clientes al mismo tiempo esperando en una cola ordenados por el primero que llego, el primero al que se sirvió, o por prioridad)

**Evento:** un suceso instantáneo que cambia el estado del sistema (tal como la llegada de un nuevo cliente)

**Aviso de evento:** es una anotación de un evento que ocurre al tiempo presente o en un futuro cercano con una fecha asociada al mismo para ejecutar el evento. Como mínimo la anotación incluye el tipo de evento y el tiempo del mismo.

**Lista de eventos:** es una lista de anotaciones de eventos para eventos futuros ordenados por el tiempo en el que han ocurrido; también conocida como la lista de eventos futuros (LEF).

**Actividad:** la actividad viene es el tiempo estimado de un tramo concreto y especificado del LEF (por ejemplo tiempo de servicio o un tiempo parcial) lo cual es conocido cuando comienza (aunque puede ser definido en términos de una distribución estadística).

**Retrasos:** una duración de tiempo de un tramo o trabajo parcial no específico e indefinido el cual no es conocido hasta que termina (por ejemplo el retraso de un cliente a última hora, o el primero en salir de la línea de montaje o cuando se produce por ejemplo un cuello de botella) de lo cual dependen las futuras salidas y que no se interrumpa el flujo de trabajo sobre dicha línea.

**Registro de tiempos:** es una representación variable de tiempos simulados llamada registro de tiempos.

Diferentes lenguajes de simulación utilizan una variada terminología para el mismo o similar concepto. Por ejemplo, las listas son a veces llamadas colas, líneas de trabajo o cadenas de montaje. Las líneas de trabajo son utilizadas para abarcar tanto a entidades como a notaciones de eventos.

Las entidades en una cadena son siempre ordenadas por algún tipo de regla, tales como “first-in-first-out” (FIFO) o “last-in-first –out” (LIFO) u ordenadas por algún tipo ya sea atributo, entidad o combinación de las mismas, tales como prioridad o tiempo de entrega esperado. La lista de eventos futuros es ordenada por algún evento que haya sido anotado en la lista de eventos.

Una actividad típica representa un tiempo de servicio, un tiempo de llegada intermedio, o cualquier otro tiempo de proceso cuya duración ha sido caracterizada y definida por el modelador, la duración de una actividad podría ser especificada de varias formas:

1. De forma determinista, por ejemplo, siempre exactamente cada cinco minutos.
2. Estadísticamente, por ejemplo, como una función aleatoria cada 2, 5 o 7 con igual número de probabilidad.
3. Una función dependiente de sistemas variables y/o atributos de entidades, por ejemplo, tiempo de carga para un buque tanque como una función en donde las

variables serian el peso de carga permitida por el barco, y la media de carga en toneladas por hora.

No obstante la duración de una actividad es computable en su especificación desde el instante en que comienza.

Su duración no se ve afectada por la concurrencia de otros eventos (salvo en ciertos lenguajes de simulación, donde el modelo contiene lógicas para cancelar un evento).

Para mantener el ritmo de las actividades y el tiempo previsto para su realización, en el instante simulado en donde una actividad comienza, un registro de eventos es creado teniendo un tiempo de evento igual al tiempo de finalización de la actividad o proceso. Por ejemplo, si el tiempo simulado esperado es "registro de tiempo esperado = 100 minutos" y un tiempo de inspección de exactamente 5 minutos acaba de comenzar, entonces la anotación del evento es creada para especificar el tipo de evento (la finalización del evento de inspección) y el tiempo del evento ( $100 + 5 = 105$  minutos).

En contraste con una actividad, la duración de un retraso no es especificada por el modelador, sino que es determinada por las condiciones del sistema. Muy a menudo la duración de un retraso es medida, y es uno de los resultados deseados de una simulación. Normalmente un retraso termina cuando alguna de las condiciones lógicas de la cadena deviene verdadera o uno o más de estos eventos confluyen. Por ejemplo, el retraso de un cliente en una línea de espera puede depender del número y la duración del servicio de otros clientes que están por delante de él en la misma línea de producción, o también debido a la disponibilidad de los trabajadores o equipo en sí.

Un retraso es normalmente llamado una espera condicional, mientras que una actividad es llamada una espera incondicional.

La finalización de una actividad es un evento, a menudo denominado evento primario, que es dirigido y situado como una notación del evento de LEF (lista de eventos futuros).

Por el contrario los retrasos son dirigidos a las entidades asociadas en otras listas, quizás representando la línea de espera como una condición que permita al sistema continuar con el procesado de la entidad.

La finalización del retraso es a veces llamada un evento condicional o secundario, pero tales eventos no son representados por anotaciones de eventos, ni tampoco aparecen en la lista de eventos futuros (LEF).

Los sistemas aquí considerados son dinámicos, esto es que se actualizan y son cambiantes con el tiempo, por lo tanto, el estado del sistema, atributos de la entidad, el número de entidades activas, el contenido de cadenas de producción y las actividades y retrasos en progreso son todas funciones del tiempo y están cambiando a medida que el flujo avanza.

El tiempo en sí mismo, es representado por una variable llamada "registro de tiempo".

### **3.2 El algoritmo de eventos horario/tiempo.**

El mecanismo para controlar el tiempo avanzado de simulación garantizando que todos los eventos ocurren en un orden cronológico correcto, está basado en la lista de eventos futuros LEF.

Esta lista contiene todas las anotaciones para eventos que han sido fijados en un horario/fecha para ocurrir en un momento futuro.

Fijar y concretar un horario/fecha para un evento futuro significa fijar el instante en que la actividad comienza, su duración es computada o planificada como una muestra de una distribución estadística y el final u objetivo del evento o actividad, junto con el tiempo de su duración, es fijado en la lista de eventos futuros.

En el mundo real la mayoría de los eventos futuros no son planificados en una agenda sino que simplemente suceden, tales como averías, fallos aleatorios o llegadas de eventos aleatorias. En el modelo tales eventos aleatorios son representados por el final de una actividad la cual es representada por una distribución estadística.

Para cualquier tiempo dado  $t$ , el LEF contiene todos los eventos futuros fijados y planificados previamente y sus tiempos de eventos asociados (llamados  $t_1, t_2, \dots$ )

<i>Reloj</i>	<i>Estado del sistema</i>	<i>Entidades y atributos</i>	<i>Lista de Eventos Futuros LEF</i>
t	(x,y,z,...)		(3,t1)-Tipo de evento 3 ocurrido en tiempo t1. (1,t2)-Tipo de evento 1 ocurrido en tiempo t2.

**Interior del sistema para un tiempo t**

El LEF es ordenado por el tiempo de evento lo cual significa que el evento está acordado cronológicamente, esto es, el tiempo de evento se corresponde con la siguiente fórmula:

$$t < t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_n$$

El tiempo  $t$  es el valor del registro de eventos, el valor en el momento exacto del tiempo simulado. El evento asociado con el tiempo  $t_1$  es llamado el evento inminente, esto es, el próximo evento que ocurrirá.

Una vez que el sistema de “foto instantánea” del tiempo de simulación, “registro de eventos CLOCK =  $t$ ” ha sido actualizado, el registro avanza hasta un nuevo tiempo de simulación en el registro de eventos CLOCK =  $t_1$  y la inminente anotación de eventos es trasladada desde el LEF y el evento es ejecutado.

La ejecución del nuevo evento inminente significa que el nuevo sistema de foto instantánea para el tiempo  $t_1$  es creado en base a la antigua foto instantánea referida al tiempo anterior y la naturaleza del evento inminente.

Para el tiempo  $t_1$  el nuevo evento futuro, puede o no, ser generado; pero si lo es, este será fijado por anotaciones de eventos creadas y puestas en su posición correcta en el LEF.

Después de que un nuevo sistema de foto instantánea para el tiempo  $t_1$  haya sido actualizado, el cronometraje se avanza hasta el tiempo del nuevo evento inminente y entonces este evento será ejecutado. Este proceso se repite hasta que la simulación es finalizada.



La secuencia de acciones en las cuales un simulador (o lenguaje de simulación) debe ejecutar para adelantar el cronometraje y construir un nuevo sistema de foto instantánea, es llamado “algoritmo de eventos horario/tiempo”, cuyos pasos son desarrollados en la figura.

<i>CLOCK</i>	<i>Estado del sistema</i>	<i>Lista de eventos futuros</i>
t	(5,1,6)	(3,t1)- Tipo de evento 3 ocurrido en tiempo t1 (1,t2)-Tipo de evento 1 ocurrido en tiempo t2 (1,t3)- Tipo de evento 1 ocurrido en tiempo t3 . . . (2,tn)-Tipo de evento 2 ocurrido en tiempo tn

algoritmo de eventos horario/tiempo  
 -Paso 1. Cambiar la notificación del evento inminente (evento 3, tiempo t1) del LEF  
 -Paso 2. Avanzar el CLOCK hasta el tiempo del evento inminente (de t a t1)  
 -Paso 3. Ejecutar el evento inminente: actualizar el estado del sistema y cambiar la entidad de los atributos  
 -Paso 4. Generar los eventos futuros (si es necesario) y emplazar la notificación de eventos en el LEF  
 -Paso 5. Actualizar la distribución estadística y los contadores

Nuevo sistema foto instantáneo para el tiempo t1



<i>CLOCK</i>	<i>Estado del sistema</i>	<i>Lista de eventos futuros</i>
t1	(5,1,5)	(1,t2)- Tipo de evento 1 para el tiempo t2 (4,t*)- Tipo de evento 4 para el tiempo t* (1,t3)- Tipo de evento 1 para el tiempo t3 . . . . (2,tn)- Tipo de evento 2 para el tiempo tn

### Algoritmo de eventos

La duración y el contenido del LEF están en continuo cambio como los procesos de simulación, es por ello por lo que la dirección eficaz en simulación computacional tendrá un impacto significativo en el buen resultado del programa de ordenador que representa el modelo. La dirección de una lista es llamada lista de procesamientos. La lista de procesamientos de operaciones más importantes llevadas a cabo en el LEF son sustraídas del evento inminente, sumadas a un nuevo elemento a la lista y, ocasionalmente la sustracción de algún evento (llamado también cancelación de un evento). El evento inminente está normalmente al principio de la lista.

La suma de un nuevo evento (y cancelación de un viejo evento) requiere una búsqueda de la lista. La eficiencia de esta búsqueda depende de la organización lógica de la lista y de cómo la búsqueda es llevada a cabo.

Además para el LEF, todas las cadenas de producción en un modelo de producción son mantenidas en algún orden lógico y las operaciones de suma y sustracción de entidades desde la cadena de producción también requieren eficientes técnicas de procesamiento y creación de listas.

La sustracción y la suma de eventos desde el LEF está ilustrada en la figura anterior.

El evento 3 con tiempo de evento  $t_1$  representa la finalización de un evento de servicio. Una vez que el tiempo  $t$  del evento es inminente, es trasladado del LEF en el paso 1 (figura anterior) del "algoritmo de eventos horario/tiempo". Cuando el evento 4 (por ejemplo un evento de llegada) con tiempo de evento  $t^*$  es generado en el paso 4, la única

forma de determinar su correcta posición en el LEF es realizar una búsqueda de principio a fin.

Si  $t^* < t_2$ , la posición del evento 4 es al principio del LEF.

Si  $t_2 \leq t^* < t_3$ , la posición del evento 4 es la segunda de la lista.

Si  $t_3 \leq t^* < t_4$ , el evento 4 irá el tercero en la lista.

.....

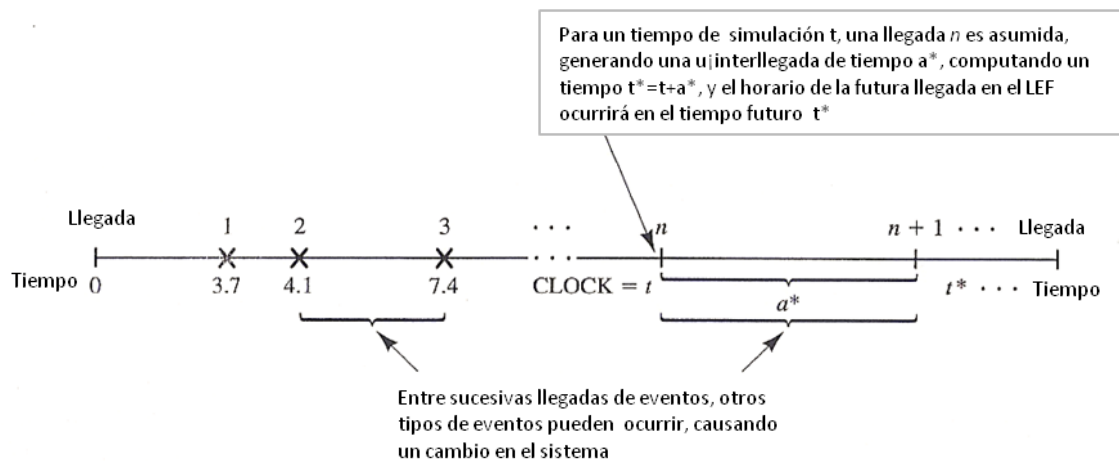
Si  $t_n \leq t^*$ , el evento 4 irá el último en la lista.

En la figura anterior ha sido asumido que  $t^*$  tuvo lugar entre  $t_2$  y  $t_3$ .

Otra forma de realizar la determinación correcta de posiciones sería empezando por el final y llegando hasta el principio. La forma menos eficiente de mantener el LEF es dejarla como un lista desordenada ( sumas puestas arbitrariamente al principio o al final) las cuales requerirán en el paso 1 de la figura una búsqueda completa de la lista para los eventos inminentes antes de cada cronometraje avanzado ( el evento inminente es el evento en el LEF con el menor tiempo de evento).

El sistema de foto instantánea para el tiempo 0 es definido por las condiciones iniciales y la generación de los también llamados “eventos exógenos, de origen externo”. Las condiciones iniciales especificadas definen el estado del sistema al tiempo 0. Por ejemplo, en la figura si  $t = 0$  entonces el estado (5,1,6) debería representar el número inicial de clientes en tres puntos diferentes en el sistema.

Un evento exógeno es un suceso “ajeno al sistema” lo cual afecta al sistema. Un ejemplo importante es una llegada a un sistema para hacer cola. Para el tiempo 0 el primer evento de llegada es generado, y la fijación del horario en el LEF es posicionada (la anotación del evento es señalada en el LEF). El tiempo de llegada intermedio es un ejemplo de una actividad. Cuando el registro de tiempo de eventos (cronometraje), avanza hasta la hora de su primera llegada, el evento de la segunda llegada es generada. Primero una hora de interllegada,  $a^*$ ; es añadido al tiempo actual,  $CLOCK = t$ ; el resultado (futuro) del tiempo de evento,  $t + a^* = t^*$ , es usado para posicionar la nueva notificación de llegada al LEF. Este método da un ejemplo de cómo los eventos futuros son generados en el paso 4 del “algoritmo de eventos horario/tiempo”. Esto se ve en la figura siguiente. Los tres primeros tiempos de interllegadas generados son 3.7, 0.4, y 3.3 unidades de tiempo. El final del intervalo de interllegada es un ejemplo de un evento primario.



### Representación del LEF

Un segundo ejemplo de cómo eventos futuros son generados (paso 4 de figura algoritmo de eventos) es dado por un evento de terminación de servicio en una simulación de cola. Cuando un cliente termina el servicio, en la hora actual,  $CLOCK = t$ , si el siguiente cliente está presente, un nuevo tiempo de servicio,  $s^*$  será generado para él. El siguiente evento de terminación será fijado en el horario para pasar a ocurrir en un tiempo futuro  $t^* = t + s^*$ , a través de dar al LEF una nueva notificación de evento de un tipo de terminación de servicio con el tiempo de evento  $t^*$ . Adicionalmente un evento de terminación de servicio será generado y se le dará una hora de evento de llegada tan pronto como llegue un servicio inactivo del grupo de servicios. Un tiempo de servicio es un ejemplo de una actividad. El servicio del principio es un evento condicional porque su ocurrencia de activación es dada por las condiciones de que el cliente presente y el servidor es disponible. La terminación del servicio es un ejemplo de evento primario. Hay que hacer notar que un evento condicional, tales como un servicio del principio, es activado por una ocurrencia de evento primario y ciertas condiciones prevalentes en el sistema. Solo los eventos primarios aparecen en la LEF.

Un tercer ejemplo importante es la generación alternativa de pruebas de tiempo para las paradas de una máquina que experimenta averías. A la hora cero, la primera prueba de tiempo será generada y un evento del fin del tiempo de prueba será fijado en el horario. Cuando un evento de fin de tiempo de prueba ocurre, un descanso es generado y un evento de fin de descanso será fijado en el horario del LEF. Cuando el  $CLOCK$  eventualmente es avanzado a la hora de este evento de fin de descanso, un tiempo de

pruebas es generado. Un evento de fin de tiempos de pruebas será fijado en el horario de la LEF. De esta manera, los tiempos de pruebas y los descansos se alternan continuamente durante la simulación. Un tiempo de pruebas y un descanso son ejemplos de actividades y un fin de tiempo de pruebas y un fin de descanso son eventos primarios. Cada simulación debe tener un evento de parada, aquí nombrado E, que define cuanto tiempo tardará la simulación. Generalmente hay dos maneras para parar una simulación:

1. A la hora cero, fijar en un horario, un evento, de parada de la simulación en un tiempo futuro especificado  $T_E$ . Entonces, antes de comenzar a simular, es conocido que la simulación se realizará a través del intervalo de tiempo  $[0, T_E]$ . Ejemplo: simular un puesto de trabajo para  $T_E=40$  horas.
2. La cantidad de tiempo que tarda  $T_E$  es determinada por la simulación. Generalmente  $T_E$  es la hora de ocurrencia de algún evento específico E. ejemplos:  $T_E$  es el tiempo de la 100ª terminación del servicio en un cierto puesto de trabajo.

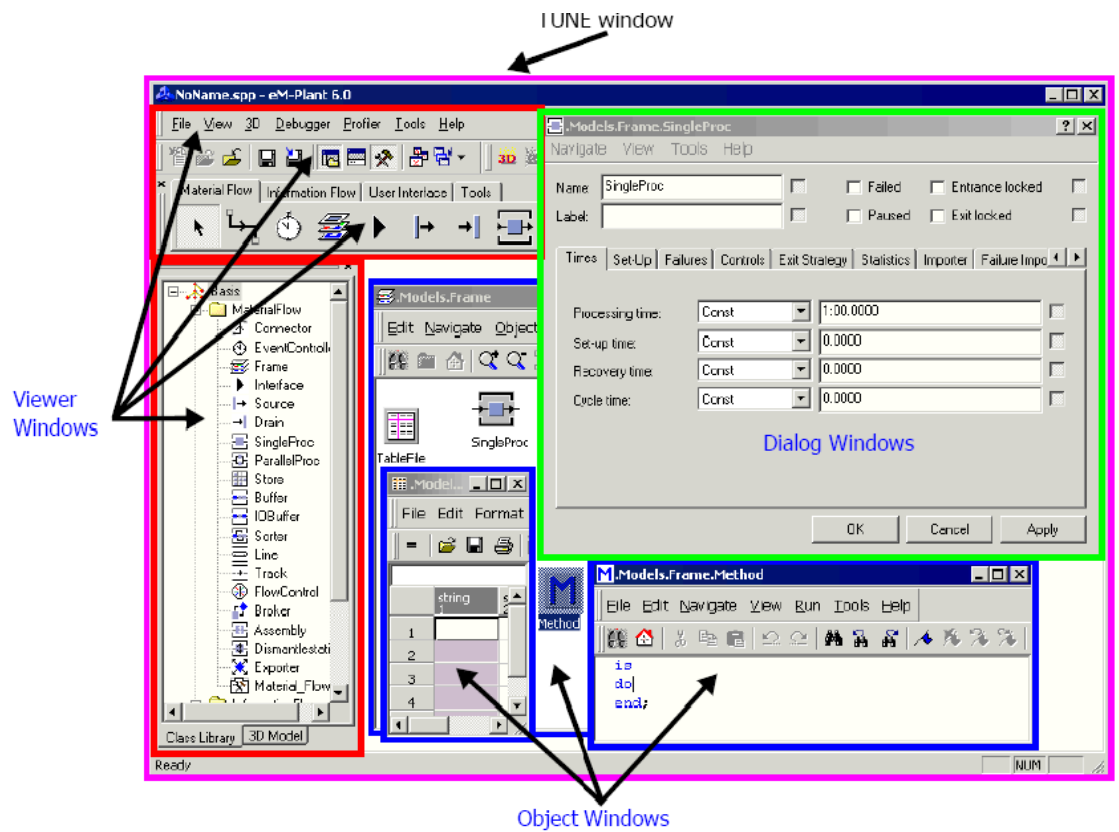
En el caso 2,  $T_E$  no se conoce de antemano. De hecho, puede ser un de los datos de mayor interés que es producido por la simulación.

## 4. Descripción de la herramienta informática.

eM-Plant es un software que permite integrar objetos, gráficos y modelos para la simulación y la visualización de sistemas y procesos productivos.

### VENTANAS

eM-Plant es una aplicación que trabaja con una interfaz multidocumentos (MDI, multiple-document interface). Esto permite mostrar en la pantalla gran cantidad de información.

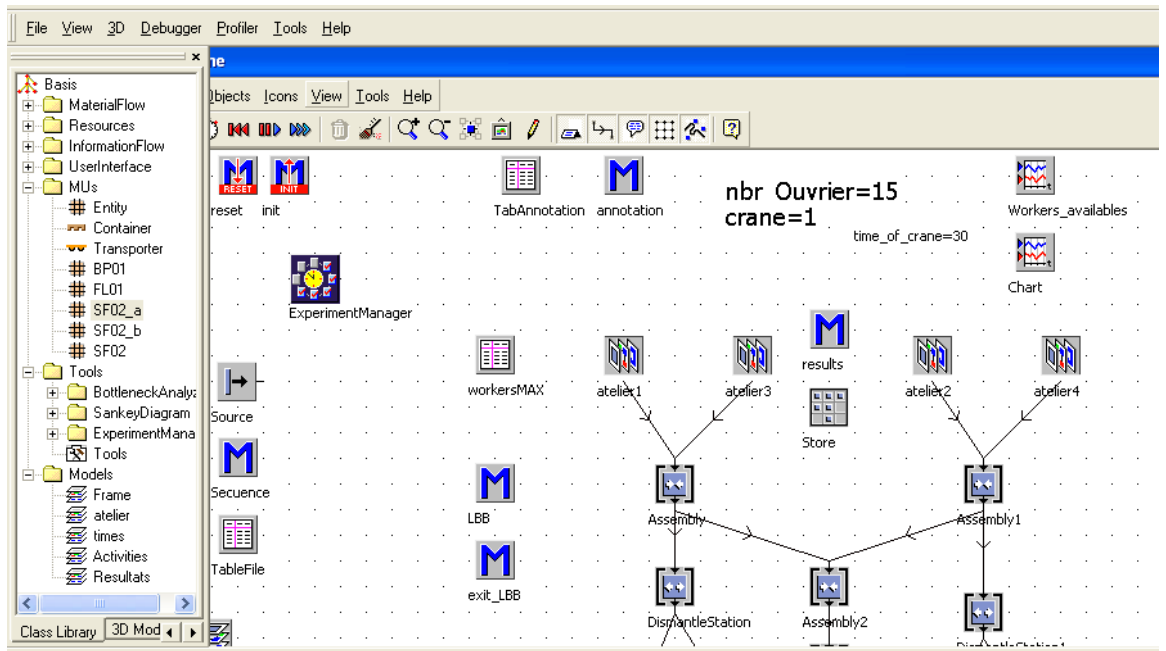


Vista general de eM-Plant

### LIBRERIA DE OBJETOS

En la librería de objetos (Class Library) tenemos todos los objetos con los que trabajar para crear los modelos utilizados para la simulación. Al insertar los objetos de la librería en la ventana de trabajo, que llamaremos a partir de ahora Frame, término utilizado por el programa para referirse a esta ventana, se crea una jerarquía entre objetos que facilita el trabajo enormemente. Esta jerarquía, denominada padres-hijos, consiste en que los objetos introducidos en cada Frame son considerados hijos de los objetos de la librería. Así, cada objeto creado a partir de un padre adquiere sus mismas características. Si cambiamos la configuración de los padres (ventana Class Library), todos aquellos objetos que hayan sido creados a partir de estos padres, cambiarán automáticamente las características que estos.

Esto es enormemente útil a la hora de realizar el modelizado de talleres o estaciones de trabajo. Supongamos por ejemplo el hecho de una superficie de trabajo con varias máquinas de las mismas características (Puestos de soldadura, tornos, fresadoras, etc.). Podemos crear un padre en la ventana Class Library con las características deseadas y posteriormente introducirlo las veces necesarias para obtener la configuración real del taller. Esto aumenta la velocidad de trabajo en tanto en cuanto, con la creación de un padre con las características generales requeridas, podemos generar multitud de hijos iguales, a los que, así mismo, podemos modificar para introducir características personalizadas a cada uno de ellos.



**Modelo dispuesto para la simulación.**

## OBJETOS

Para realizar modelización de las zonas de trabajo, disponemos de una serie de objetos, los cuales pueden representar cualquier tipo de máquina, personas, puestos de trabajo, talleres, zonas de stock, carreteras,... cualquier tipo de elemento necesario para representar la realidad.

Estos objetos son:

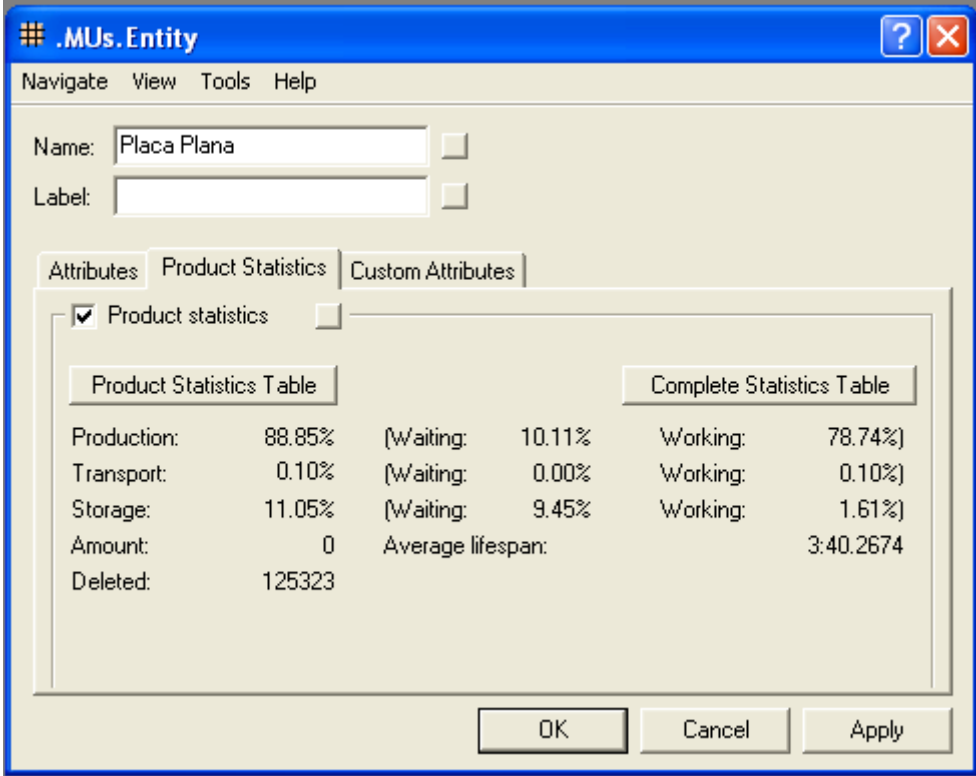
**MU's:** Se puede definir, de una forma un tanto general, como los productos producidos o a producir. Los MU's pueden adoptar el rol tanto de materia prima como de producto ya producido. Son los elementos que van pasando por los diferentes puestos de trabajo para ir adquiriendo valor añadido. Un MU puede ser, desde un tornillo que entra en un determinado puesto de trabajo para integrarse a otros MU's, hasta una plancha que, después de pasar por todos los procesos intermedios, termina convirtiéndose en un bloque. La facilidad que nos da eM-Plant para asociar elementos de su librería con elementos de la realidad se refleja claramente en este primer objeto.

Podemos definir un MU mediante sus dimensiones (parámetro asociado a otros objetos de la librería), pero es suficiente con nombrarlo para crearlo en las llamadas "Sources", que no son más que puntos de creación de MU's, que equivalen en la realidad a



almacenes, puertas de entradas en talleres o directamente suministradores de productos para nuestra empresa.

Encontramos en las propiedades de los MU's los tiempos tanto de producción, de transporte, almacenaje, tiempo de espera y de trabajo.



The screenshot shows a software window titled ".MUs.Entity" with a menu bar (Navigate, View, Tools, Help) and a name field containing "Placa Plana". The "Product Statistics" tab is active, showing a table with two columns: "Product Statistics Table" and "Complete Statistics Table". The table contains data for Production, Transport, Storage, Amount, Deleted, and Average lifespan.

Product Statistics Table		Complete Statistics Table	
Production:	88.85%	(Waiting: 10.11%	Working: 78.74%)
Transport:	0.10%	(Waiting: 0.00%	Working: 0.10%)
Storage:	11.05%	(Waiting: 9.45%	Working: 1.61%)
Amount:	0	Average lifespan:	3:40.2674
Deleted:	125323		

### Características de MU's.

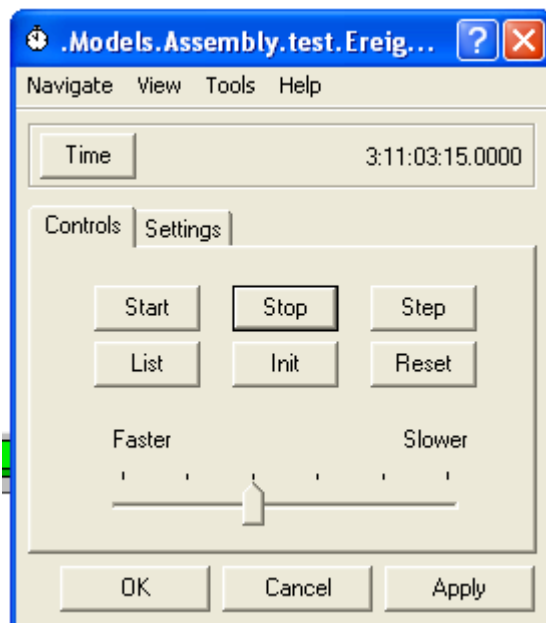
Así mismo podemos crear atributos o propiedades a los MU's. Estos atributos nos permiten decir que la pieza ha llegado a un cierto punto de fabricación o que ha pasado por un numero de máquinas concreto, o simplemente que está o no pintado. Podemos utilizar los atributos de la forma que nos resulte conveniente, ya que podemos atribuir la característica que deseemos a un atributo concreto.

También tenemos a nuestra disposición los llamados Containers, que de una forma global se pueden definir como una caja en donde podemos recopilar varios MU's. Los containers son útiles cuando necesitamos varios MU's para construir un MU de rango superior. Para tal situación, un Container repleto de los MU's necesarios entraría en el puesto de trabajo indicado y saldría como un MU único.



Cuando un MU entra en una estación de procesamiento (SingleProc), eM-Plant calcula el tiempo que tarda en el proceso y entra en ese momento en el EventController. Se puede decir que es como una línea de tiempo en donde se van insertando marcas en algunos puntos.

El EventController se mueve a través de la línea de tiempo, e interpreta los mensajes en relación a las acciones a ejecutar. Después de que el tiempo de procesamiento ha transcurrido, el EventController pasa a la estación de trabajo que tiene que iniciar una salida de un MU. El MU pasa a continuación al siguiente objeto del flujo de materiales. Una vez más, eM-Plant calcula el tiempo de salida y lo pasa al EventController. A continuación establece un marcador en la línea del tiempo donde la estación de trabajo tiene que mover el Mu a la siguiente estación. EM-Plant repite este proceso de forma cíclica para todos los MU's situados en el modelo de simulación.



**EventController**

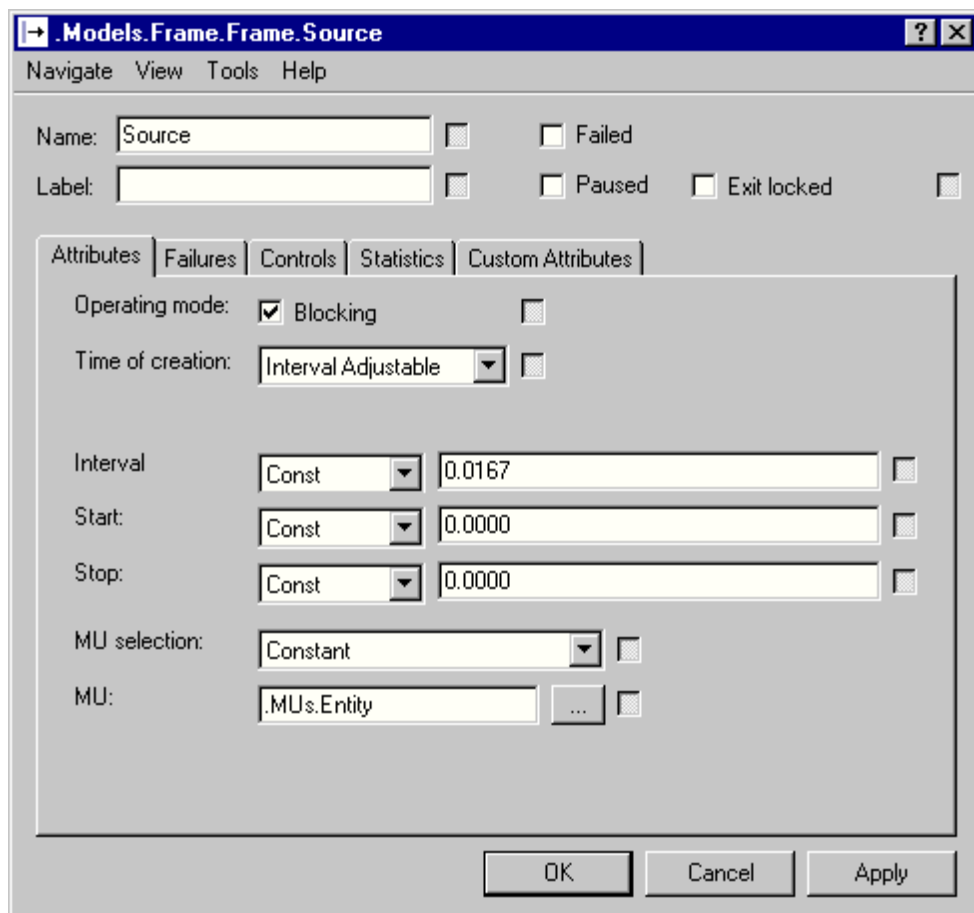
Podemos definir la duración de la simulación, por ejemplo 10 días, o desde una fecha determinada a otra, o bien dejar avanzar la simulación para saber cuál es el tiempo total en realizar un determinado hito. El tiempo de la figura se mide, de izquierda a derecha, en días, horas, minutos, segundos y fracciones de segundo.

Source 

Las Sources o fuentes son las encargadas de hacer llegar a la línea de simulación los MU's necesarios para realizar las operaciones.

Las Sources tienen una capacidad de producción unitaria y no consumen tiempo de la simulación al producir los MU's. Tienen la capacidad de producir diferentes tipos de MU's en una secuencia cíclica o en una secuencia mixta. Se pueden establecer procedimientos para determinar los tiempos entre generación, así como para determinar los tipos de MU's que se vayan a producir.

Podemos seleccionar el intervalo de entrada de los MU, que puede ser constante, definido por el usuario, estadístico, según una gran multitud de distribuciones estadísticas o mediante fórmulas (definidas por el usuario).

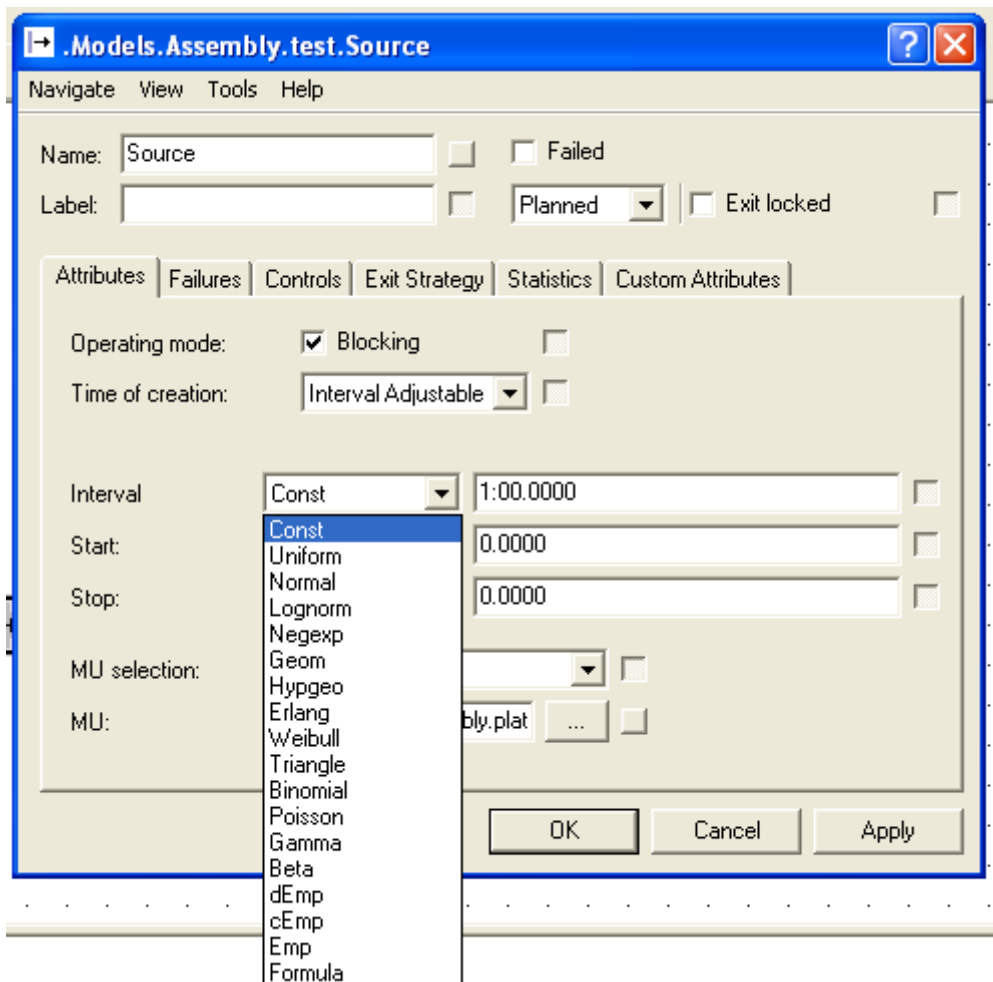


**Características de las Sources.**


También podemos definir la acción a realizar cuando un MU no es capaz de moverse al punto de procesado al que está conectada la fuente.

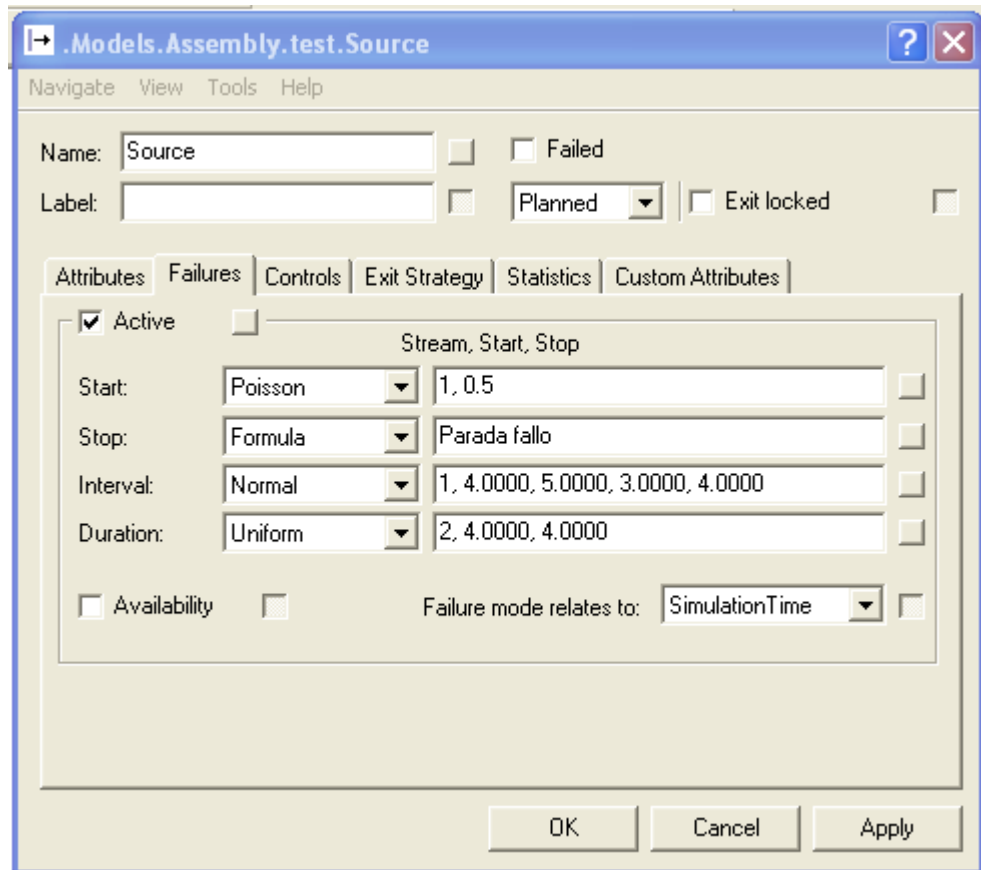
También se pueden definir los tiempos de fallo de la fuente. Estos tiempos corresponden en la realidad con tiempos de averías, mantenimiento, retardo en la entrega de piezas u otros semejantes. Como se observa en la figura, para definir el tiempo entre fallos podemos recurrir a tiempos fijos, funciones estadísticas o fórmulas. Para poder reflejar con cierta exactitud los tiempos entre fallos, es necesario disponer de un historial de tiempos de reparaciones, mantenimiento, retrasos en la entrega de piezas por parte del proveedor, o similar. Cuanto más amplia sea la información disponible en este aspecto, nos resultará más fácil de asociar este tiempo a una fórmula o función estadística.

Utilizamos la fuente para crear partes y piezas que se mueven a través de las instalaciones para ser procesadas por las diferentes estaciones de trabajo.



**Diferentes distribuciones de tiempos.**

Como antítesis a la Source tenemos el objeto llamado Drain,  que podemos definirlo como un desagüe por donde salen los MU's al final de la simulación. La Drain se puede interpretar como la salida del taller, una zona de stock, o simplemente como el final de la simulación.



**Cuadro de tiempos.**

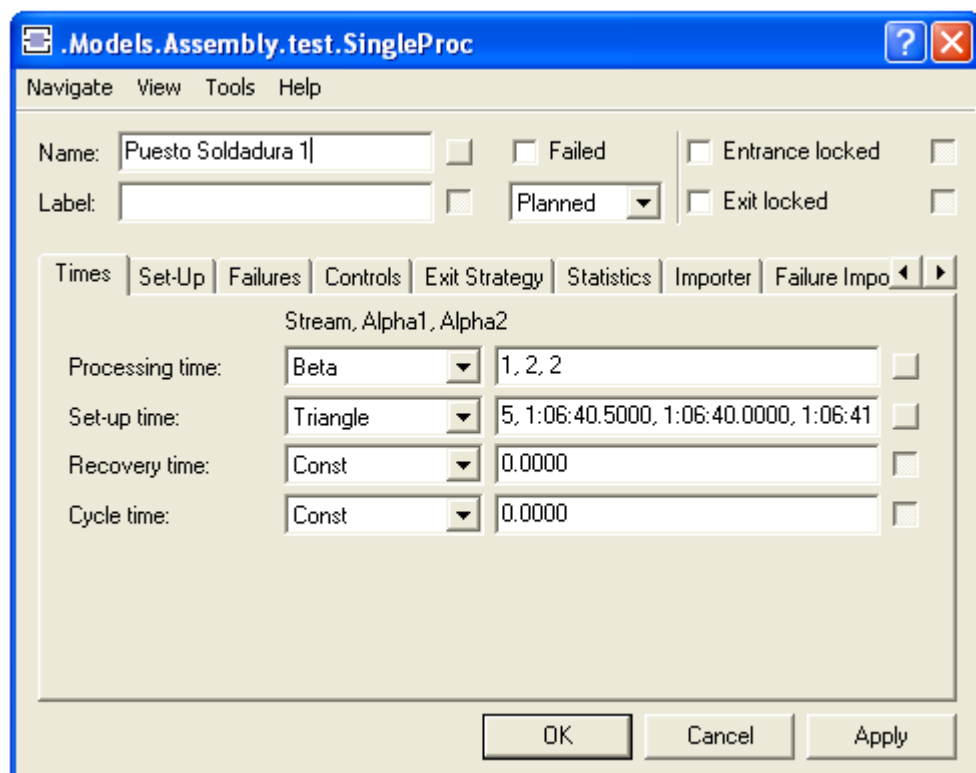
UNIDADES PRODUCTIVAS (SingleProc) 

Una unidad productiva o SingleProc es una estación para procesar MU's. La SingleProc recibe un MU de su predecesor, lo procesa y lo transmite a su sucesor. Desde el punto de vista del programa, es el lugar donde los MU's consumen tiempo en la simulación.

Desde el punto de vista de la realidad, una SingleProc puede ser una máquina, un puesto de trabajo, un taller, una cadena de montaje, un proveedor, etc. Realmente

podemos modelizar cualquier elemento que requiera una consumición de tiempo mediante las SingleProc. También, y desde una óptica más destinada a puestos de trabajo en talleres o similares, se puede asociar a los SingleProc una cantidad de recursos, tanto materiales como personales, necesarios para que los MU's crezcan en valor añadido al pasar por los SingleProc. Un ejemplo claro sería un puesto de soldadura, que requiera a un trabajador y a los consumibles de soldar. El SingleProc que represente ese puesto estará asociado a un obrero y a unos recursos. Una vez la simulación en marcha, el SingleProc buscará dichos recursos y si no están disponibles el MU no podrá pasar a través de él si no se cumple la condición de que el trabajador está en la SingleProc y los recursos están disponibles.

Cuando un MU está situado en la SingleProc, esta no recibe más MU hasta que no se desaloje la estación de procesado. Un MU solo puede entrar cuando la SingleProc está libre, es decir, ningún otro MU se encuentre en ella

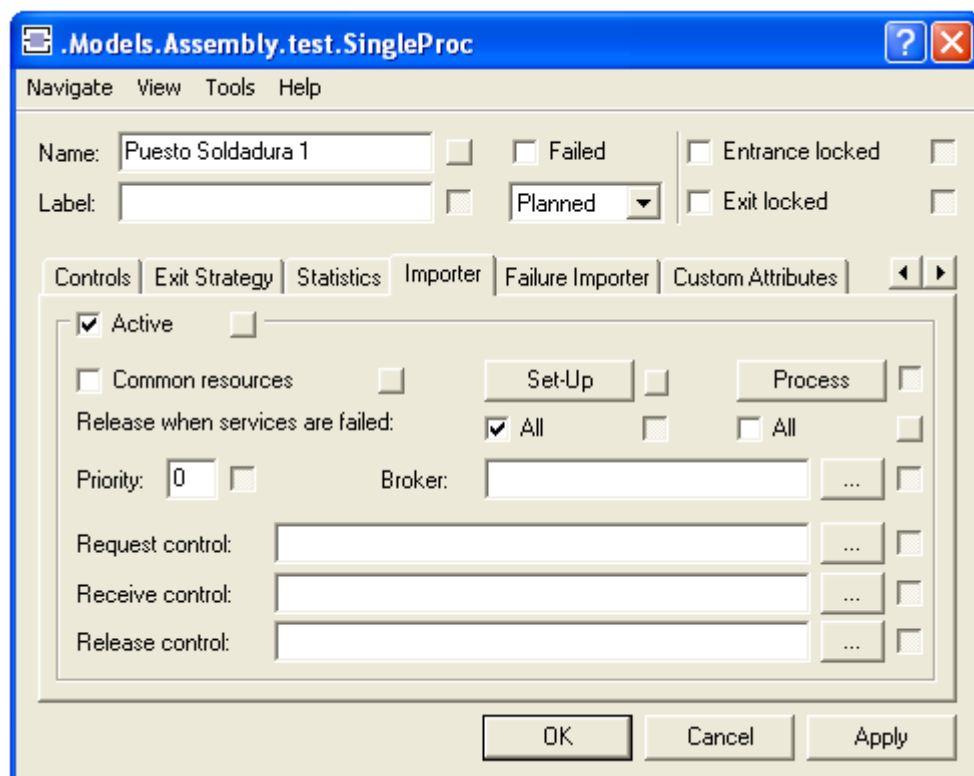


**Características de SingleProc.**

Al igual que con las Sources, podemos ajustar los tiempos de producción de las SingleProc, en donde el Processing time es el tiempo de procesado de los MU's. Este

tiempo puede ser constante, seguir una función estadística, estar en función del tipo de MU que llegue al SingleProc o seguir una fórmula creada por el usuario. El Set-up time indica el tiempo de preparación necesario antes de que empiece a descontarse el Processing time. Este tiempo puede interpretarse como tiempo de cambio de herramientas, o el tiempo de poner los consumibles en un puesto de soldadura, o algo similar si hablamos de un puesto de taller. En las SingleProc también tenemos la posibilidad de establecer un tiempo de fallo como en las Sources, con los mismos parámetros que en aquellas y con las mismas interpretaciones físicas, a saber, tiempo de mantenimiento, fallos, falta de material, etc.




Respecto a los recursos necesarios para que el puesto de trabajo haga su tarea, podemos distinguir los necesarios para el Set-Up y los necesarios para el proceso. En el cuadro de dialogo siguiente se muestran los distintos parámetros que rigen la importación de dichos recursos. Asi mismo se establece una prioridad, la cual indica que si dos SingleProc tienen necesidad de un mismo recurso al mismo tiempo, la que tenga una prioridad mayor será quien se haga cargo de ellos.




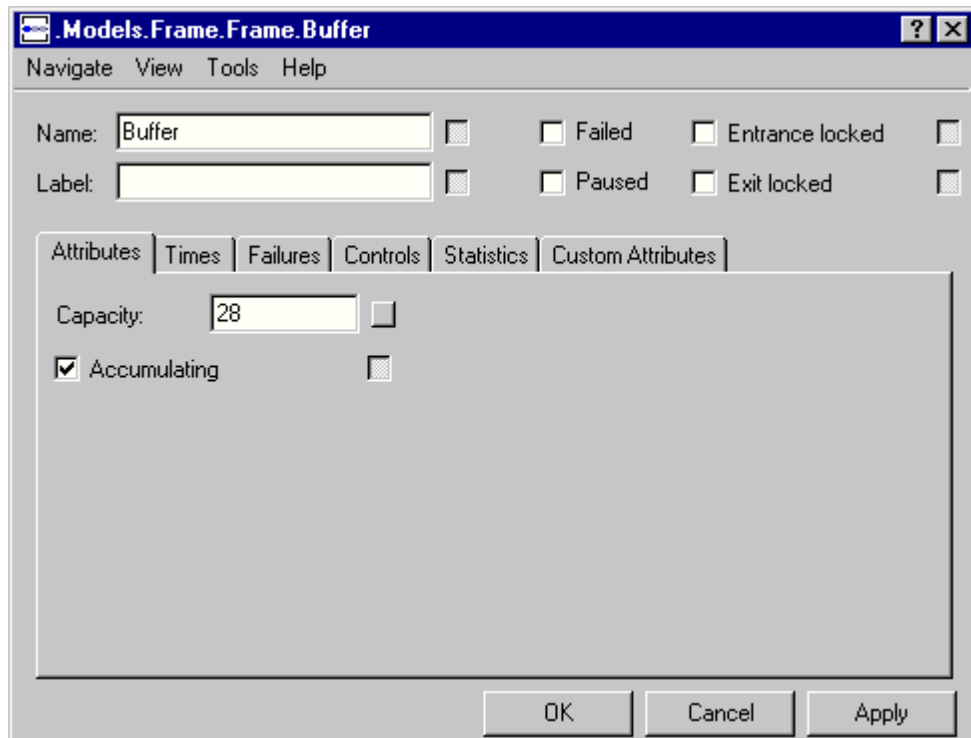
**Cuadro de recursos de SingleProc.**



Como se puede observar, somos capaces de modelar prácticamente cualquier proceso productivo, sus tiempos, sus necesidades, sus fallos y mantenimientos, debido a la amplitud de parámetros y variables que nos permite utilizar el programa.

También tenemos a nuestra disposición otros objetos de para la representación de la simulación como son las ParallelProc  , que a grandes rasgos son dos SingleProc en paralelo, las puestos Assembly, que son capaces de recibir dos MU's a la entrada y hacer salir solo uno. Los puestos Assembly  son estaciones de montaje en donde con varios MU's procesados juntos, obtenemos un solo MU de rango superior. Otro objeto de procesado es el DismantleStation  , que hace lo inverso a puesto Assembly, es decir, en la entrada solo recibe un MU, y a la salida envía dos o más.

El PlaceBuffer  es un objeto que integra varias estaciones, dispuestas en fila, una detrás de otra. Los MU's que entran en el PlaceBuffer tienen que avanzar de estación en estación, y solo pueden abandonar el PlaceBuffer después de haber pasado por la última estación.



#### Características de Buffer.

El PlaceBuffer se suele colocar a la entrada de las SingleProc para representar la zona de stock antes del puesto de trabajo, ya que las SingleProc solo aceptan un MU a la vez. También es habitual colocarlo a la salida de forma que represente una zona de stock al final del SingleProc.



Buffer

EM-Plant cuenta también con el objeto Buffer, que cuenta con un conjunto reducido de funciones, pero es más rápido.

El Buffer mejora el rendimiento, en comparación con el PlaceBuffer, cuando un modelo de de simulación posee un gran número de MU's.

El Buffer nos permite seleccionar la secuencia de salida de los MU's. Tenemos dos posibles opciones:

- Poner los MU's en cola utilizando la estrategia FIFO (primero en entrar, primero en salir).

-Apilar los MU's siguiendo la estrategia FILO (último en entrar, primero en salir).

El Buffer mejora el rendimiento cuando se exige un modelo con gran capacidad, que no exige las funciones avanzadas del PlaceBuffer.

Otros objetos de interés son:

Stores, que son lugares de almacenamiento de MU's.

Lines, que representan rutas de comunicación y carreteras. En el cuadro de dialogo de Lines, tenemos diferentes variables para modelar las rutas reales, tales como velocidad y longitud de las zonas.

WorkPlace, que son los puestos de los trabajadores dentro de las estaciones de trabajo. Las Workplace están asociadas a Brokers, que son los encargados de gestionar los recursos de los que se dispone en la simulación, y a los workers, que son trabajadores propiamente dichos.

Existen multitud de otros objetos tanto para realizar la modelización de las actividades a realizar, como para la simulación en sí misma, y para la visualización de los resultados. El objeto de este capítulo no es tanto describir en profundidad el programa utilizado, sino dar una idea general de sus capacidades a la hora de proceder a la simulación de la producción.

A continuación se procederá a describir el objeto más importante de los que integran el programa. "Method".

Los métodos no son más que lugares dentro de los cuales podemos modificar el código de programación del programa. En efecto, todas las funciones de todos los objetos que disponemos, tienen un comando de entrada que podemos utilizar para "personalizar" las acciones que se llevan a cabo.

Podemos realizar desde una pequeña acción como cambiar el tamaño de visualización de los MU's al pasar por un determinado punto, hasta enlazar varios métodos entre sí para realizar acciones muy complejas, como puedan ser modificar las propiedades de un puesto de control en función de que se realice una u otra acción en una Frame diferente.

A continuación se muestra un ejemplo de un método muy simple que inserta dos objetos en la Frame1.

```
Example: -- the method inserts two objects into Frame1
is
obj : object;
do -- creates a track and places a transporter onto it
obj := .Materialflow.track.createObject(.frame1,10,30);
.MUs.transporter.create(obj); -- creates a stack file
obj := .Informationflow.stackFile.createObject(.frame1,100,100);

end;
```

Los Métodos son lanzados por los MU's al pasar por puntos concretos de la simulación, por ejemplo a la salida de un determinado puesto de trabajo, o al pasar un determinado tiempo desde que el MU alcanza un hito, por ejemplo desde que entró en la zona de store, o similar.

## 5. Modelizado.

A continuación se va a detallar el proceso de modelización y de simulación de las zonas de trabajo, y se explicarán las pautas adoptadas, así como las dificultades que se han presentado a la hora de realizarlo.

### 5.1 Descripción del modelo.

El modelo desarrollado para realizar la simulación es el mostrado en los siguientes esquemas. Para explicarlo realizaremos el proceso inverso a la construcción, iremos desde el producto final hasta los elementos primarios.

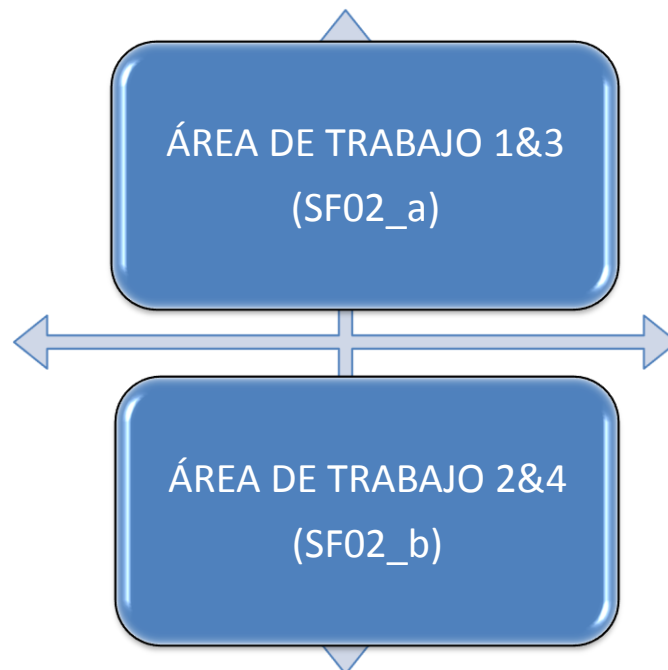
Para realizar el bloque final, denominado SF02, es necesario ensamblar los sub-bloques SF02\_a y SF02\_b, y para realizar estos sub-bloques necesitamos los paneles BP01\_01 y FL01\_01 (que unidos formarán el sub-bloque SF02\_a) y BP01\_02 unido a FL01\_02 (que formarán el sub-bloque SF02\_b).

Para cada uno de estos productos tenemos unas necesidades de espacio diferentes. En primer lugar, debemos señalar que el hall de trabajo está compuesto por cuatro zonas de construcción, independientes entre sí, con dos denominadores comunes, una grúa y los trabajadores. Cada trabajador puede desplazarse a cualquier zona de trabajo. Cada zona de trabajo dispone de las estaciones de trabajo necesarias para realizar todas las fases de fabricación.

Para realizar los cuatro paneles iniciales, necesitamos un área de trabajo para cada una de ellas, como se muestra en la figura.

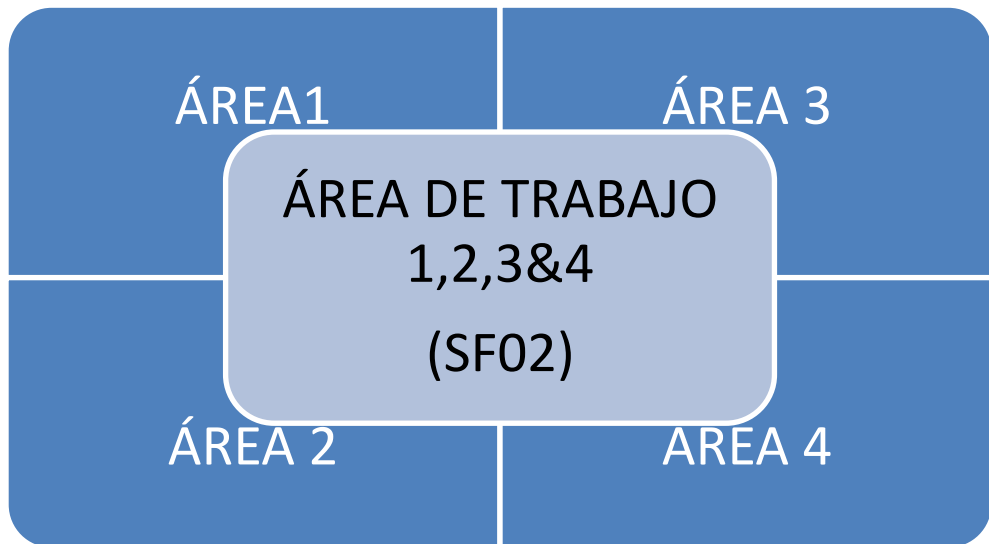


Posteriormente, una vez que los paneles están fabricados, para ensamblarlos entre si y formar los sub-bloques, necesitamos un espacio mayor. Por ello las áreas de trabajo 1 y 3 devienen en una sola área al igual que la 2 y la 4. En cada una de ellas se fabricarán los sub-bloques SF02\_a y SF02\_b. En este caso, y como se explicará más adelante, a nivel de la simulación se ha optado por tener la posibilidad de trabajar en paralelo dentro de las nuevas áreas de trabajo.



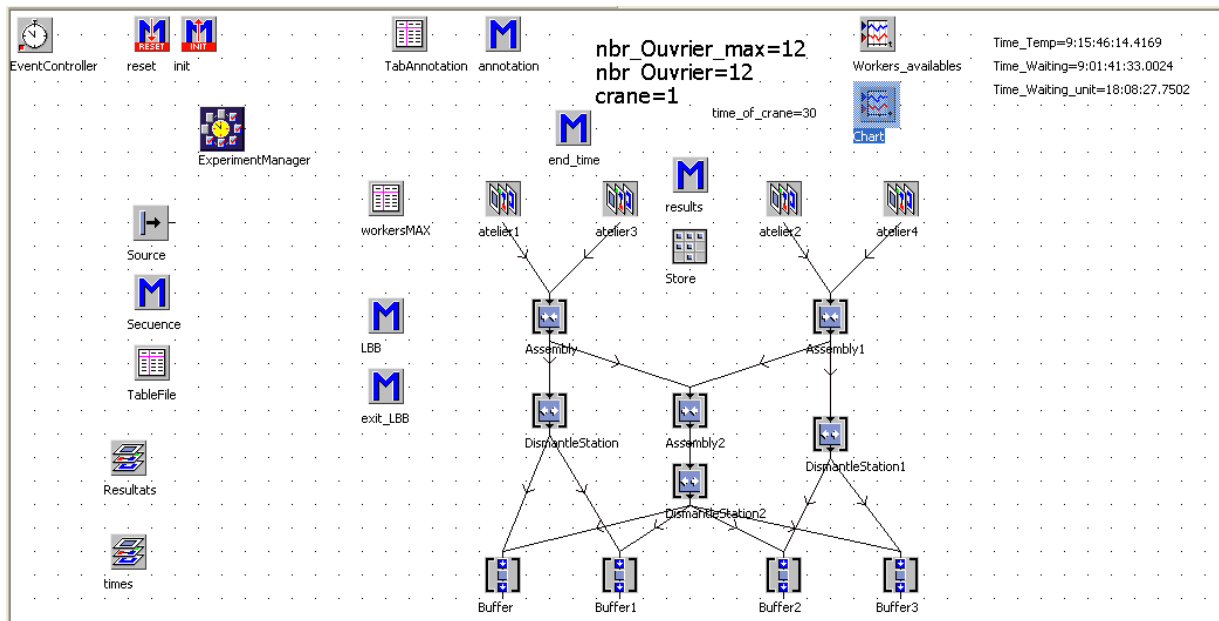
Cuando los sub-bloques están contruidos, pasamos a la siguiente fase, que es el ensamblaje de estos dos sub-bloques para formar el bloque final SF02.

Para ello, y como se realizó anteriormente, las zonas de trabajo se unifican en una sola para realizar el trabajo.



## 5.2 Descripción de las Frames.

Las Frames es el objeto básico, que nos permite introducir en él otros objetos que a su vez definirán la estructura deseada, tal como un taller, un área de trabajo, una máquina, etc. Es necesaria una Frame al menos para que exista un modelo de simulación.



En la Frame principal tenemos todos los objetos y el resto de Frames que forman el modelo. En ella encontramos:

- EventController, que es el elemento encargado de calcular el tiempo de la simulación y coordinar los diferentes acontecimientos que tienen lugar en la simulación. Es necesario un EventController para poder realizar la simulación.
- Source, permite crear entidades elementales llamadas MU's-unidades móviles. Estos objetos permiten representar todas las unidades móviles dentro del taller, ya sean productos fabricados, palets o incluso vehículos de transporte. Son divididos en tres tipos de objetos diferentes: las "entity" (unidad simple sin propiedad particular), los "containers" (unidad simple que puede contener objetos entity) y los "transporter" (objetos que presentan la propiedad de poder desplazarse de manera autónoma). En nuestro modelo de simulación, solo las "entity" serán utilizadas. Algunos atributos pueden ser añadidos a cada MU – como por ejemplo un atributo peso, color, etc. En el modelo recreado, estos MU's poseen los atributos *Bucle* y *Pass*. Estos atributos son necesarios para que el flujo de materiales realice el camino deseado
- Tablas: en la Frame principal tenemos varias tablas:
  - Tablfile nos define el nombre, tipo y número de MU's generados por la Source.



- workersMAX que define el número máximo de trabajadores en cada puesto de trabajo en función del tipo de producto a fabricar y que podemos modificar para generar diferentes escenarios.
- tabAnnotation, que registra los finales de construcción de cada pieza realizada.
- Frames de áreas de trabajo. Existen cuatro frames, llamadas atelier1, atelier2, atelier3 y atelier4 que representan las 4 áreas de trabajo anteriormente descritas. Dentro de cada una de ellas se modelizan los puestos de trabajo necesarios para realizar las actividades que conforman la construcción de las piezas. Están conectadas entre sí por una serie de estaciones auxiliares para representar la unión temporal de estas áreas para la segunda y tercera fase de la construcción.
- También se dispone de dos frames auxiliares, dentro de las cuales podemos visualizar resultados parciales agrupados por áreas de trabajo y estaciones de trabajo, y también podemos modificar los tiempos de horas/hombre para cada actividad.
- Store: este es el punto final de la simulación. Una vez las piezas lleguen aquí, la construcción del bloque se dará por terminada.
- Métodos: permite introducir líneas de comando en el programa para obtener mayor libertad en la modelización. La sintaxis de programación es propia al programa eM-Plant, llamada SimTalk. En la frame principal tenemos 7 métodos que realizan diversas acciones. El método "Init" inicializa la simulación dando el valor inicial de "estación en servicio" a todos los puestos de trabajo. El método "Secuence" envía cada MU generado por la source al área de trabajo (en el modelo se llaman atelier) que le corresponde. El método "LBB" ensambla las piezas para formar los sub-bloques y el bloque final. El resto de métodos realizan actividades auxiliares para la toma de resultados.

```

--lo lanza el BBfinishing
is
do
  if Assembly.empty and (@.name=="BP01_01" or @.name=="FL01_01") then
    if Assembly.empty then
      Assembly.newMU:".MUs.SFO2_a";
    end;

  elseif Assembly1.empty and (@.name=="BP01_02" or @.name=="FL01_02") then
    if Assembly1.empty then
      Assembly1.newMU:".MUs.SFO2_b";
    end;

  elseif assembly.empty and @.name=="SFO2_a" then
    if assembly.empty then
      Assembly.newMU:".MUs.SFO2";
    end;

  elseif assembly1.empty and @.name=="SFO2_b" then
    if assembly1.empty then
      Assembly1.newMU:".MUs.SFO2";
    end;

  elseif ?.name=="BBoutfitting" and @.name=="SFO2" then
    ?.~.BBOutfitting.cont.move(Store);

  /*elseif (@.name=="SFO2_a" or @.name=="SFO2_b") then
    if (Assembly.empty or Assembly1.empty) then
      Assembly.newMU:".MUs.SFO2";
      Assembly1.newMU:".mus.sf02";
    end;*/

    --messagebox("!Erreur dans le metod LBB",30,30);
    -- La 2ème pièce arrive => on ne fait rien

end.

```

### Ejemplo de un Método

En la frame principal también tenemos el número máximo de obreros del que se va a disponer, y la grúa, común para todas las áreas de trabajo. Estos elementos se han representados con los objetos denominados Variable, que no son más que un número que va cambiando en función de la activación de diferentes métodos. Más adelante se explicará la adopción de este objeto para representar trabajadores, ya que es el objeto más característico de la simulación y el que más dificultades ha representado.

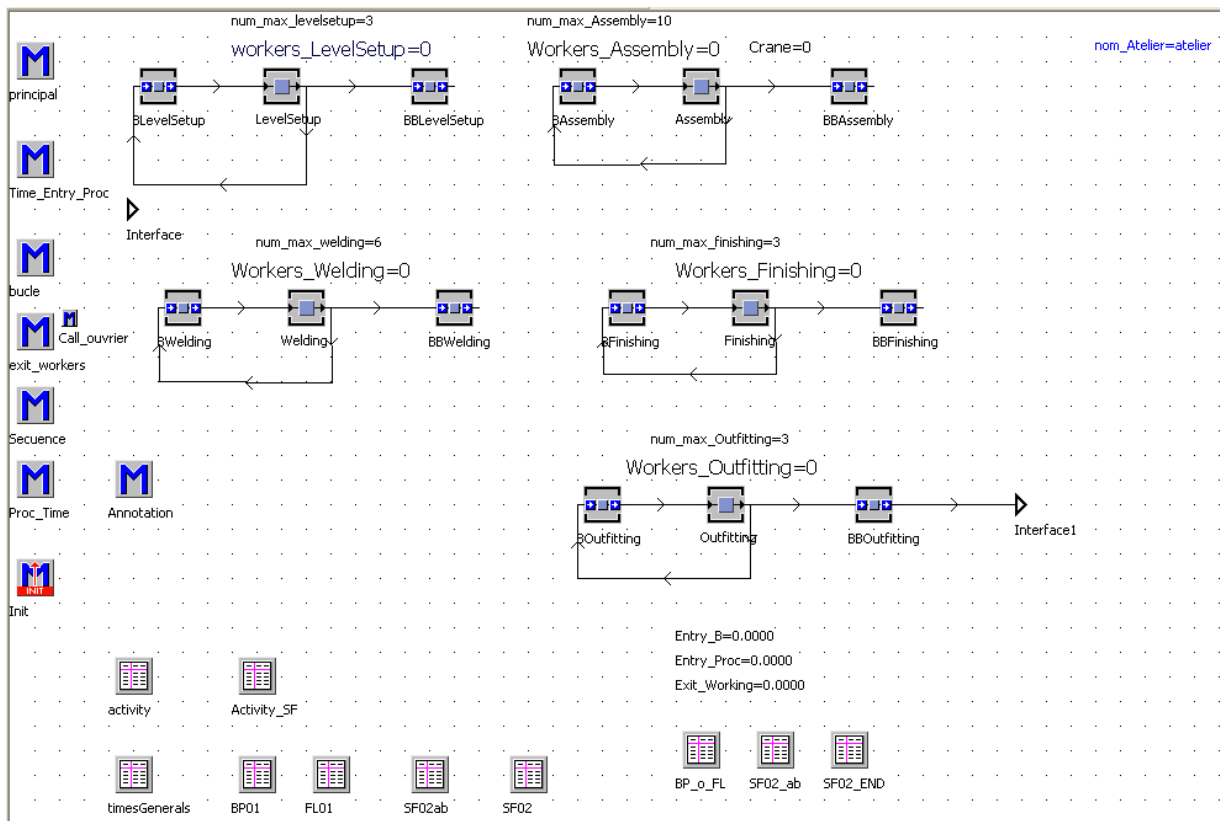
Podemos observar así mismo, una vez realizada la simulación, el tiempo de espera total y el tiempo de espera por unidad de trabajador.

### 5.3 Áreas de trabajo.

En las cuatro áreas de trabajo, llamadas atelier, es donde se encuentran representadas las estaciones de trabajo para realizar todas las actividades.

Desde el punto de vista de la herramienta informática, estas áreas son frames, con un padre común (atelier) lo cual quiere decir que una vez que hemos creado el padre con las características deseadas, los hijos se crearán con las mismas características. En nuestro caso esto representa una ganancia de tiempo nada despreciable, al disponer nuestro modelo de 4 de dichas áreas.

Como ya hemos dicho, las áreas de trabajo son elementos frame dentro de la frame principal. Dentro de las áreas de trabajo encontramos las distintas estaciones de trabajo por las que deberán pasar las piezas en curso de fabricación para ir ganando valor añadido hasta completarse enteramente.



Área de trabajo general

Las estaciones de trabajo son estaciones de procesado (SingleProc) con puestos de espera (Buffer) tanto a la entrada como a la salida. Las estaciones de trabajo tienen un bucle cerrado en su interior para realizar los distintos pasos.

- SingleProc: permite representar cualquier máquina que sea capaz de tratar una sola pieza en cada instante. Esta máquina puede ser configurada introduciendo diferentes parámetros: tiempo de procesado, tiempo de preparación, tiempo de reparación de la máquina, tiempo en el cual la máquina está disponible, frecuencia de aparición de averías, etc.... Cada uno de estos tiempos puede estar asociado a una distribución: normal, uniforme, logarítmica, de Poisson Gamma, Beta, etc.
- Buffer: Este objeto permite generar las filas de espera que se crearán delante de otros objetos. Posee igualmente una capacidad limitada. Esto crea una zona de tapón que representa un tiempo de pasada obligatorio antes de continuar el proceso de fabricación. Este tiempo puede evidentemente estar ligado a cualquier tipo de distribución.

En nuestro modelo, las estaciones de trabajo son estaciones de procesado (SingleProc) con puestos de espera (Buffer) tanto a la entrada como a la salida. Las estaciones de trabajo tienen un bucle cerrado en su interior para realizar diferentes pasadas, estando dividida una operación en múltiples sub-pasadas.

Tipo	Paso	Actividad
SF02	1	Level setup
SF02	2	Assembly
SF02	3	Welding
SF02	4	Finishing
SF02	5	Outfitting (pipes, pumps)

FL01	1	Level setup
FL01	2	Assembly
FL01	3	Welding
FL01	4	Finishing
FL01	5	Outfitting (pipes)
FL01	6	Outfitting (accessories)

BP01	1	Level setup
BP01	2	Assembly
BP01	3	Welding
BP01	4	Finishing
BP01	5	Outfitting
BP01	6	Outfitting (accessories)

Para la consecución del bloque de pantoque necesitamos una serie de piezas intermedias que se irán ensamblando entre sí para ir formando elementos de mayor valor añadido, hasta alcanzar el objetivo del bloque de pantoque. Estas piezas intermedias tienen una secuencia de construcción intrínseca a su propia construcción y a la vez una secuencia de ensamblaje global para alcanzar el bloque final.

## 5.4 Funcionamiento de las aéreas de trabajo.

En cada área de trabajo (frames “atelier” en nuestra simulación), existen cinco puestos de trabajo, a saber: *Level Setup*, *Assembly* (en este puesto se realizará tanto los posicionamientos con grúa y sin ella), *Welding*, *Finishing* y *Outfitting*. Cada uno de ellos está compuesto por una estación de procesado (SingleProc) y dos puestos de espera, uno a la entrada y otro a la salida (Buffer). Las piezas entran en el área de trabajo que les corresponde y realizan toda la secuencia de montaje en el orden preestablecido. La simulación se ha implementado de forma que sea posible cambiar la cantidad y el orden de los trabajos con tan solo el cambio de una tabla de texto.

Cada vez que las piezas entran en una estación de trabajo, deben llamar a los trabajadores para poder iniciar el proceso.

Los trabajadores se encuentran esperando en una zona común, e irán pasando de un área a otra y de una estación de trabajo a otra según las piezas vayan avanzando.

El número total de trabajadores es una variable que nosotros introducimos al inicio de la simulación. De hecho se puede considerar que esta simulación tiene como objetivo principal estudiar la influencia del número de trabajadores en el tiempo total de producción.

Cada puesto de trabajo tiene establecido al inicio de la simulación un número máximo de trabajadores en función del tipo de pieza que procese. De nuevo, se ha implementado el modelo para poder modificar este número máximo de trabajadores en cada puesto de trabajo (en nuestro caso viene dado en los términos del estudio Marstruc).

Cuando las piezas entran en el puesto de trabajo, la simulación busca en la variable principal “número de trabajadores” la cantidad de trabajadores máxima impuesta para esa pieza. Si no están disponibles recluta al número máximo de trabajadores que estén esperando en ese momento (el número mínimo de trabajadores para iniciar cualquier

proceso de trabajo es de dos). Cuando no hay trabajadores disponibles para comenzar la operación, la entrada al puesto de trabajo se cierra y la pieza espera en el buffer, hasta que existen al menos dos trabajadores para comenzar la operación.

Cuando existe más de una estación de trabajo en espera de trabajadores, el orden de preferencia a la hora de reclutar trabajadores es FIFO (First in, First out), es decir, el primero que espera es el primero que recluta sus trabajadores necesarios.

Cuando en el puesto de trabajo Assembly la operación requiere la utilización de la grúa, la simulación busca en la Frame principal si la grúa está disponible y si existen al menos dos obreros. Si no se cumple alguna de esas dos condiciones, la entrada al proceso se cierra y la pieza espera hasta que ambas condiciones se cumplan al mismo tiempo.

## 5.5 Secuencias de montaje.

Para la realización de las piezas, cada componente debe realizar una serie de actividades en una secuencia preestablecida. También se asociará cada componente con un área de trabajo.

La pieza BP01\_01 es construida en el área 1 y la pieza BP01\_02 en el área 2. Para ambas piezas, BP01\_01 y BP01\_02, la secuencia de construcción es la siguiente:

Bloque	Paso	Actividad
<b>BP01_01</b>	1	Level setup
PA14_01	2a_1	Assembly with crane (first block positioning)
SA26_01	2a_2	Assembly with crane
SA26_01	2b_2	Assembly without crane
SA26_01	3_2	Welding
SA26_02	2a_3	Assembly with crane
SA26_02	2b_3	Assembly without crane
SA26_02	3_3	Welding
SA26_03	2a_4	Assembly with crane
SA26_03	2b_4	Assembly without crane
SA26_03	3_4	Welding
SA26_04	2a_5	Assembly with crane
SA26_04	2b_5	Assembly without crane
SA26_04	3_5	Welding
SA26_05	2a_6	Assembly with crane
SA26_05	2b_6	Assembly without crane
SA26_05	3_6	Welding
SA26_06	2a_7	Assembly with crane
SA26_06	2b_7	Assembly without crane

SA26_06	3_7	Welding
SA26_07	2a_8	Assembly with crane
SA26_07	2b_8	Assembly without crane
SA26_07	3_8	Welding
SA26_08	2a_9	Assembly with crane
SA26_08	2b_9	Assembly without crane
SA26_08	3_9	Welding
SA26_09	2a_10	Assembly with crane
SA26_09	2b_10	Assembly without crane
SA26_09	3_10	Welding
SA26_10	2a_11	Assembly with crane
SA26_10	2b_11	Assembly without crane
SA26_10	3_11	Welding
SA26_11	2a_12	Assembly with crane
SA26_11	2b_12	Assembly without crane
SA26_11	3_12	Welding
SA26_12	2a_13	Assembly with crane
SA26_12	2b_13	Assembly without crane
SA26_12	3_13	Welding
SA26_13	2a_14	Assembly with crane
SA26_13	2b_14	Assembly without crane
SA26_13	3_14	Welding
SA26_14	2a_15	Assembly with crane
SA26_14	2b_15	Assembly without crane
SA26_14	3_15	Welding
SA26_15	2a_16	Assembly with crane
SA26_15	2b_16	Assembly without crane
SA26_15	3_16	Welding
SA39_01	2a_17	Assembly with crane
SA39_01	2b_17	Assembly without crane
SA39_01	3_17	Welding
SA39_02	2a_18	Assembly with crane
SA39_02	2b_18	Assembly without crane
SA39_02	3_18	Welding
SA39_03	2a_19	Assembly with crane
SA39_03	2b_19	Assembly without crane
SA39_03	3_19	Welding
SA39_04	2a_20	Assembly with crane
SA39_04	2b_20	Assembly without crane
SA39_04	3_20	Welding
<b>BP01_01</b>	4	Finishing

#### Secuencia de construcción BP01

Son un total de 60 pasos a realizar hasta completar cada una de las dos piezas BP01 (en el modelo de simulación se ha tenido en cuenta la fase de armamento, última fase, con lo que el número de pasos intermedios en la simulación es de 61).

Explicaremos brevemente estos pasos:

La primera pieza a entrar en la zona de trabajo es una plancha de acero sobre la que se soldarán los perfiles. Primero la pieza es posicionada en el área donde se realizará el trabajo, este es el paso “Level Setup”. Para realizar esto, se utilizará la grúa común de las 4 zonas de trabajo, paso “Assembly with crane”. Una vez posicionada la plancha en su sitio, comenzamos a posicionar sobre ella los perfiles de refuerzo. Este paso puede realizarse de múltiples maneras; bien posicionamos un perfil y lo soldamos y repetimos esta operación el número de veces necesarias, bien posicionamos todos los perfiles y los vamos punteando, y en una segunda fase se sueldan todos, bien se realiza un proceso intermedio entre los dos anteriores, se posicionan la mitad de perfiles y se puntean, se realiza la soldadura de estos, y se posicionan el resto de perfiles y se sueldan.

Los datos que disponemos nos marcan un trabajo secuenciado, por lo que el modelo de simulación corresponderá más aproximadamente con la primera forma de posicionar los perfiles; se realiza un posicionamiento general con la grúa (Assembly with crane), se posicionan exactamente y se puntean (Assembly without crane), y finalmente se suelda (Welding), repitiendo esta operación en este orden para cada perfil que formará el panel. Después se procederá a la corrección de soldaduras, suprimir imperfecciones, y todos aquellos pequeños detalles que se deben realizar antes de dar por acabada la pieza. Finalmente, una vez el panel está terminado desde el punto de vista estructural, se procede a su armamento (outfitting).

Para la construcción de las piezas FL01 la secuencia que debemos realizar es:

Block	Step	Activity
<b>FL01_01</b>	1	Level setup
PA18_01	2a_1	Assembly with crane (first block positioning)
BP04_01	2a_2	Assembly with crane
BP04_01	2b_2	Assembly without crane
BP04_01	3_2	Welding
BP04_02	2a_3	Assembly with crane
BP04_02	2b_3	Assembly without crane
BP04_02	3_3	Welding
BP04_03	2a_4	Assembly with crane
BP04_03	2b_4	Assembly without crane
BP04_03	3_4	Welding
BP04_04	2a_5	Assembly with crane
BP04_04	2b_5	Assembly without crane
BP04_04	3_5	Welding
BP04_05	2a_6	Assembly with crane



BP04_05	2b_6	Assembly without crane
BP04_05	3_6	Welding
BP04_06	2a_7	Assembly with crane
BP04_06	2b_7	Assembly without crane
BP04_06	3_7	Welding
BP80_01	2a_8	Assembly with crane
BP80_01	2b_8	Assembly without crane
BP80_01	3_8	Welding
BP80_02	2a_9	Assembly with crane
BP80_02	2b_9	Assembly without crane
BP80_02	3_9	Welding
BP80_03	2a_10	Assembly with crane
BP80_03	2b_10	Assembly without crane
BP80_03	3_10	Welding
BP80_04	2a_11	Assembly with crane
BP80_04	2b_11	Assembly without crane
BP80_04	3_11	Welding
BP84_01	2a_12	Assembly with crane
BP84_01	2b_12	Assembly without crane
BP84_01	3_12	Welding
BP84_02	2a_13	Assembly with crane
BP84_02	2b_13	Assembly without crane
BP84_02	3_13	Welding
SA29_01	2a_14	Assembly with crane
SA29_01	2b_14	Assembly without crane
SA29_01	3_14	Welding
SA29_02	2a_15	Assembly with crane
SA29_02	2b_15	Assembly without crane
SA29_02	3_15	Welding
SA29_03	2a_16	Assembly with crane
SA29_03	2b_16	Assembly without crane
SA29_03	3_16	Welding
SA29_04	2a_17	Assembly with crane
SA29_04	2b_17	Assembly without crane
SA29_04	3_17	Welding
SA29_05	2a_18	Assembly with crane
SA29_05	2b_18	Assembly without crane
SA29_05	3_18	Welding
SA29_06	2a_19	Assembly with crane
SA29_06	2b_19	Assembly without crane
SA29_06	3_19	Welding
SA29_07	2a_20	Assembly with crane
SA29_07	2b_20	Assembly without crane
SA29_07	3_20	Welding
SA29_08	2a_21	Assembly with crane

SA29_08	2b_21	Assembly without crane
SA29_08	3_21	Welding
SA29_09	2a_22	Assembly with crane
SA29_09	2b_22	Assembly without crane
SA29_09	3_22	Welding
SA29_10	2a_23	Assembly with crane
SA29_10	2b_23	Assembly without crane
SA29_10	3_23	Welding
SA29_11	2a_24	Assembly with crane
SA29_11	2b_24	Assembly without crane
SA29_11	3_24	Welding
SA29_12	2a_25	Assembly with crane
SA29_12	2b_25	Assembly without crane
SA29_12	3_25	Welding
SA29_13	2a_26	Assembly with crane
SA29_13	2b_26	Assembly without crane
SA29_13	3_26	Welding
SA29_14	2a_27	Assembly with crane
SA29_14	2b_27	Assembly without crane
SA29_14	3_27	Welding
SA29_15	2a_28	Assembly with crane
SA29_15	2b_28	Assembly without crane
SA29_15	3_28	Welding
SA29_16	2a_29	Assembly with crane
SA29_16	2b_29	Assembly without crane
SA29_16	3_29	Welding
SA29_17	2a_30	Assembly with crane
SA29_17	2b_30	Assembly without crane
SA29_17	3_30	Welding
SA29_18	2a_31	Assembly with crane
SA29_18	2b_31	Assembly without crane
SA29_18	3_31	Welding
SA41_01	2a_32	Assembly with crane
SA41_01	2b_32	Assembly without crane
SA41_01	3_32	Welding
SA41_02	2a_33	Assembly with crane
SA41_02	2b_33	Assembly without crane
SA41_02	3_33	Welding
SA41_03	2a_34	Assembly with crane
SA41_03	2b_34	Assembly without crane
SA41_03	3_34	Welding
<b>FL01_01</b>	4	Finishing

Lo que hace un total de 102 pasos intermedios antes de finalizarla (en el modelo de simulación se ha tenido en cuenta la fase de armamento, lo que aumenta a 103 el número de actividades).

Una vez tenemos estas piezas, debemos unir BP01\_01 con FL01\_01 para construir el sub-bloque SF02a, y las piezas BP01\_02 con FL01\_02 para el sub-bloque SF02b.

La secuencia de construcción de estos sub-bloques es mucho más sencilla, contando con tan solo 6 fases, a saber:

	Bloque	Paso	Actividad
1	SF01a_o_b	1	Level setup
2	SF01a_o_b	2	Assembly with crane
3	SF01a_o_b	3	Assembly without crane
4	SF01a_o_b	4	Welding
5	SF01a_o_b	5	Finishing
6	SF01a_o_b	6	Outfitting

Finalmente, la construcción del bloque se completa realizando la unión de los dos sub-bloques FL01\_a y FL01\_b, y siguiendo la misma secuencia de montaje que anteriormente, con solo 6 pasos intermedios. Una vez completada la secuencia y finalizado el armamento (outfitting), el bloque estará finalizado.

A continuación se muestra un resumen de los pasos a seguir.

<b>Working Area 1</b>	<b>Working Area 2</b>	<b>Working Area 3</b>	<b>Working Area 4</b>
<b>BP01_01</b>	<b>BP01_02</b>	<b>FL01_01</b>	<b>FL01_02</b>
PA14_01	PA14_02	PA18_01	PA18_02
SA26_01	SA26_16	BP04_01	BP04_07
SA26_02	SA26_17	BP04_02	BP04_08
SA26_03	SA26_18	BP04_03	BP04_09
SA26_04	SA26_19	BP04_04	BP04_10
SA26_05	SA26_20	BP04_05	BP04_11
SA26_06	SA26_21	BP04_06	BP04_12
SA26_07	SA26_22	BP80_01	BP80_05
SA26_08	SA26_23	BP80_02	BP80_06
SA26_09	SA26_24	BP80_03	BP80_07
SA26_10	SA26_25	BP80_04	BP80_08
SA26_11	SA26_26	BP84_01	BP84_03
SA26_12	SA26_27	BP84_02	BP84_04
SA26_13	SA26_28	SA29_01	SA29_19
SA26_14	SA26_29	SA29_02	SA29_20
SA26_15	SA26_30	SA29_03	SA29_21
SA39_01	SA39_05	SA29_04	SA29_22
SA39_02	SA39_06	SA29_05	SA29_23
SA39_03	SA39_07	SA29_06	SA29_24
SA39_04	SA39_08	SA29_07	SA29_25
		SA29_08	SA29_26
		SA29_09	SA29_27
		SA29_10	SA29_28
		SA29_11	SA29_29
		SA29_12	SA29_30
		SA29_13	SA29_31
		SA29_14	SA29_32
		SA29_15	SA29_33
		SA29_16	SA29_34
		SA29_17	SA29_35
		SA29_18	SA29_36
		SA41_01	SA41_04
		SA41_02	SA41_05
		SA41_03	SA41_06
<b>Working Area 1</b>	<b>Working Area 2</b>		
<b>SF02_a</b>	<b>SF02_b</b>		
BP01_01	BP01_02		
FL01_01	FL01_02		
<b>Working Area 1 &amp; 2</b>			
<b>SF02</b>			
SF02_a			
SF02_b			

El conocimiento de la secuencia de construcción es de capital importancia ya que será la base de la simulación realizada.

Desde el punto de vista de la simulación, cada una de estas actividades tiene su correspondencia con un puesto de trabajo, que será el encargado de realizar la actividad.

## **5.6 Puestos de trabajo. Bucle interno.**

Para realizar la producción en cada puesto de trabajo, se ha recreado un sistema de bucle cerrado para realizar las operaciones. Este sistema trabaja de la siguiente manera: la pieza de entrada tiene asociada un atributo interno llamado "bucle". Este atributo, es un "integer", que varía de cero a cien. Al entrar en un puesto de trabajo, el atributo es activado y aumenta en una unidad. Cuando el tiempo de producción es consumido para esa pasada del bucle, la pieza es rastreada al salir de la SingleProc; el valor del atributo aumenta en una unidad al salir. Si el valor del atributo bucle es menor que cien, la pieza vuelve a entrar en la SingleProc, si es cien, sale del puesto de producción.

Este bucle se ha realizado para poder agregar más trabajadores durante el proceso de fabricación. En efecto, debido a que el programa de simulación es un programa de simulación de eventos discretos, una vez la pieza está dentro de su puesto de trabajo, el tiempo de simulación comienza a contar cuando se cumplen todos los requisitos establecidos en el modelo, y una nueva señal es introducida en la Lista de Eventos Futuros (LEF) del programa. Esto quiere decir que si el proceso necesitaba de cuatro trabajadores para iniciarse, una vez que los ha conseguido, el tiempo de producción se establece y un nuevo evento futuro se crea, no pudiendo modificarse las condiciones iniciales de este evento. Así, si al comenzar la producción en el puesto de trabajo solo habían cuatro trabajadores, el tiempo de procesado comenzará, pero si a mitad de la producción un nuevo trabajador termina en otra estación de trabajo y pasa al estado de espera para ser llamado, el proceso ya iniciado con cuatro trabajadores no podrá incorporarlo a su producción.

En nuestro modelo de simulación, se ha realizado el bucle cerrado en cada estación de trabajo para poder incorporar nuevos trabajadores que, a mitad de la producción, estén en la posición de espera. Entonces, cada vez que la pieza entra en una rutina del sub-bucle, buscará si existen trabajadores en posición de espera, y si así es, los incorporará a la estación de trabajo.

## **5.7 Tiempo de producción.**

El tiempo de producción viene dado en función del tipo de proceso que se realiza según la siguiente tabla:

Tipo	Paso	Actividad	Horas Hombre	Hombres(máx)
SF02	1	Level setup	39.6	2
SF02	2	Assembly	554.4	8
SF02	3	Welding	660.0	10
SF02	4	Finishing	66.0	4
SF02	5	Outfitting (pipes, pumps)	80.0	3

FL01	1	Level setup	29.8	2
FL01	2	Assembly	249.9	4
FL01	3	Welding	297.5	6
FL01	4	Finishing	17.9	2
FL01	5	Outfitting (pipes)	40.0	3
FL01	6	Outfitting (accessories)	12.0	3

BP01	1	Level setup	4.8	2
BP01	2	Assembly	211.2	4
BP01	3	Welding	240.0	6
BP01	4	Finishing	24.0	2
BP01	5	Outfitting	40.0	3
BP01	6	Outfitting (accessories)	12.0	3

Estos tiempos son los tiempos totales para todas las piezas de la misma familia, con lo cual los tendremos que dividir por el número de piezas a realizar.

El modelo de simulación calcula el tiempo de cada proceso al entrar la pieza en el puesto de trabajo. Este tiempo depende del número de obreros que se encuentren en ese instante en el puesto de trabajo y puede cambiar a lo largo del proceso como ya hemos visto.

Para que el tiempo de procesado sea el correcto en cada caso, el modelo de simulación realiza el cálculo del tiempo en cada pasada del bucle. Así, se calcula el tiempo unitario por pasada en función del número de obreros que se encuentren en la estación de procesado. Este tiempo, lógicamente, cambiará si a lo largo de las secuencias del bucle interno, se incorpora algún nuevo trabajador. La diferencia con el procedimiento habitual de bucle abierto, consiste en que el programa entiende como un nuevo evento discreto la entrada en cada paso del bucle, lo que permite modificar las condiciones iniciales del proceso.

## 5.8 Trabajadores

Los trabajadores u obreros son el recurso primario necesario para la fabricación de las piezas.

Los trabajadores están representados por un número que indica la cantidad de ellos que no están en ese instante trabajando en un puesto de trabajo. Esta forma de representación de los obreros, equivale a decir que en realidad, todos los obreros pueden realizar todos los trabajos propuestos (hipótesis bien asumible debido a la relativamente poca especialización requerida), y que tanto al iniciar la simulación, como cuando terminan las actividades en un puesto de trabajo, regresan a la una “zona de espera” hasta ser llamados nuevamente. La “zona de espera” es accesible por parte de las cuatro áreas de trabajo, lo cual quiere decir que los trabajadores se pueden desplazar desde esta zona de espera a cualquier puesto de trabajo en cualquier Frame Atelier. Al iniciar la simulación debemos indicar el número de trabajadores máximo que estarán disponibles durante la simulación.

El sistema de reclutamiento es el siguiente:

Los puestos de trabajo tienen asociados un número máximo de trabajadores que pueden trabajar al mismo tiempo en ella. Cuando la pieza entra en la estación de procesado, esta busca en la “zona de espera” el número máximo de trabajadores que pueden entrar a la estación de trabajo. Si en ese instante no existen tantos trabajadores como el máximo necesario, entonces la estación de trabajo recluta a todos los que quedan en la zona de espera de trabajadores. La simulación calcula el tiempo para el procesado de la primera pasada del bucle en función del número de trabajadores que están en ese momento trabajando. Cuando finaliza el tiempo de producción de este primer paso del bucle, la pieza reentra en la estación de trabajo. Los trabajadores existentes en ella no pueden salir, lo cual quiere decir que una vez iniciado el proceso de trabajo en una estación, no es posible detenerlo, no existe la posibilidad de que a mitad de la producción los trabajadores se vayan a realizar otro proceso. La simulación, a la entrada de un nuevo paso del bucle vuelve a buscar si en ese instante hay más trabajadores en espera. Si es así, reclutará a los necesarios hasta completar el cupo máximo, si no, el bucle continuará y realizará otra pasada en el procesado. Esto se repite a cada entrada de cada paso del bucle. Una vez la pieza ha realizado todas las pasadas del bucle, los trabajadores son liberados del puesto de trabajo y vuelven a la zona de espera hasta que un nuevo proceso los requiera.

Si en un determinado instante, una pieza debe entrar en un puesto de trabajo y no existen al menos dos trabajadores en espera (dos es el número mínimo de trabajadores

para todos los procesos), la entrada al proceso se bloquea y las piezas esperan en los objetos Buffer hasta que la estación de trabajo reclute a, al menos, dos obreros.

El programa eM-Plant incorpora una serie de objetos para representar a los trabajadores y las zonas de espera. Sin embargo, estos objetos predefinidos no son capaces de modificarse durante el proceso. Desde el punto de vista de simulación, el reclutamiento de un trabajador existente en una zona de espera utilizando estos objetos, es un acontecimiento primario en el LEF, lo cual impide utilizar los objetos predefinidos, incluso con el bucle creado, para aumentar los trabajadores durante la fabricación. Es por esto que se ha recurrido a modelizar los trabajadores como variables en lugar de utilizar las herramientas predefinidas del programa. Esto demuestra la gran versatilidad de estas simulaciones.

## 5.9 Grúa.

La grúa es el otro recurso necesario para llevar a cabo la simulación. Al igual que los trabajadores, es un recurso común para las cuatro áreas de trabajo.

La grúa es utilizada en el proceso "Assembly with crane (first block positioning)" y "Assembly with crane". Estos procesos se realizan en la estación de trabajo "Assembly" y para realizarlos es necesario tener disponibles los recursos grúa y un número de obreros mínimo de dos.

Cuando la pieza entra en el puesto Assembly, puede ser para realizar, bien el proceso "Assembly without crane" o bien el proceso "Assembly with crane". Cuando se trata del primer caso, los recursos necesarios solo son los trabajadores. En el segundo caso, necesitamos dos recursos, grúa y trabajadores. Aún tratándose del mismo puesto de trabajo, las actividades "Assembly without crane" y "Assembly with crane" son tratadas independientemente. Esto quiere decir que durante la simulación, una vez terminado el proceso "Assembly with crane", que según la secuencia de trabajo es realizado siempre antes del proceso "Assembly without crane", los trabajadores volverán a la zona de espera para ser nuevamente reclutados, y puede ocurrir que, si existe un puesto de trabajo en espera de trabajadores cuando el proceso "Assembly with crane" ha terminado, entonces no comience inmediatamente el proceso "Assembly without crane", ya que como dijimos, es considerado como un nuevo proceso, independientemente de que se realice en el mismo puesto de trabajo.



## 5.10 Proceso de fabricación.

Vamos a explicar el proceso por el cual las piezas van ganando en valor añadido hasta alcanzar el estadio de bloque completo.

Al iniciar la simulación, los MU's que representan las piezas iniciales, son generados con un atributo llamado "pass". Este atributo representa el paso o nivel de producción en que se encuentra el MU, nuestra pieza.

Este atributo es especialmente importante para la simulación, ya que establece la conexión entre la pieza en cada instante y el puesto de fabricación al que debe ir dirigida.

La fabricación de los paneles BP y FL se realiza en cada área de trabajo independientemente, y la fabricación de estas piezas sencillamente implica la finalización de toda la secuencia de trabajo predeterminada.

Ahora bien, para la realización de los su-bloques SF02a y b, debemos unir virtualmente las áreas 1y 3, y las áreas 2 y 4. El proceso real seguido puede resumirse de la siguiente forma: Una vez los paneles BP01 y FL01 están terminados (el BP01 se finalizará generalmente mucho antes que el FL01 debido a la menor carga de trabajo requerida), son llevados hasta el área dispuesta para su unión (zona 1&3) en donde serán posicionados y alineados entre sí. En estos instantes, se realizarán puntos de soldadura para mantener las posiciones de las piezas (tanto refuerzos estructurales, planchas, consolas... como elementos del prearmamento). Una vez los elementos estén posicionados correctamente, se procederá a soldar todas las uniones para formar la unidad estructural sub-bloque. Este proceso se realizará tanto automática como manualmente. En las zonas planas donde existan largos cordones de soldadura rectos, se podrá utilizar procesos automatizados para unir las partes, pero existirán zonas del sub-bloque que, ya sea por su curvatura, inaccesibilidad o complejidad para la automatización, se deberán realizar a mano. Cuando las soldaduras estén realizadas, tendremos ya el sub-bloque propiamente dicho. Una vez finalizadas las soldaduras se procederá como en el caso de la construcción de los paneles, a realizar el acabado, que consistirá en pequeños ajustes, reparaciones, uniones de menor importancia, etc. Después se procederá al prearmamento de tuberías, válvulas, tomas de mar, sistema eléctrico si cabe, etc. Este paso, que en la simulación ha sido establecido como el último, en la realidad del taller, puede llevarse a cabo en una etapa anterior o repartido en diversas etapas intermedias, intercaladas en la etapa de soldadura y acabado.

Este proceso de fabricación de los sub-bloques se ha simulado de la siguiente forma: primero las piezas BP01 y FL01, una vez finalizadas, son enviadas a un puesto intermedio de espera hasta que ambas piezas finalicen su proceso constructivo. Cuando las

dos piezas están terminadas, se unen para formar un nuevo MU llamado FLO1a-b que tiene los atributos necesarios para realizar el bucle cerrado interno de los puestos de fabricación y el atributo "Pass" para ser guiado a los puestos de fabricación y tener un control del punto del proceso en que se encuentra en cada instante. Este MU, una vez creado, es dividido en dos, y enviado cada uno ellos a un área de trabajo, 1 y 3, o 2 y 4. Esto quiere representar la unión de dos áreas de trabajo en una. La simulación se ha realizado suponiendo que, dentro del área de trabajo 1&3, o 2&4, se pueden realizar trabajos en paralelo. Esto no tiene grandes implicaciones a la hora de la construcción de los sub-bloques, solo representa el hecho de que el nuevo área de trabajo se supone lo suficientemente grande como para poder realizar trabajos distintos en distintas zonas del sub-bloque al mismo tiempo.

Una vez los sub-bloques están completados, pasan a una zona de espera en donde atienden la llegada del otro para unirse en un nuevo MU y formar el definitivo bloque SF. Este bloque, que se construirá en la zona creada por la unión de 1, 2, 3&4, pasará por todas las estaciones de trabajo necesarias, y una vez completado el ciclo, entrará a la zona de Store. Es aquí donde se da por finalizada la producción del bloque y se hace el análisis de los datos.

## 6. Resultados.

Una vez que tenemos el modelo de simulación completado y verificado, procedemos a lanzar la simulación y estudiar los resultados.

Este proyecto tiene por objetivo principal calcular el tiempo total de simulación en la producción de un bloque de fondo, y como objetivo secundario, comprobar cómo afecta la variación del número de trabajadores en ese tiempo total.

Para ello hemos realizado múltiples simulaciones, creando diferentes escenarios, variando en cada uno de ellos algún parámetro para observar el efecto que tiene en el tiempo total de simulación.

En cada escenario creado se han recogido tres datos distintos: tiempo total de simulación, tiempo total de espera de todos los trabajadores y tiempo de espera por trabajador. Comentemos algo sobre ellos.

El tiempo total de simulación es un dato básico para el proceso productivo. Es valioso apreciar cómo va cambiando este valor en función del número de trabajadores. Podemos hacernos una idea de cuál sería el valor óptimo, o que pasaría si duplicáramos los trabajadores disponibles. Es probable que el valor numérico dado por la simulación no sea exactamente el mismo que el tiempo real de producción, pero cualitativamente, es de gran ayuda observar como este valor cambia, la tendencia que adquiere, los puntos donde la pendiente es más pronunciada, etc.

El tiempo total de espera por parte de los trabajadores es un dato de la productividad del taller estudiado. Si bien es cierto que las condiciones establecidas para la simulación (secuencia estricta, movimientos permitidos por todas las zonas, imposibilidad de dejar una tarea sin terminar, etc.) pueden no coincidir exactamente con las condiciones reales de trabajo, si podemos observar cual será el aumento o disminución de productividad en términos comparativos. Estos datos, bien estudiados, pueden hacer mejorar sustancialmente el rendimiento de una zona de trabajo.

Tiempo de espera por trabajador. Este valor, obtenido con el tiempo total de espera y el número total de trabajadores, es una medida de la productividad del trabajador en sí. Cuanto mayor sea el tiempo de espera por unidad de trabajador, menor será su rendimiento.

## 6.1 Escenario 1.

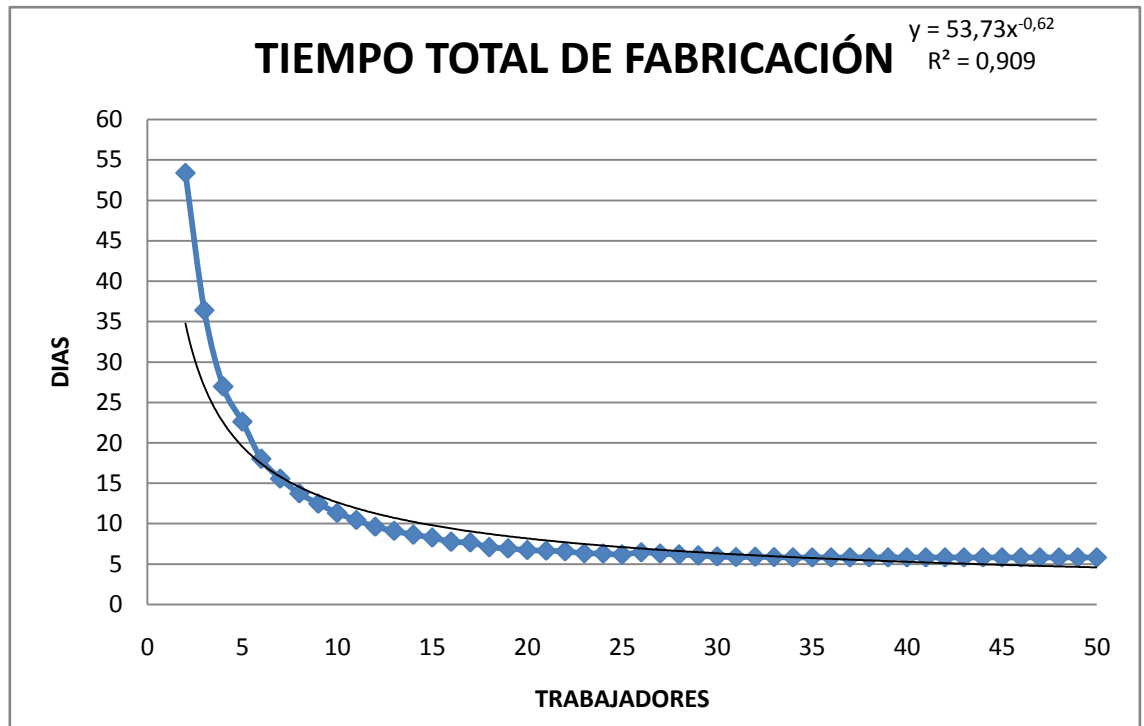
Este escenario es el correspondiente a poder disponer en cada estación de trabajo el número máximo de obreros según la tabla.

Type	Step	Activity	man hours	Men
SF02	1	Level setup	39.6	2
SF02	2	Assembly	554.4	8
SF02	3	Welding	660.0	10
SF02	4	Finishing	66.0	4
SF02	5	Outfitting (pipes, pumps)	80.0	3

FL01	1	Level setup	29.8	2
FL01	2	Assembly	249.9	4
FL01	3	Welding	297.5	6
FL01	4	Finishing	17.9	2
FL01	5	Outfitting (pipes)	40.0	3
FL01	6	Outfitting (accessories)	12.0	3

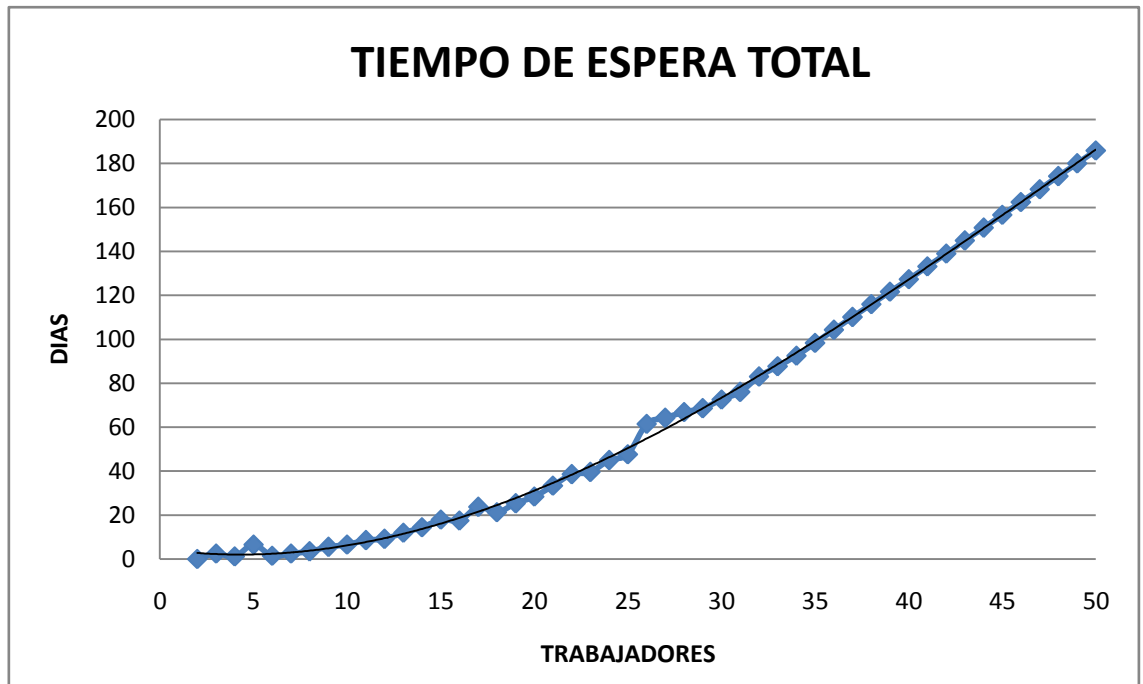
BP01	1	Level setup	4.8	2
BP01	2	Assembly	211.2	4
BP01	3	Welding	240.0	6
BP01	4	Finishing	24.0	2
BP01	5	Outfitting	40.0	3
BP01	6	Outfitting (accessories)	12.0	3

Se han realizado 50 simulaciones, variando el número de obreros disponibles, desde 2 hasta 50. Los datos extraídos de la simulación han sido el tiempo total de fabricación, el tiempo de espera total, el tiempo de espera unitario y el porcentaje de ocupación de cada puesto de trabajo. También podemos estudiar en el modelo, el tiempo de trabajo y espera de cada puesto de trabajo.

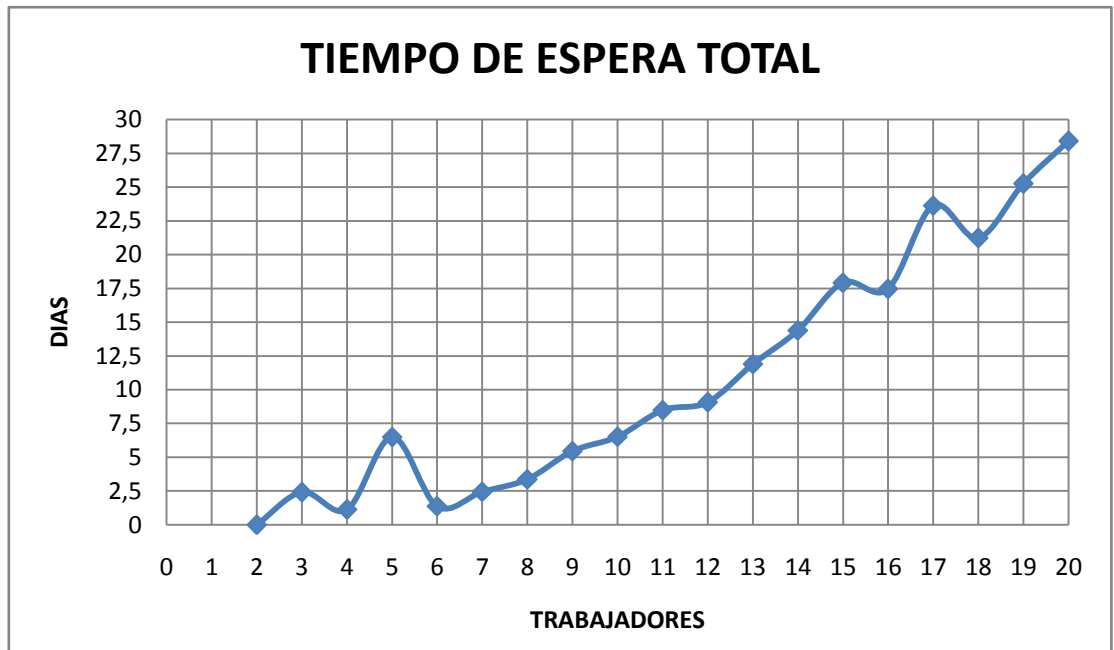


En este gráfico vemos cómo varía el tiempo de fabricación total (en días en el eje Y) con el número de trabajadores disponibles (eje X). Se pueden sacar algunas conclusiones generales de este gráfico. Vemos que a partir de un número de trabajadores del orden de 15, un aumento de estos no va asociado a una disminución significativa del tiempo total. Así mismo observamos que en la zona inicial del número de trabajadores, la pendiente es muy pronunciada, y nos indica que un aumento unitario en el número de trabajadores, conlleva una disminución significativa del tiempo total.

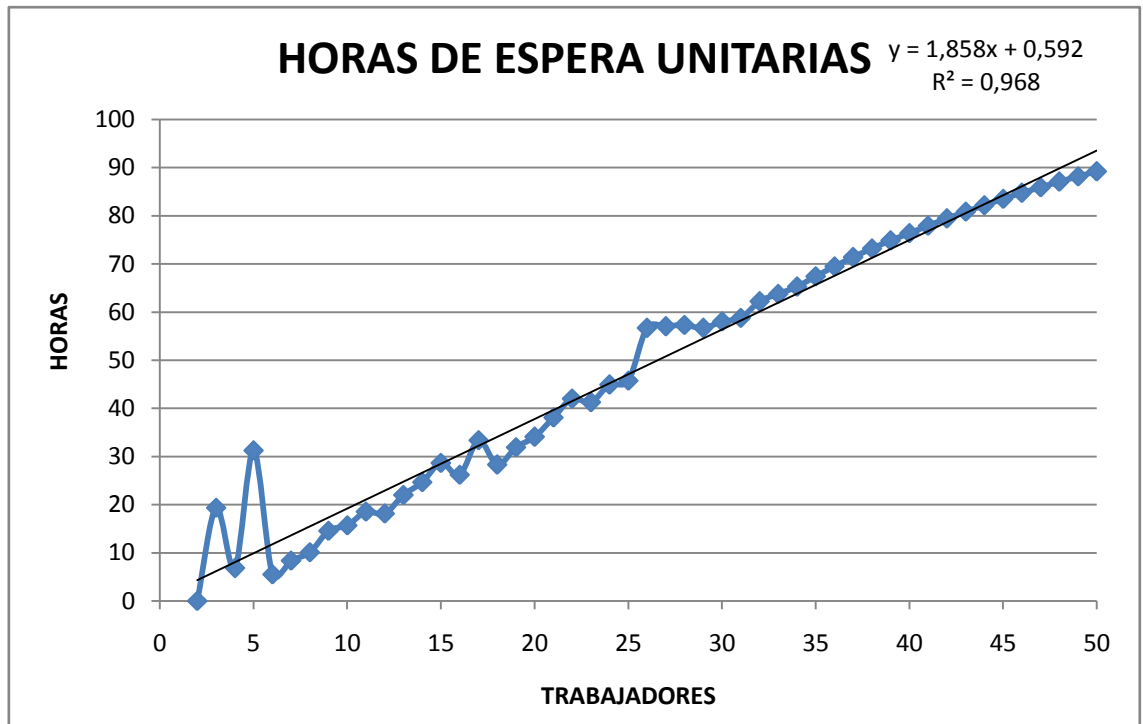
El tiempo de espera total, expresado en días, sigue una tendencia creciente, que se dispara de forma lineal al sobrepasar el valor de 30 trabajadores. Esto no indica claramente que a partir de esa cifra, poco o nada trabajan los obreros añadidos.



Si hacemos un estudio más detallado de este parámetro centrándonos en la zona inicial de la curva, observamos una fuerte pendiente ascendente al pasar la zona de 14 trabajadores. También vemos como al aumentar de 17 a 18 trabajadores, el tiempo total de espera se reduce. Esto es debido a que cuando trabajamos con un número impar de trabajadores e imponemos la condición de dos trabajadores mínimos para cada proceso, hay ocasiones, y esta es una de ellas, donde siempre queda un trabajador en espera en prácticamente todo el tiempo de procesado. En el caso que estamos estudiando, se acentúa este problema justo con 5 y 17 trabajadores.

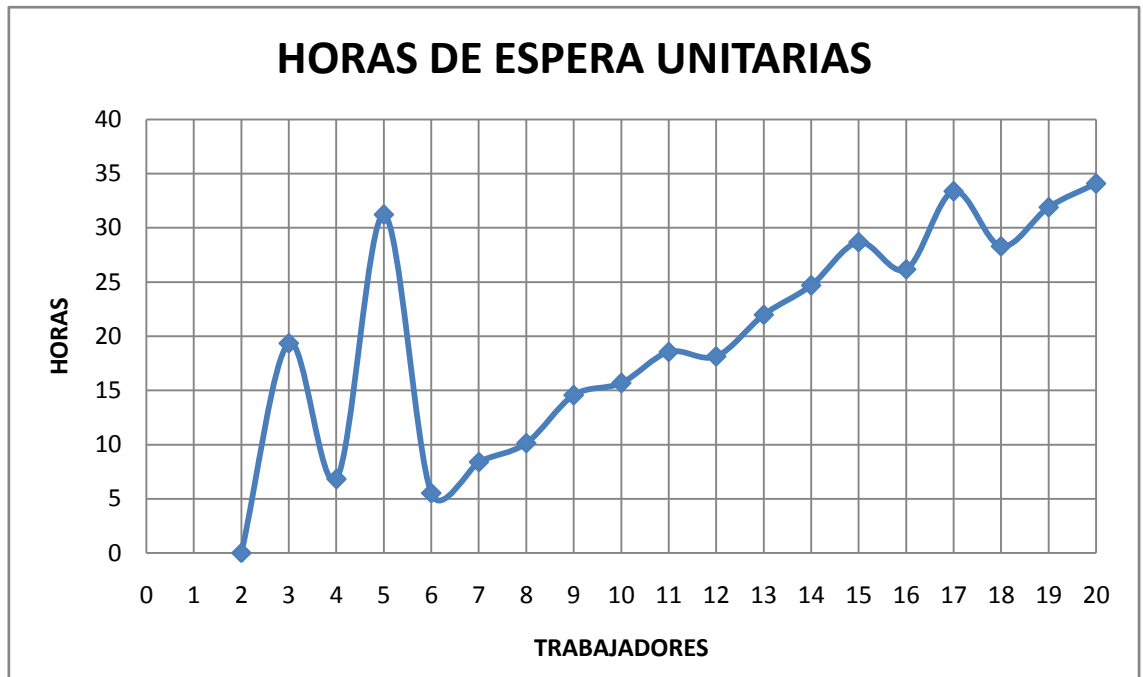


Observando el gráfico de tiempo de espera unitario, vemos que en la zona inicial, hasta 13 trabajadores, el tiempo de espera por trabajador es prácticamente nulo, salvo en el caso de 5 trabajadores. En este caso particular con 5 obreros, se da la circunstancia de que en cada proceso donde el número de trabajadores máximo es de cuatro, siempre quedará un trabajador en espera, que no podrá ser requerido para otra tarea ya que el mínimo es de dos. Así ya podemos decir que cinco obreros nunca será una solución deseable.



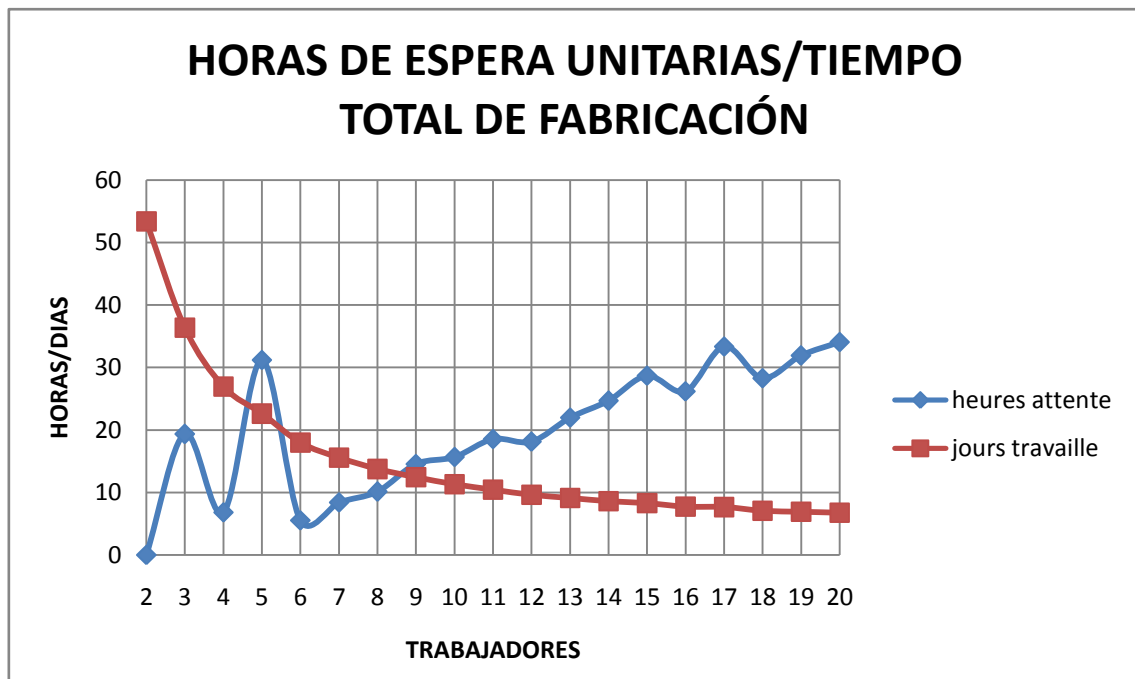
Visualizando más detalladamente la zona de 2 a 14 trabajadores, vemos que, excepto con 5, el resto de casos no proporciona un tiempo de espera unitario prácticamente nulo. Si atendiéramos a este criterio como método de selección del número óptimo de obreros, podríamos escoger cualquier solución del intervalo de 2 a 13 (excepto 5).





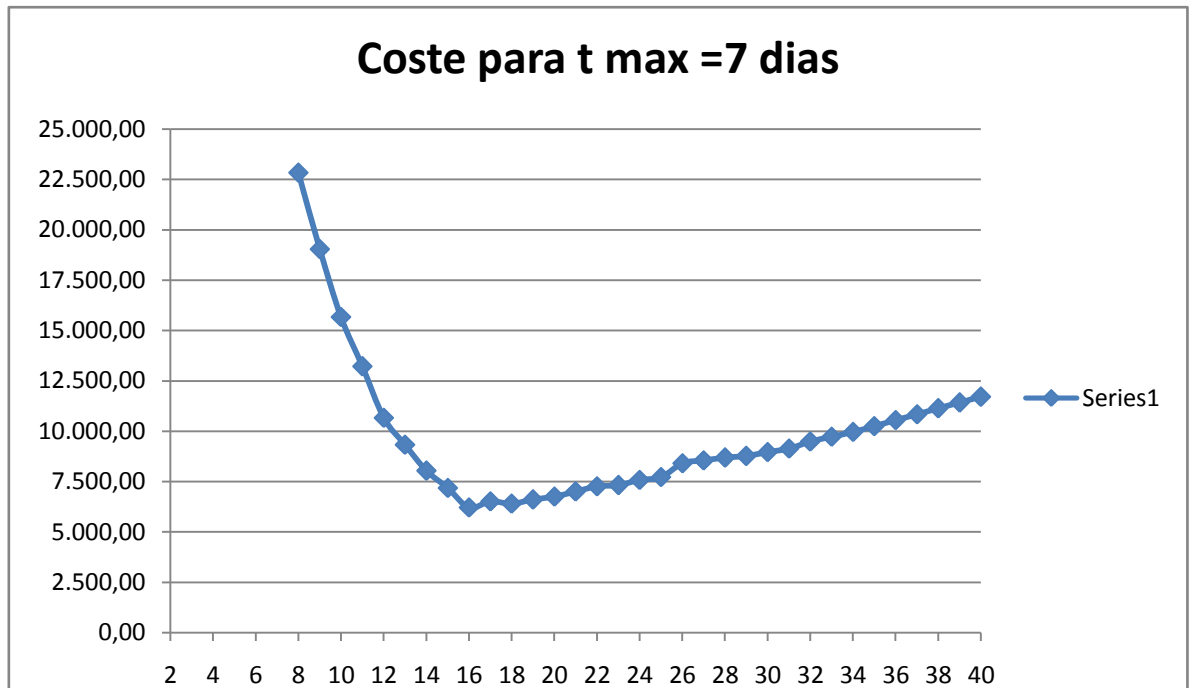
Ahora bien, todos estos gráficos, estudiados separadamente, nos pueden dar información puntual de algunos problemas concretos, como hemos visto, pero si queremos una información global del modelo, deberemos visualizar conjuntamente los gráficos para estudiarlos conjuntamente.

Si observamos conjuntamente los gráficos de tiempo de espera unitaria y de tiempo de producción total, podemos determinar cuál será la solución óptima para nuestro problema. Bien entendido, que la solución óptima será diferente según las necesidades, por ejemplo si el objetivo prioritario es la disminución del tiempo total de producción sin tener ningún otro factor en cuenta, a solución ideal estará muy a la derecha del gráfico tiempo total de producción. Aquí se ha tratado de hacer ver la posibilidad de conjuntar dos o más parámetros para obtener un criterio objetivo del concepto "solución óptima".



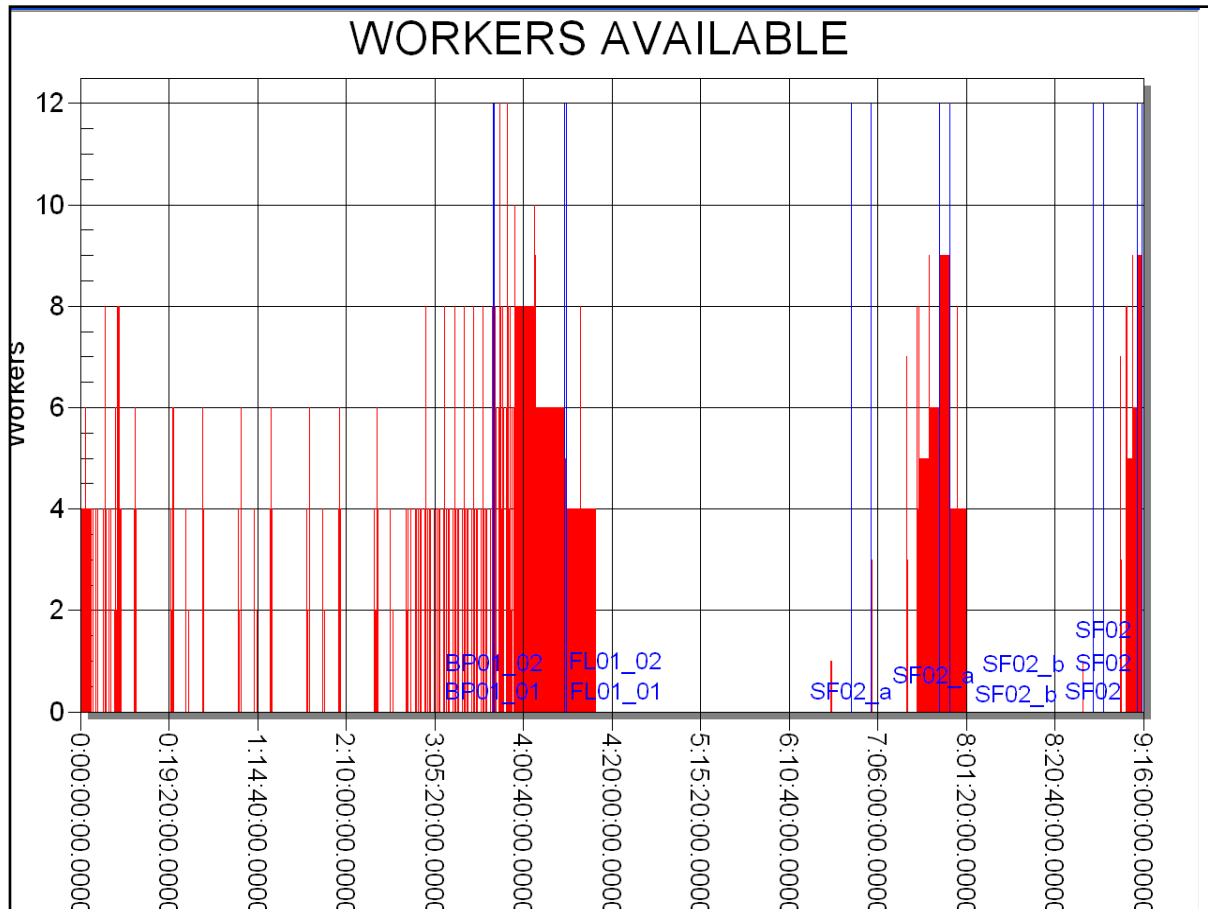
Si queremos realizar el trabajo en un tiempo aceptable sin necesidad de una cantidad enorme de trabajadores, nos moveremos en el intervalo de 10 a 16 obreros.

La simulación del proceso constructivo nos permite cuantificar el coste de construcción del elemento fabricado. Si tomamos como referencia el coste de la mano de obra como coste fijo en función del número de trabajadores y añadimos a este coste un sobrecoste debido a retrasos en el plazo de entrega, obtenemos resultados como el siguiente gráfico, en donde, tomando como plazo máximo de construcción 7 días, cada día extra acarreará penalizaciones económicas para el taller o astillero.

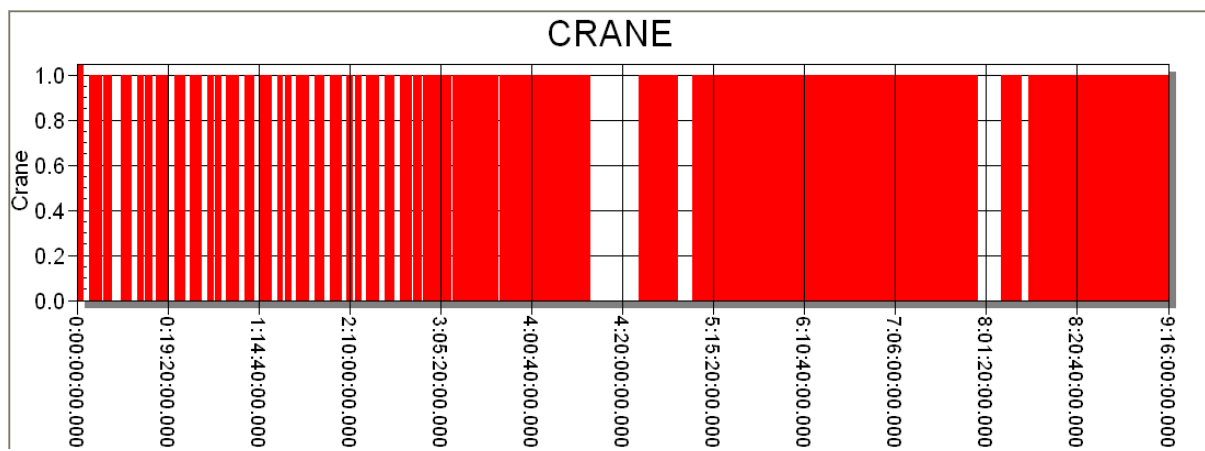


#### 6.1.1 HITOS.

Una vez que la simulación ha sido realizada, podemos hacer un estudio del tiempo en el que se ha completado cada hito. En el gráfico siguiente se observa el instante en el que cada pieza de entidad ha finalizado su construcción y el número de obreros disponibles en espera en cada instante de la simulación.



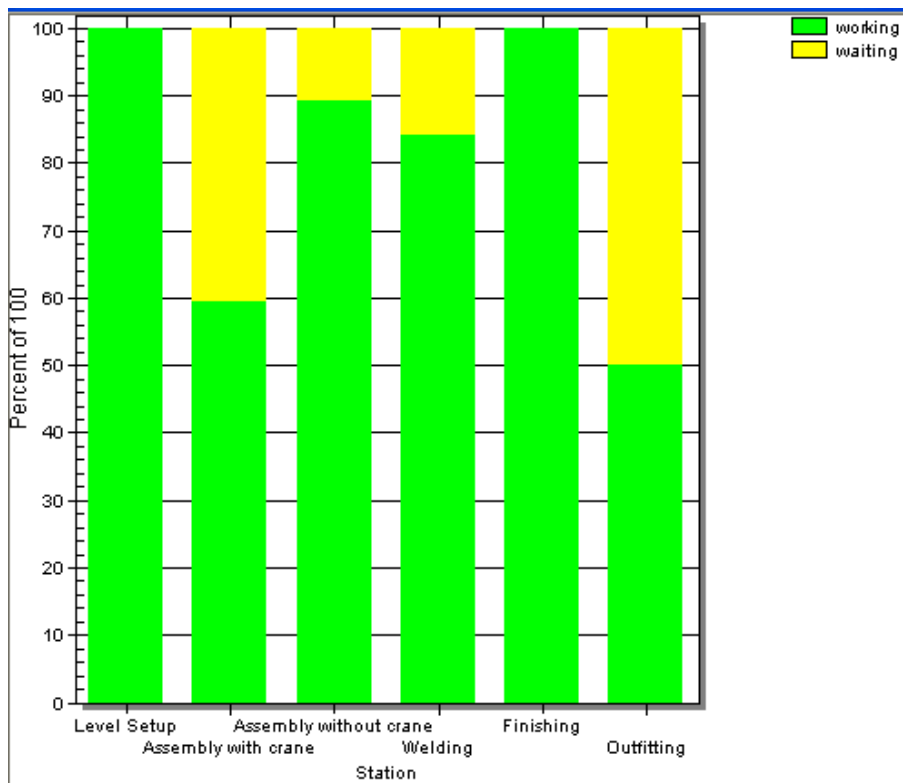
En el siguiente gráfico observamos la ocupación de la grúa (crane) en cada instante del proceso



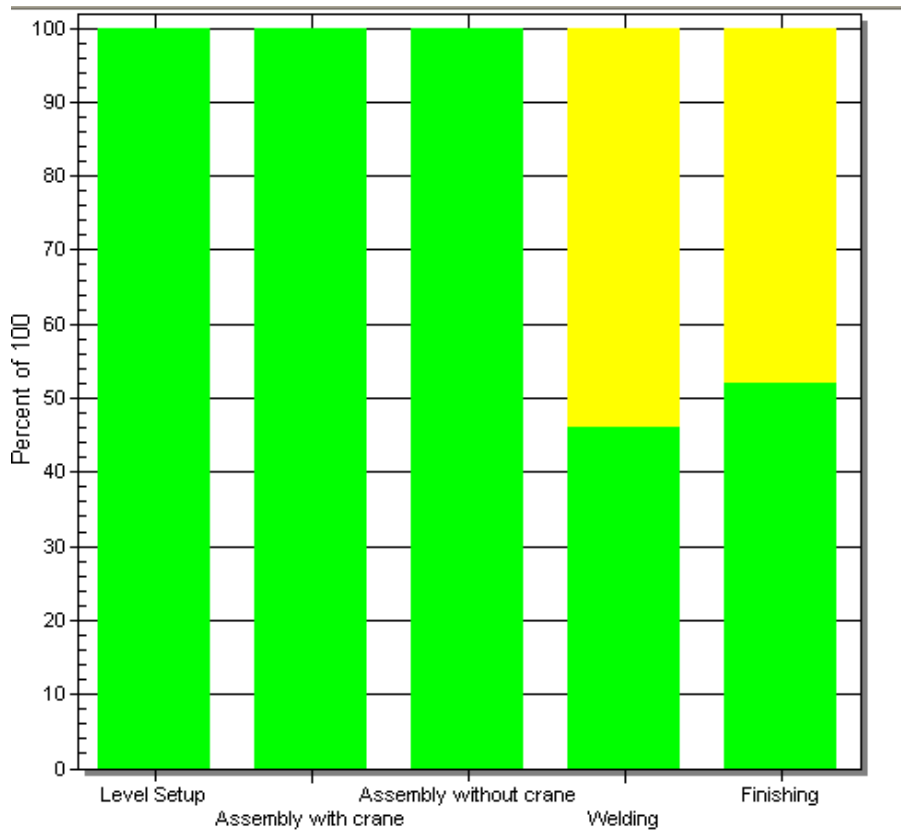
La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos (días:horas:minutos:segundos.)

También hemos realizado el modelo para poder estudiar el porcentaje de ocupación de cada puesto de trabajo durante la realización de cada pieza. Observamos en verde el tiempo real de trabajo y en amarillo el tiempo en que el puesto de trabajo tiene en su entrada una pieza y no puede procesarla por falta de recursos (trabajadores, grúa). En los puestos donde los trabajadores son el único recurso necesario para comenzar a producir, bastará con aumentar el número total de ellos disponibles para disminuir el tiempo de espera. Pero en los puestos donde se necesita así mismo la grúa, deberemos estudiar más atentamente estos gráficos para que no se produzcan cuellos de botella como consecuencia de tener una sola grúa y cuatro puestos de trabajo que dependen de ella.

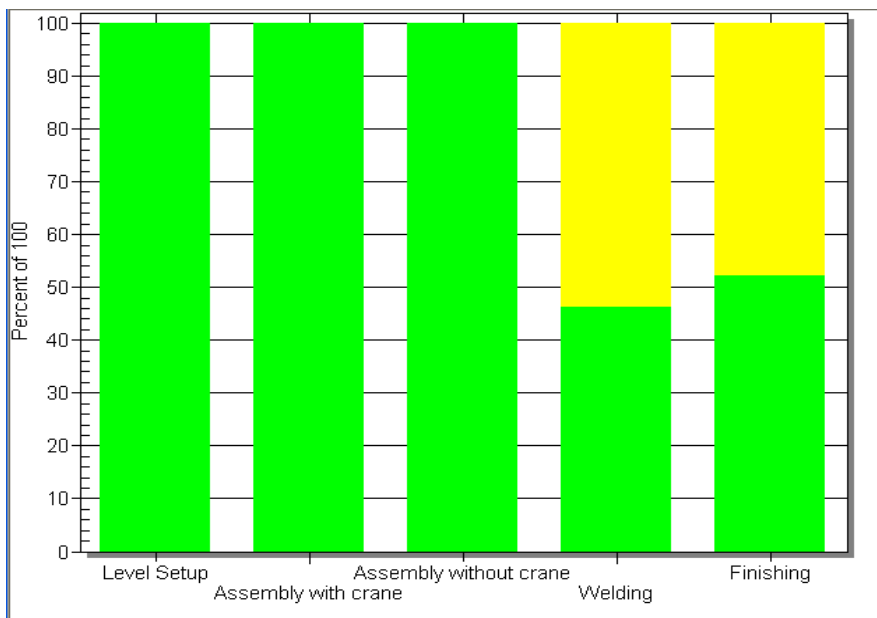
### Área de trabajo 1



Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza BP01\_01

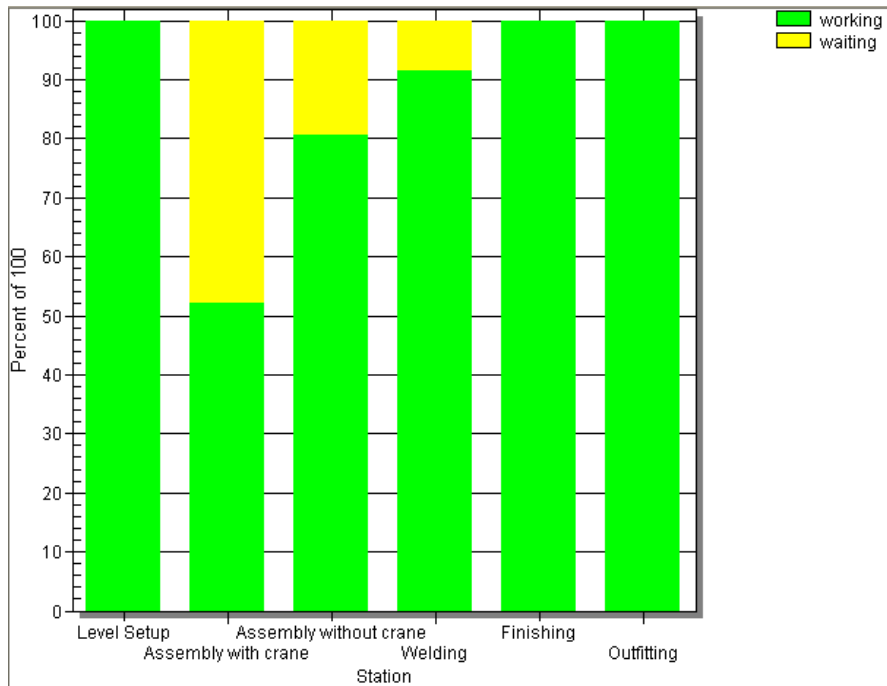


Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza SF02\_a1

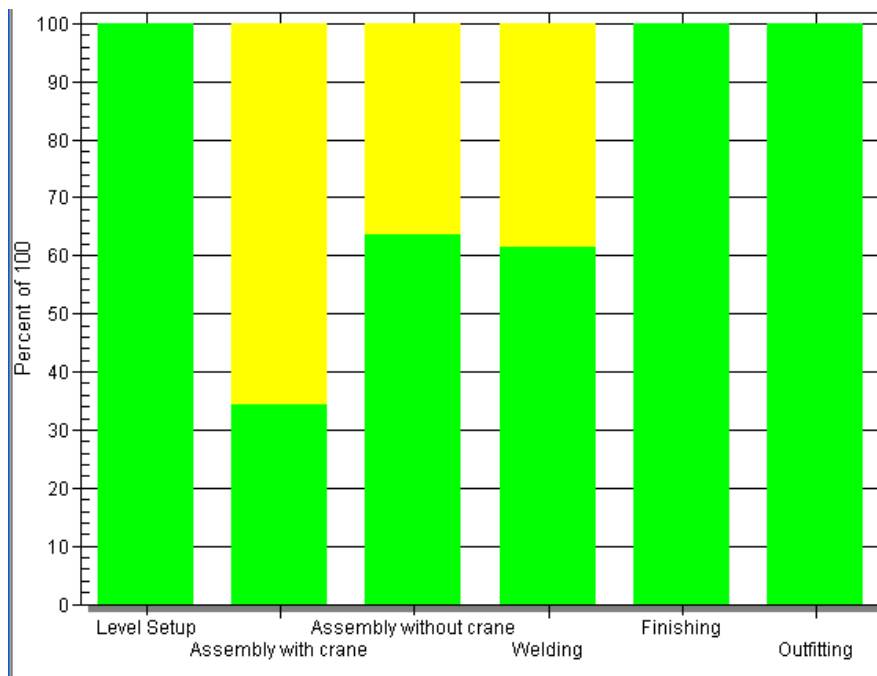


Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza SF02\_LBB1

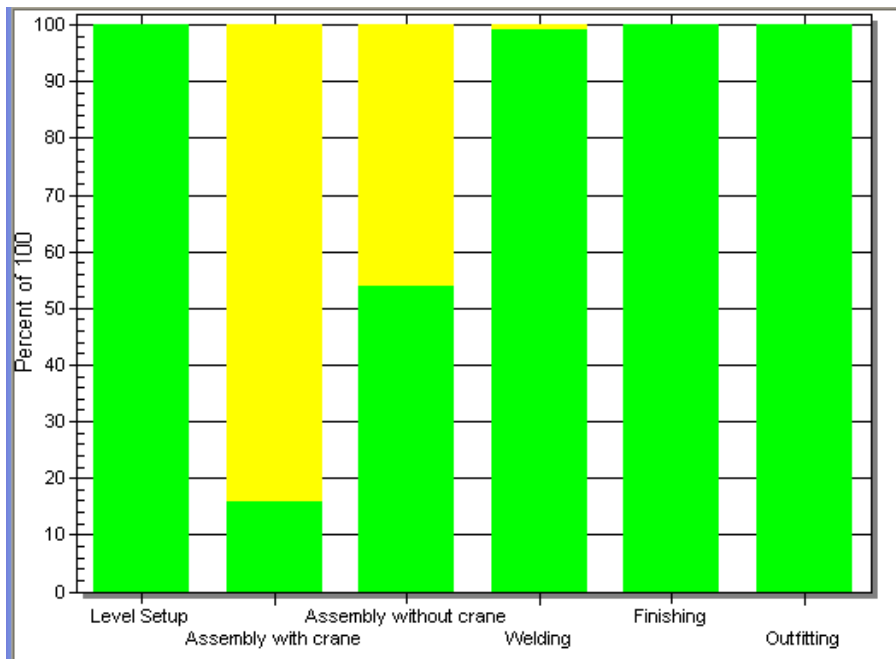
## Área de trabajo 2



Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza BP01\_02

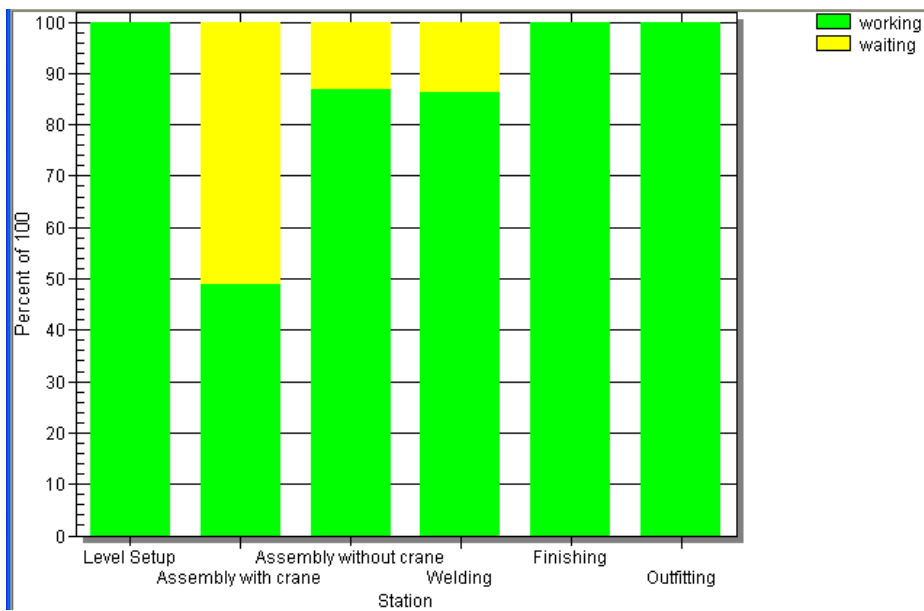


Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza SF02\_b1



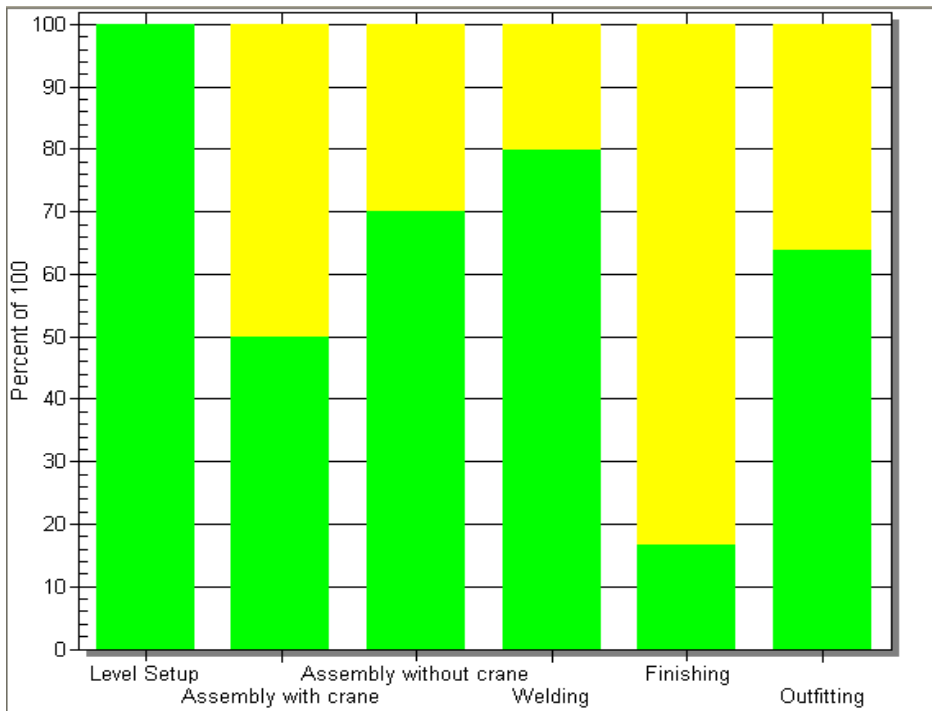
Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza SF02\_LBB2

### Área de trabajo 3

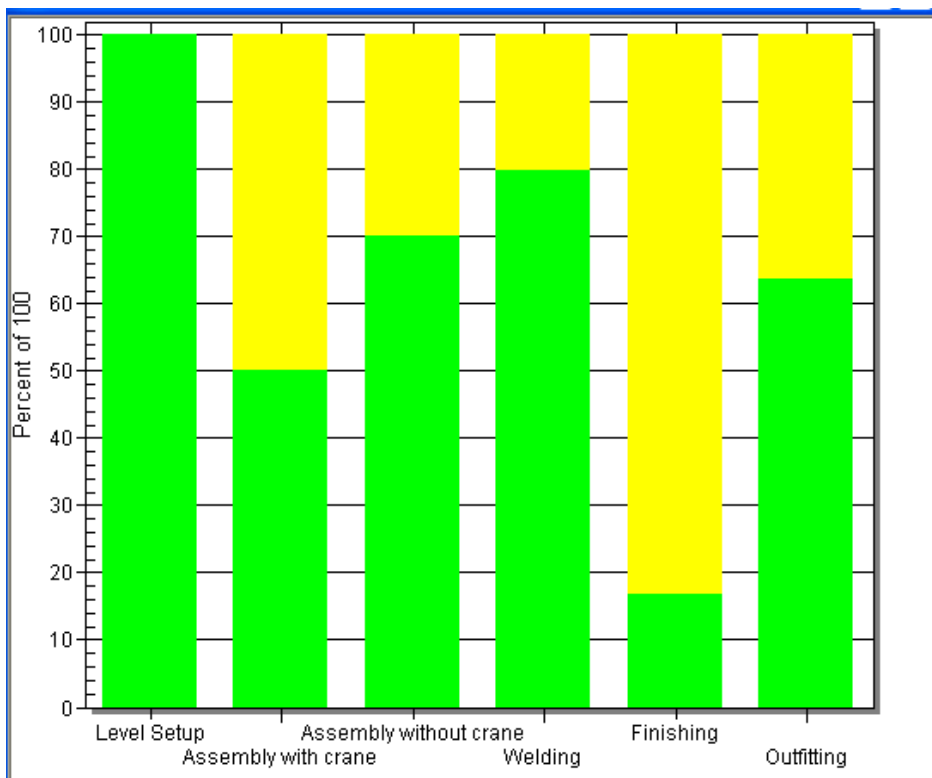


Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza FL01\_01



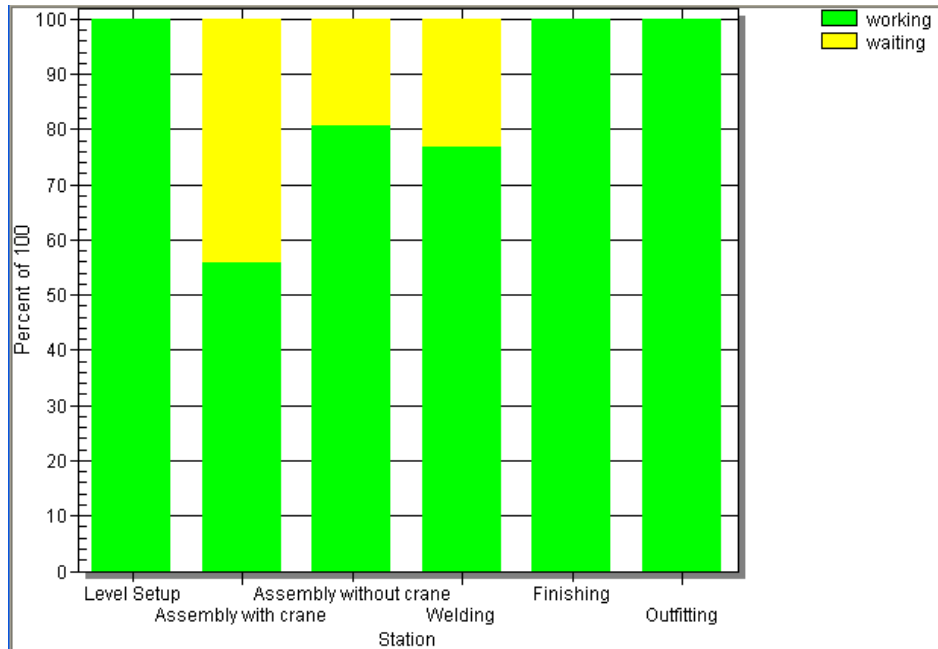


Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza SF02\_a2

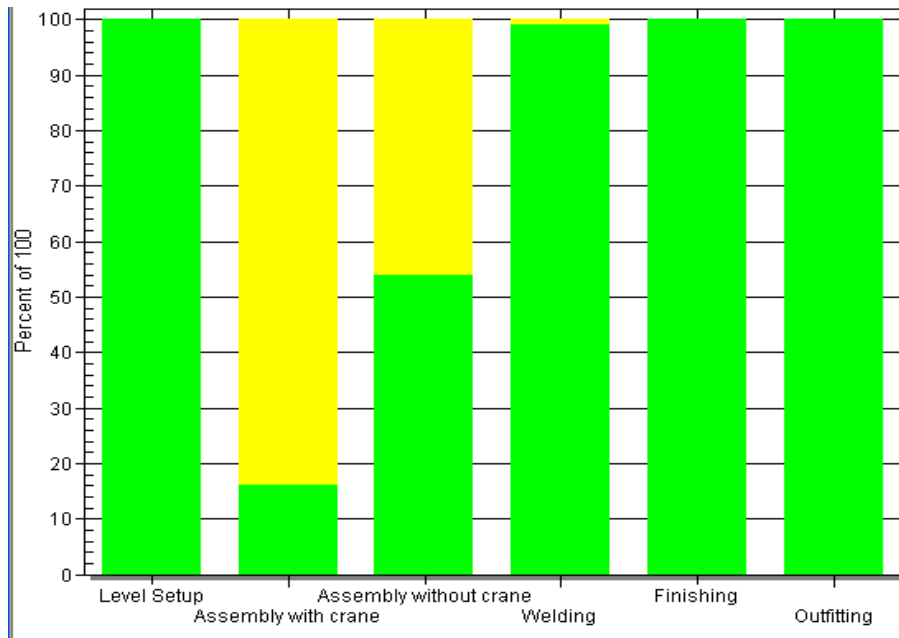


Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza pièce SF02\_LBB2

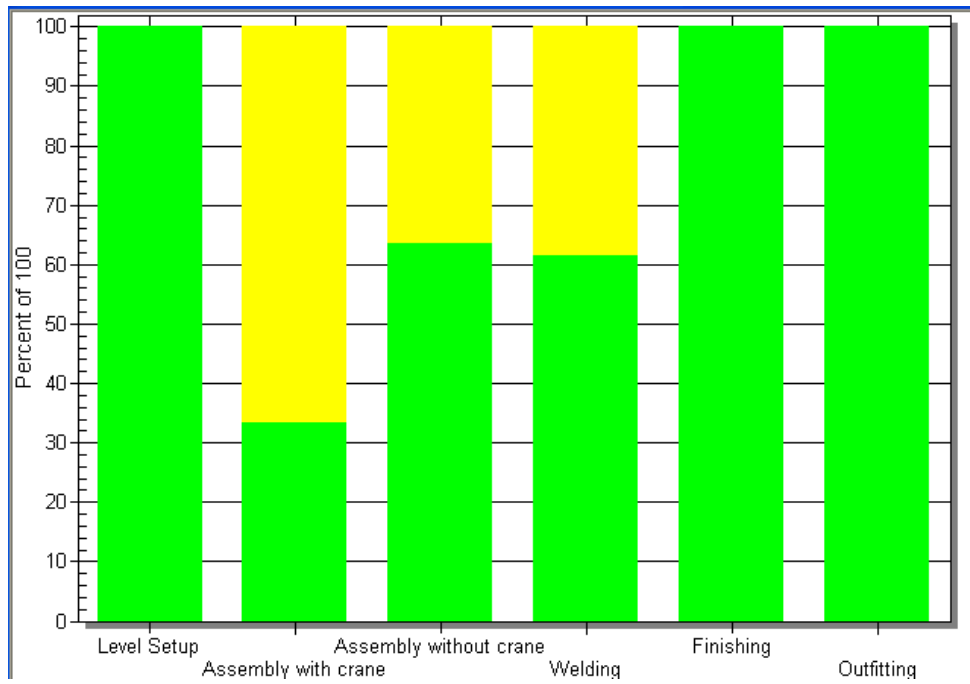
## Área de trabajo 4



Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza FL01\_02



Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza SF02\_a2



Porcentaje de utilización de los puestos de trabajo para la pieza SF02\_LBB2

Finalmente se muestra de forma tabular los resultados principales obtenidos.

Número trabajadores	Tiempo total de producción	Tiempo de espera total	Tiempo de espera unitario (Horas)	Coste de construcción(€)
2	53:09:48:40	00:00:00:04	0	141.565,83
3	36:09:52:00	2:10:02:40	19,35	90.695,00
4	26:23:41:41	1:03:13:26	6,81	62.357,78
5	22:15:55:22	6:12:03:34	31,21	49.655,38
6	18:00:47:11	1:09:09:47	5,53	35.507,71
7	15:14:37:03	2:10:46:04	8,4	28.290,24
8	13:18:34:21	3:09:01:31	10,13	22.830,28
9	12:11:23:03	5:10:54:12	14,54	19.036,35
10	11:08:01:44	6:12:44:09	15,67	15.669,10
11	10:11:35:31	8:11:57:21	18,54	13.213,37
12	9:15:46:14.	9:01:41:33	18,14	10.660,00
13	9:03:10:59	11:21:49:28	21,99	9.331,60
14	8:15:47:13	14:09:27:50	24,68	8.033,26
15	8:07:34:47	17:22:08:37	28,68	7.182,29
16	7:18:24:08	17:10:52:58	26,18	6.213,33
17	7:16:09:36	23:15:09:57	33,36	6.521,98
18	7:02:43:09	21:05:23:22	28,3	6.401,88
19	6:22:48:58	25:05:57:08	31,89	6.602,50
20	6:18:15:07	28:09:29:10	34,07	6.760,42
21	6:16:11:17	33:08:23:46	38,11	7.008,02
22	6:14:32:42	38:12:26:22	42,02	7.266,11
23	6:08:42:31	39:12:44:52	41,25	7.316,88
24	6:07:43:07	44:21:41:48	44,9	7.585,83
25	6:04:16:36	47:15:21:48	45,73	7.722,22
26	6:11:16:13	61:09:28:26	56,67	8.410,28
27	6:07:57:22	64:03:15:43	57,01	8.547,19
28	6:04:52:26	66:20:55:11	57,32	8.683,89
29	6:01:04:52	68:11:48:12	56,68	8.764,44
30	5:23:29:08	72:13:01:05	58,03	8.967,71
31	5:21:29:10	75:22:31:15	58,79	9.137,47
32	5:22:18:40	82:22:24:26	62,2	9.486,67
33	5:21:26:09	87:15:49:48	63,75	9.723,54
34	5:20:39:40	92:10:55:48	65,26	9.962,71
35	5:20:39:40	98:07:35:29	67,42	10.255,73
36	5:20:39:40	104:04:15:10	69,45	10.548,75

37	5:20:39:40	110:00:54:50	71,38	10.841,77
38	5:20:39:40	115:21:34:31	73,2	11.134,79
39	5:20:33:54	121:14:28:59	74,83	11.419,69
40	5:20:27:18	127:06:38:53	76,37	11.704,17
41	5:20:27:18	133:03:06:11	77,93	
42	5:20:27:18	138:23:33:30	79,42	
43	5:20:27:18	144:20:00:48	80,84	
44	5:20:27:18	150:16:28:06	82,19	
45	5:20:27:18	156:12:55:25	83,49	
46	5:20:27:18	162:09:22:43	84,73	
47	5:20:27:18	168:05:50:01	85,91	
48	5:20:27:18	174:02:17:20	87,05	
49	5:20:27:18	179:22:44:38	88,14	
50	5:20:27:18	185:19:11:56	89,18	

## 6.2 Resto de escenarios.

Para completar el estudio, se han realizado una serie amplia de escenarios, cambiando en todos ellos el número de obreros de 2 a 40, ya que durante las simulaciones se comprobó que más allá de 40 trabajadores no influenciaban prácticamente nada los resultados obtenidos.

Se han realizado simulaciones modificando el número máximo de trabajadores permitidos en las estaciones de producción, desde un número de dos hasta el máximo establecido en las bases de la simulación.

<b>Activity SF</b>	MAX	Men	Men	Men	Men	Men	Men	Men	Men
Level setup	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Assembly	8	2	3	4	5	6	7	8	8
Welding	10	2	3	4	5	6	7	8	9
Finishing	4	2	3	4	4	4	4	4	4
Outfitting (pipes, pumps)	3	2	3	3	3	3	3	3	3
<b>Activity BP and FL</b>									
Level setup	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Assembly	4	2	3	4	4	4	4	4	4
Welding	6	2	3	4	5	6	6	6	6
Finishing	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Outfitting (pipes)	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Outfitting (accessories)	3	2	3	3	3	3	3	3	3

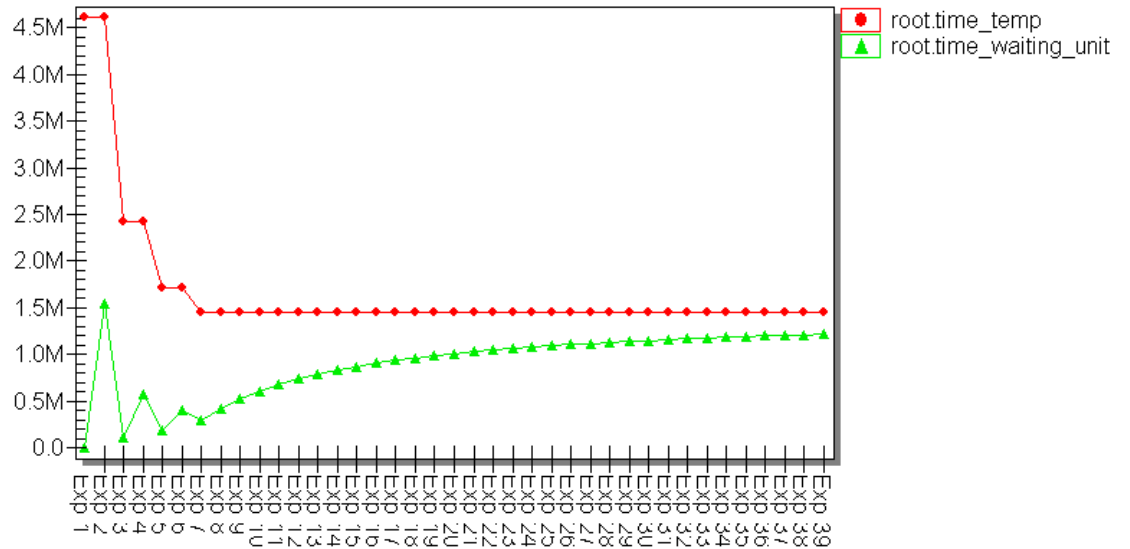
Los resultados obtenidos para estos escenarios se muestran a continuación, pudiendo hacer en todos ellos las mismas apreciaciones que en el caso inicial.

Resultados:

**Caso 22222-22222:**

Type		Activity		Men
SF02		Level setup		2
SF02		Assembly		2
SF02		Welding		2
SF02		Finishing		2
SF02		Outfitting (pipes, pumps)		2
FL01 y BP01		Level setup		2
FL01 y BP01		Assembly		2
FL01 y BP01		Welding		2
FL01 y BP01		Finishing		2
FL01 y BP01		Outfitting (pipes)		2
FL01 y BP01		Outfitting (accessories)		2

Min-max intervals of selected result values



TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,38	0,08	0
3	53,38	53,38	17,79
4	27,96	5,13	1,25
5	27,96	33,13	6,63
6	19,88	12,58	2,08
7	19,88	32,50	4,63
8	16,71	27,17	3,38
9	16,71	43,92	4,88
10	16,71	60,63	6,04
11	16,71	77,38	7,00
12	16,71	94,13	7,83
13	16,71	110,88	8,50
14	16,71	127,63	9,08
15	16,71	144,38	9,63
16	16,71	161,13	10,04
17	16,71	177,88	10,46
18	16,71	194,63	10,79
19	16,71	211,38	11,13
20	16,71	228,13	11,38
21	16,71	244,88	11,63
22	16,71	261,63	11,88
23	16,71	278,38	12,08

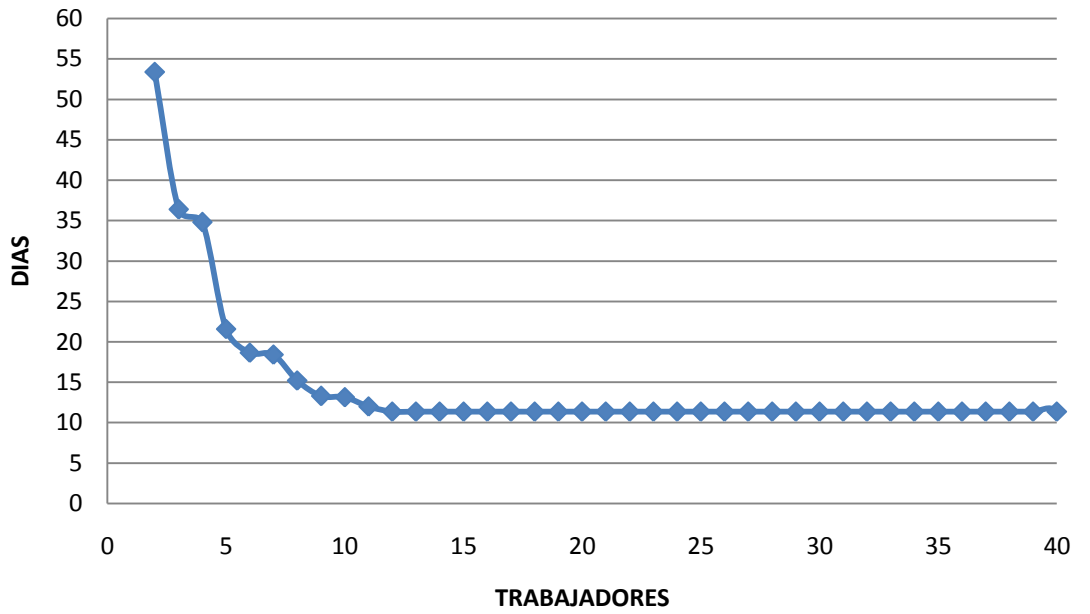
24	16,71	295,13	12,29
25	16,71	311,88	12,46
26	16,71	328,63	12,63
27	16,71	345,38	12,79
28	16,71	362,13	12,92
29	16,71	378,88	13,04
30	16,71	395,63	13,17
31	16,71	412,34	13,29
32	16,71	429,09	13,38
33	16,71	445,84	13,50
34	16,71	462,59	13,59
35	16,71	479,34	13,67
36	16,71	496,09	13,75
37	16,71	512,84	13,84
38	16,71	529,59	13,92
39	16,71	546,34	14,00
40	16,71	563,09	14,04

### Caso 23323-23333:

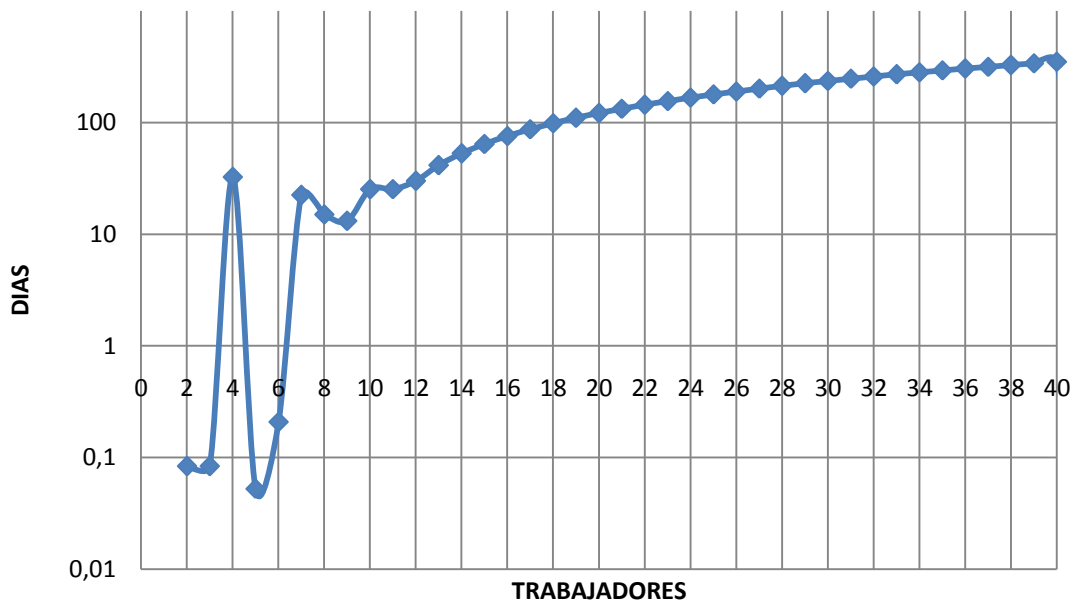
Type		Activity	Men
SF02		Level setup	2
SF02		Assembly	3
SF02		Welding	3
SF02		Finishing	3
SF02		Outfitting (pipes, pumps)	3
FL01 y BP01		Level setup	2
FL01 y BP01		Assembly	3
FL01 y BP01		Welding	3
FL01 y BP01		Finishing	2
FL01 y BP01		Outfitting (pipes)	3
FL01 y BP01		Outfitting (accessories)	3

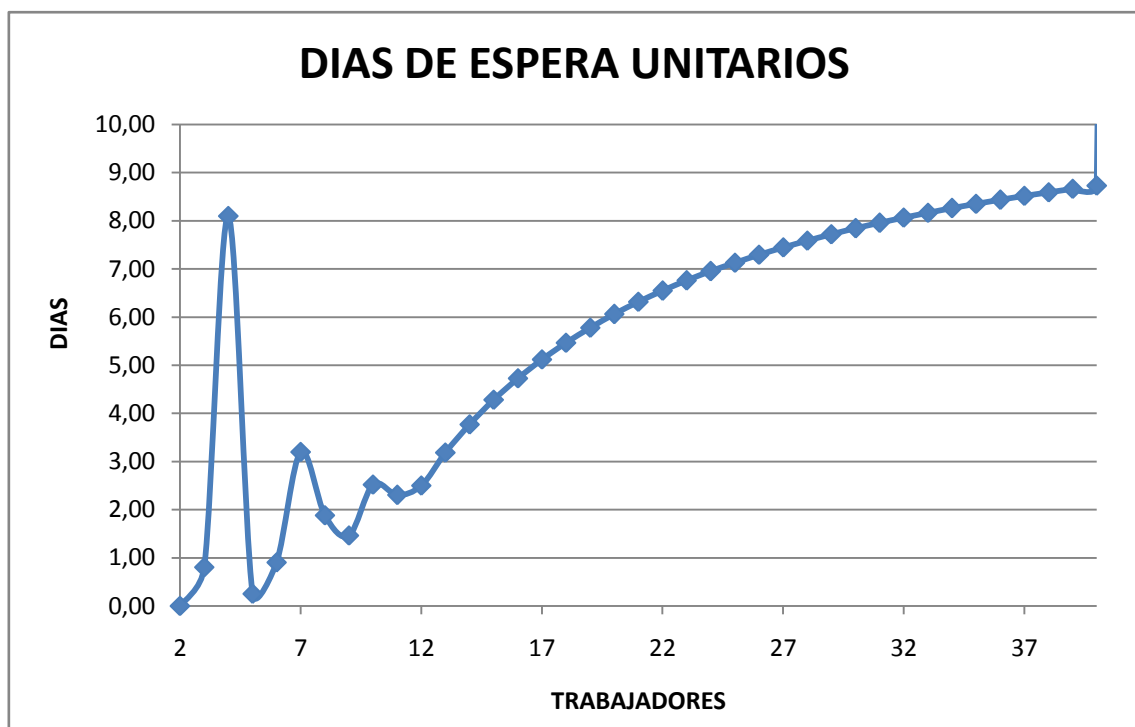


### TIEMPO TOTAL DE FABRICACIÓN



### TIEMPO DE ESPERA TOTAL

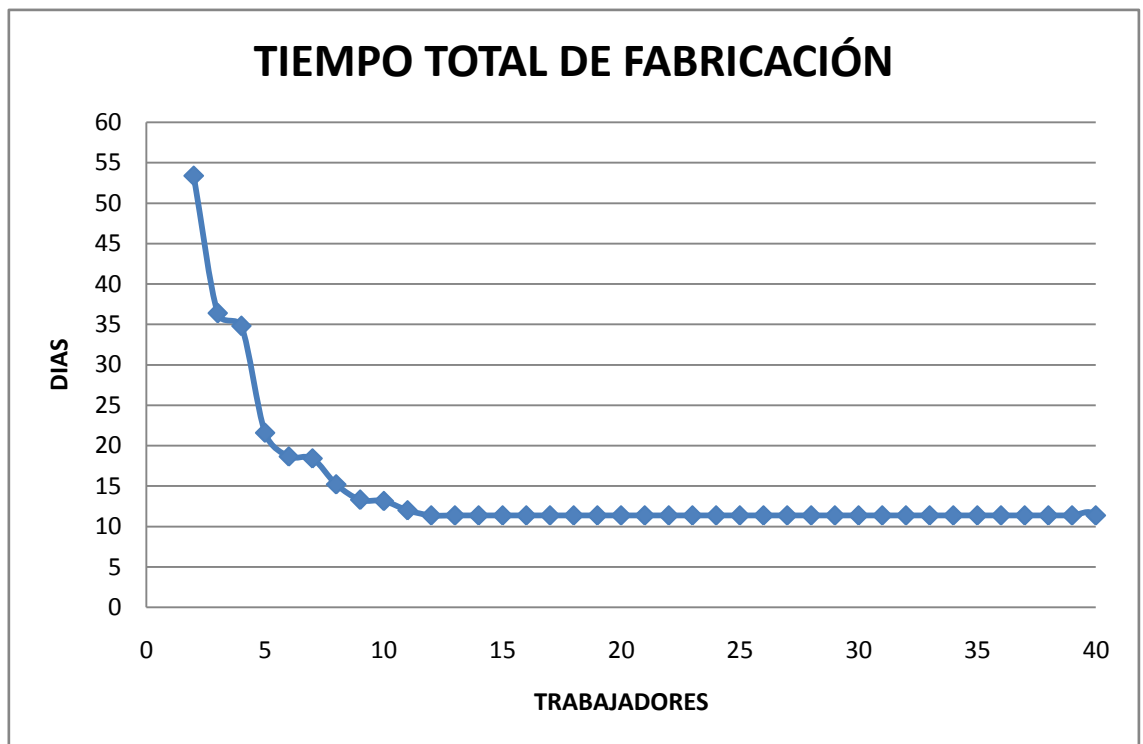


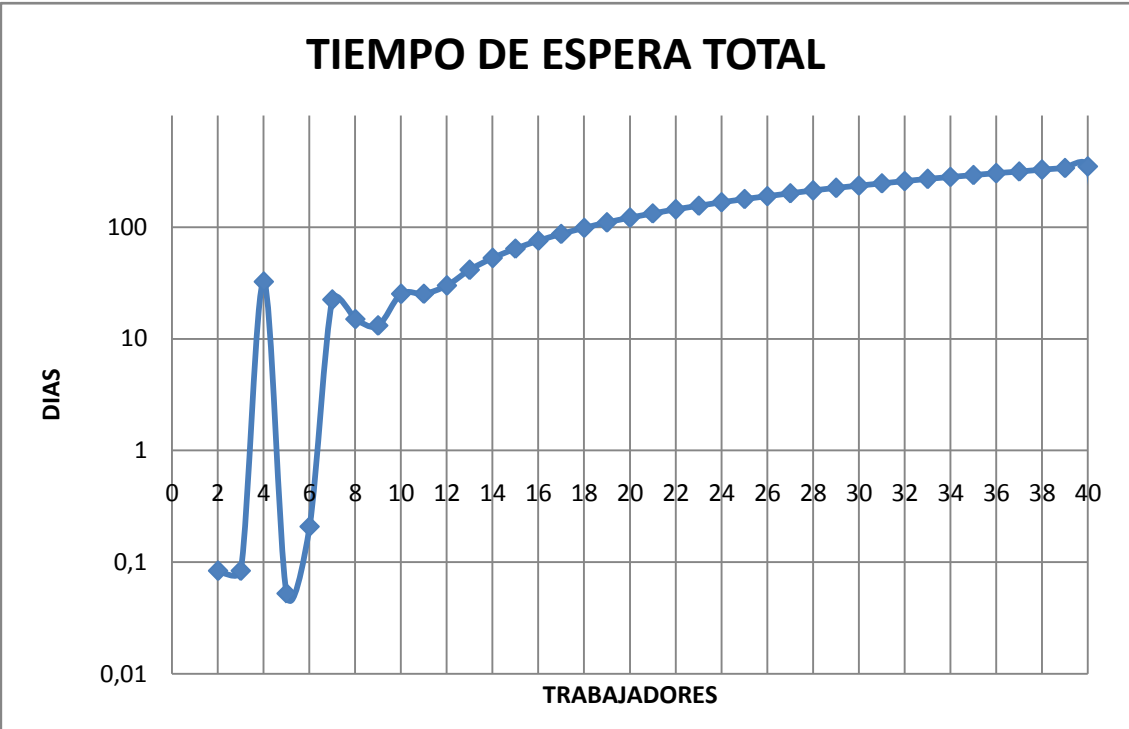


TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,38	0,08	0,00
3	36,38	0,08	0,81
4	34,79	32,38	8,10
5	21,58	0,05	0,25
6	18,67	0,21	0,90
7	18,42	22,38	3,20
8	15,21	15,04	1,88
9	13,29	13,13	1,46
10	13,17	25,21	2,52
11	12,00	25,29	2,30
12	11,38	29,96	2,50
13	11,38	41,38	3,18
14	11,38	52,79	3,77
15	11,38	64,17	4,28
16	11,38	75,58	4,73
17	11,38	87,00	5,12
18	11,38	98,38	5,47
19	11,38	109,79	5,78
20	11,38	121,21	6,06

21	11,38	132,58	6,31
22	11,38	144,00	6,55
23	11,38	155,38	6,76
24	11,38	166,79	6,95
25	11,38	178,21	7,13
26	11,38	189,59	7,29
27	11,38	201,00	7,45
28	11,38	212,42	7,59
29	11,38	223,79	7,72
30	11,38	235,21	7,84
31	11,38	246,59	7,96
32	11,38	258,00	8,06
33	11,38	269,42	8,16
34	11,38	280,79	8,26
35	11,38	292,21	8,35
36	11,38	303,63	8,43
37	11,38	315,00	8,51
38	11,38	326,42	8,59
39	11,38	337,79	8,66
40	11,38	349,21	8,73

**Caso 24423-24443:**

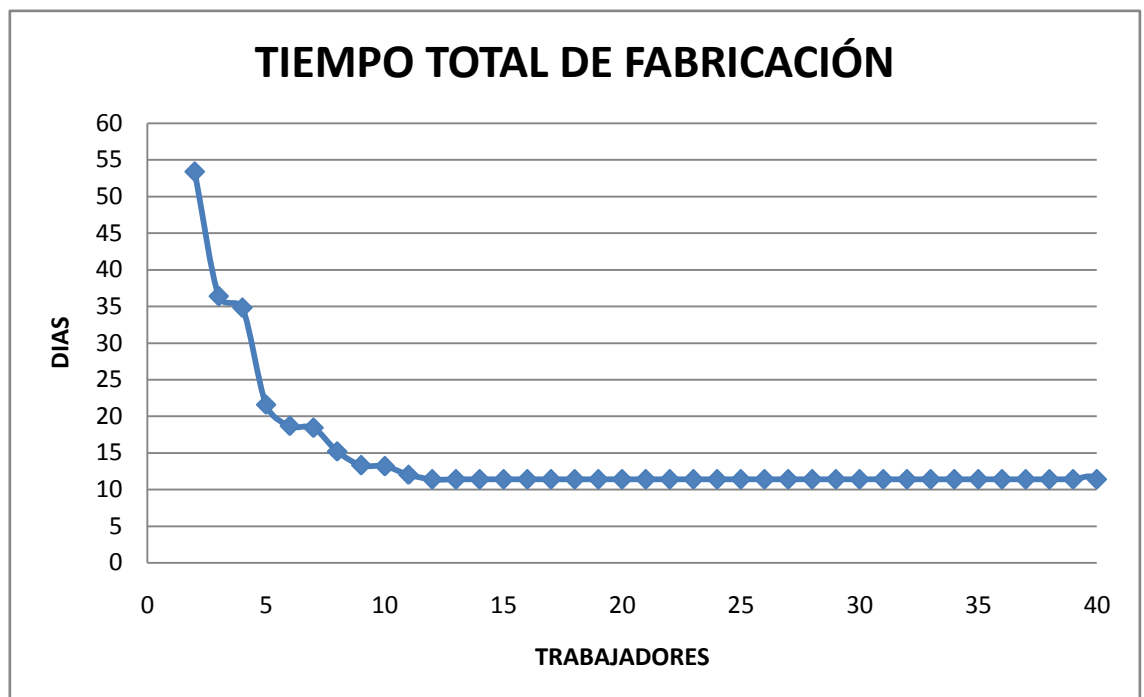


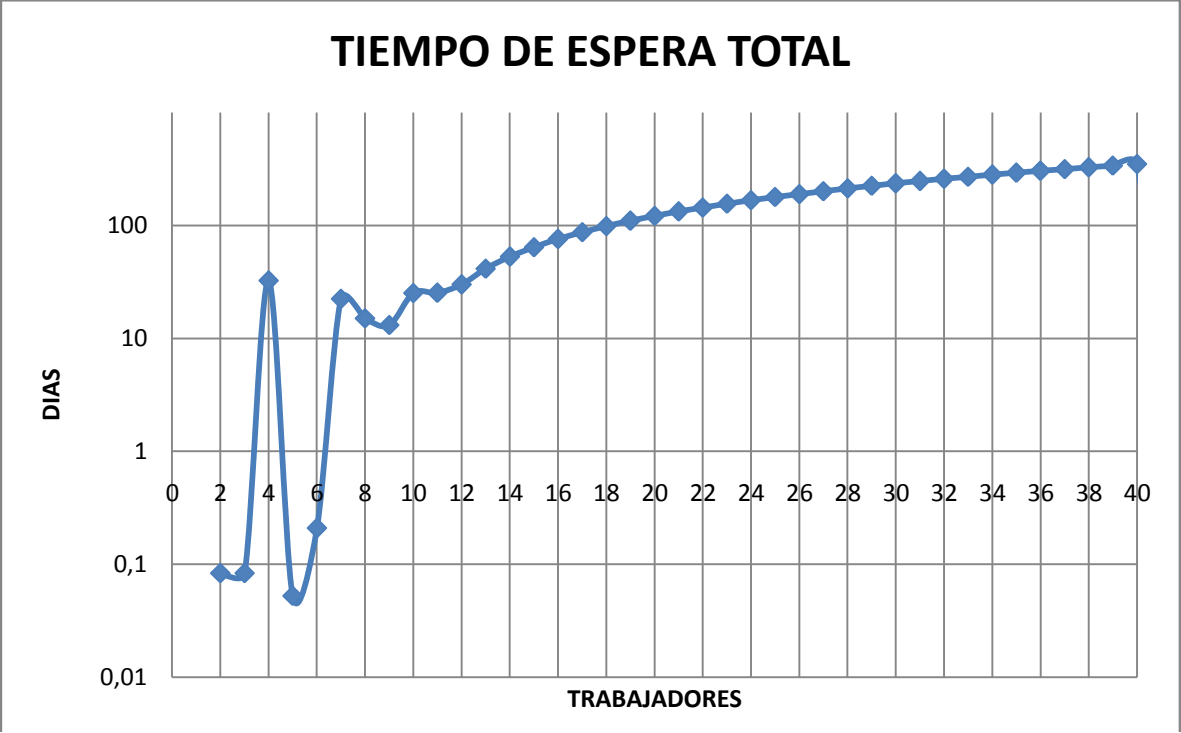


TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,38	0,00	0,00
3	36,38	53,41	0,81
4	26,96	5,14	0,28
5	26,04	33,13	4,69
6	18,13	12,62	0,36
7	15,88	32,53	0,63
8	14,13	271694,44	0,81
9	14,08	439174,77	2,23
10	11,67	60665,51	1,02
11	11,00	774135,42	1,30
12	10,17	941615,74	1,30
13	10,17	1109096,07	1,98
14	9,58	1276576,39	1,99
15	8,92	144405,67	1,84
16	8,83	1611537,04	2,20
17	8,83	1779017,36	2,59
18	8,83	1946497,69	2,94
19	8,83	2113978,01	3,25
20	8,83	228145,83	3,53
21	8,83	2448938,66	3,79
22	8,83	2616418,98	4,02
23	8,83	2783899,31	4,23
24	8,83	2951379,63	4,42
25	8,84	311886,00	4,60
26	8,84	3286340,28	4,77
27	8,84	3453820,60	4,92
28	8,84	3621300,93	5,06
29	8,84	3788781,25	5,19
30	8,84	395626,16	5,31
31	8,84	4123741,90	5,43
32	8,84	4291222,22	5,54
33	8,84	4458702,55	5,64
34	8,84	4626182,87	5,73
35	8,84	479366,32	5,82
36	8,84	4961143,52	5,91
37	8,84	5128623,84	5,99
38	8,84	5296104,17	6,06
39	8,84	5463584,49	6,14
40	8,84		6,20

### Caso 24523-25543:

Type		Activity	Men
SF02		Level setup	2
SF02		Assembly	5
SF02		Welding	5
SF02		Finishing	4
SF02		Outfitting (pipes, pumps)	3
FL01 y BP01		Level setup	2
FL01 y BP01		Assembly	4
FL01 y BP01		Welding	5
FL01 y BP01		Finishing	2
FL01 y BP01		Outfitting (pipes)	3
FL01 y BP01		Outfitting (accessories)	3



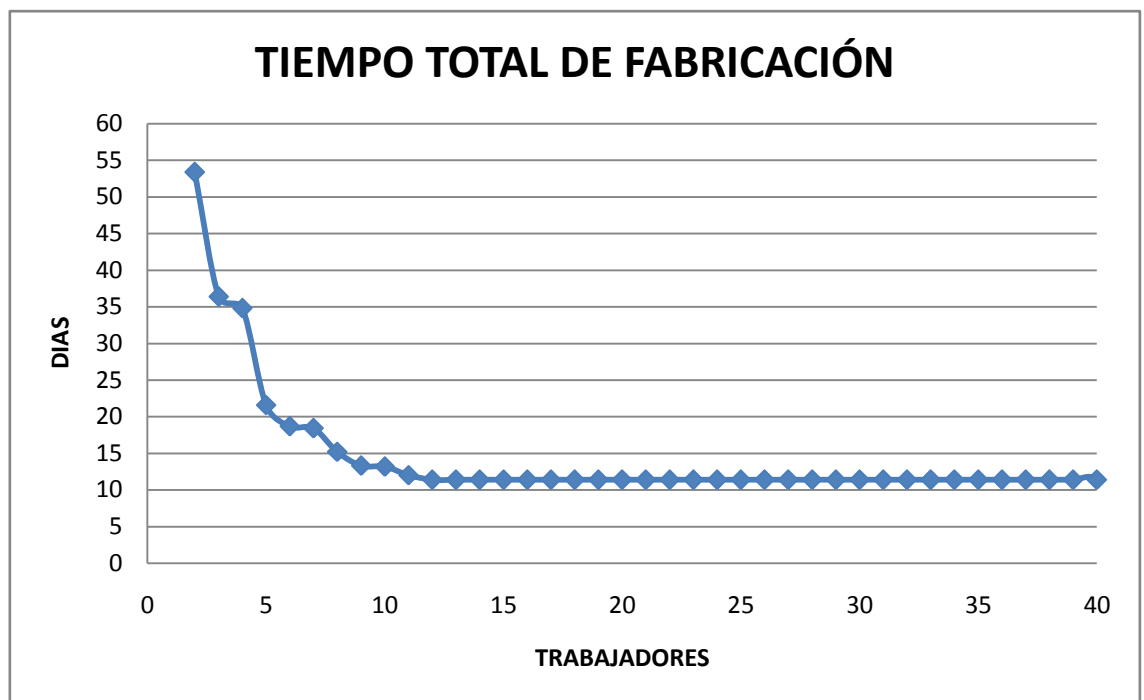


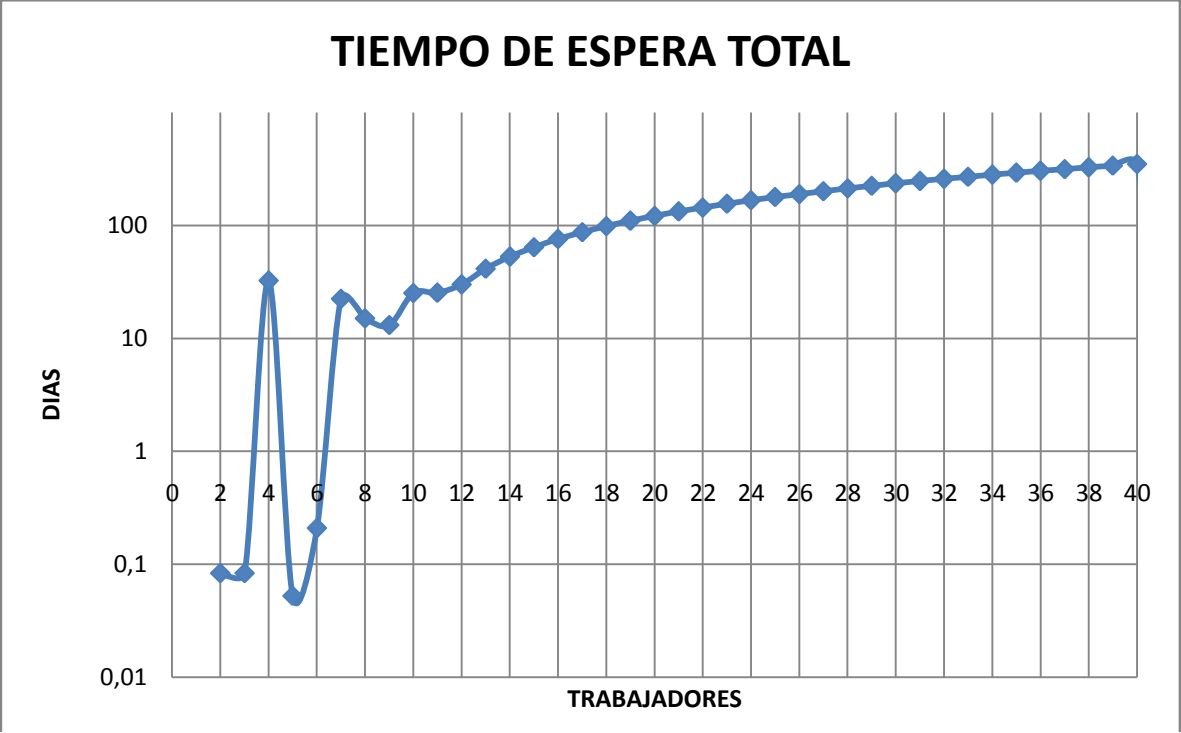
TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,41	0,08	0,00
3	36,41	2,42	0,81
4	26,99	1,13	0,28
5	22,66	0,25	1,30
6	18,41	3,63	0,61
7	15,65	2,75	0,40
8	13,76	3,25	0,41
9	12,55	0,26	0,68
10	11,62	0,39	0,94
11	11,30	17,50	1,59
12	9,84	11,58	0,97
13	9,39	15,25	1,17
14	8,87	17,33	1,24
15	8,47	20,21	1,35
16	8,41	27,67	1,73
17	8,43	36,54	2,15
18	7,86	34,71	1,93
19	7,56	36,88	1,94
20	7,56	44,42	2,22
21	7,56	52,00	2,48
22	7,56	59,54	2,71
23	7,56	67,13	2,92
24	7,56	74,67	3,11
25	7,56	82,25	3,29
26	7,56	89,79	3,46
27	7,56	97,38	3,61
28	7,56	104,92	3,75
29	7,56	112,50	3,88
30	7,56	120,09	4,00
31	7,56	127,63	4,12
32	7,56	135,21	4,23
33	7,56	142,75	4,33
34	7,56	150,34	4,42
35	7,56	157,88	4,51
36	7,56	165,46	4,60
37	7,56	173,00	4,68
38	7,56	180,58	4,75
39	7,56	188,13	4,82
40	7,56	195,71	4,89



### Caso 24623-26643:

Type		Activity		Men
SF02		Level setup		2
SF02		Assembly		6
SF02		Welding		6
SF02		Finishing		4
SF02		Outfitting (pipes, pumps)		3
FL01 y BP01		Level setup		2
FL01 y BP01		Assembly		4
FL01 y BP01		Welding		6
FL01 y BP01		Finishing		2
FL01 y BP01		Outfitting (pipes)		3
FL01 y BP01		Outfitting (accessories)		3

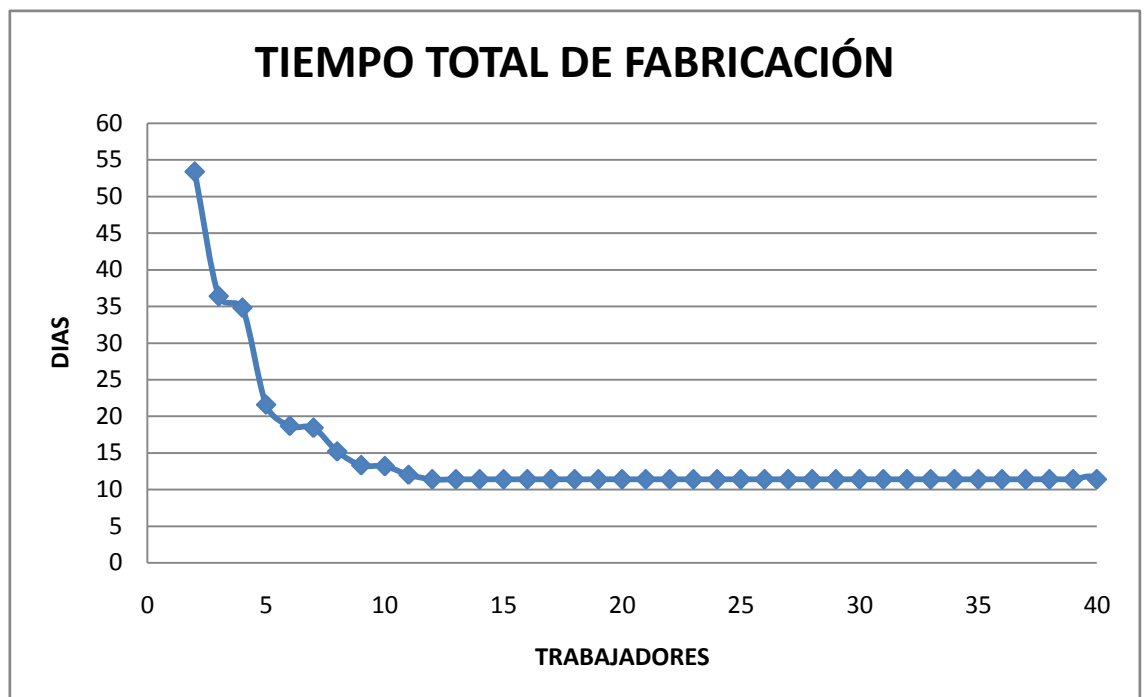


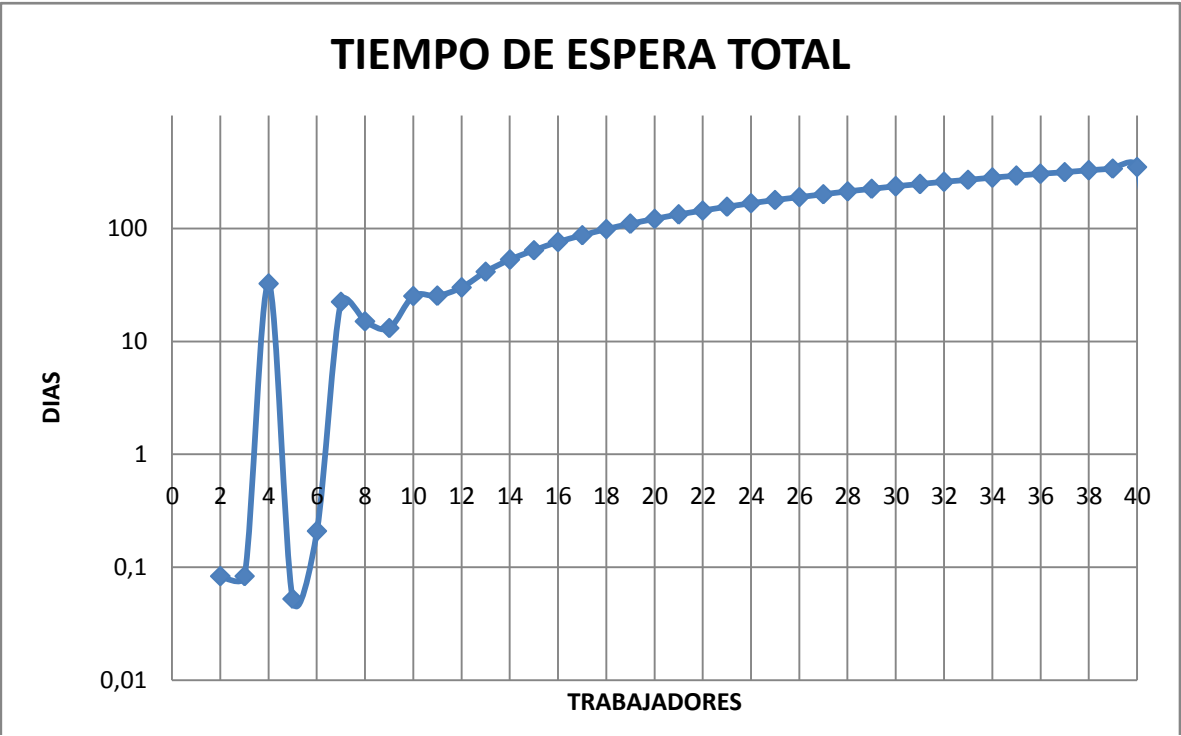


TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,41	0,08	0,00
3	36,41	2,42	0,81
4	26,99	1,13	0,28
5	22,66	0,25	1,30
6	18,03	1,38	0,23
7	15,92	4,58	0,66
8	13,69	2,71	0,34
9	12,62	0,26	0,75
10	11,45	0,30	0,77
11	10,84	12,38	1,13
12	9,92	12,63	1,05
13	9,70	19,25	1,48
14	8,81	16,50	1,18
15	8,54	21,25	1,42
16	8,22	24,67	1,54
17	7,65	23,17	1,37
18	7,41	26,54	1,48
19	7,34	32,63	1,72
20	7,40	41,13	2,06
21	7,14	43,04	2,05
22	6,90	44,88	2,04
23	6,77	48,83	2,12
24	6,77	55,58	2,32
25	6,77	62,34	2,49
26	6,77	69,13	2,66
27	6,77	75,88	2,81
28	6,77	82,67	2,95
29	6,77	89,42	3,08
30	6,77	96,17	3,21
31	6,77	102,96	3,32
32	6,77	109,71	3,43
33	6,77	116,50	3,53
34	6,77	123,25	3,63
35	6,77	130,04	3,72
36	6,77	136,79	3,80
37	6,77	143,54	3,88
38	6,77	150,33	3,96
39	6,77	157,08	4,03
40	6,77	163,88	4,10

### Caso 24623-27743:

Type		Activity	Men
SF02		Level setup	2
SF02		Assembly	7
SF02		Welding	7
SF02		Finishing	4
SF02		Outfitting (pipes, pumps)	3
FL01 y BP01		Level setup	2
FL01 y BP01		Assembly	4
FL01 y BP01		Welding	6
FL01 y BP01		Finishing	2
FL01 y BP01		Outfitting (pipes)	3
FL01 y BP01		Outfitting (accessories)	3

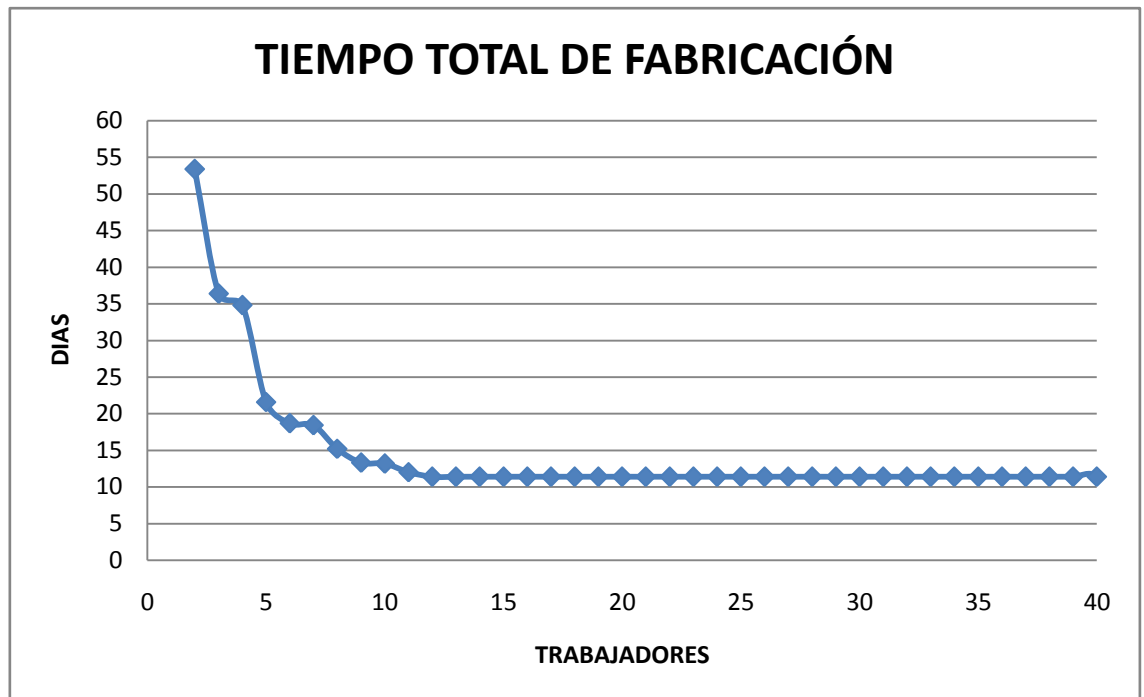


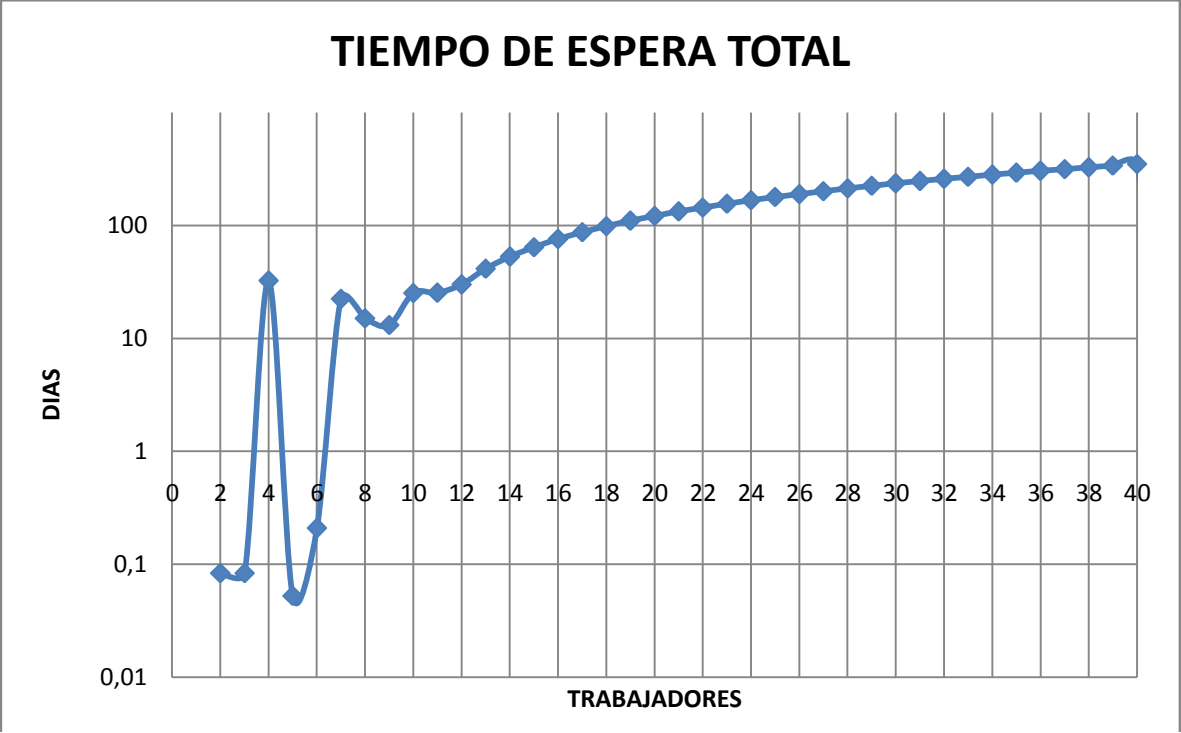


TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,41	0,08	0,00
3	36,41	2,42	0,81
4	26,99	1,13	0,28
5	22,66	0,25	1,30
6	18,03	1,38	0,23
7	15,61	2,42	0,35
8	14,43	8,63	1,08
9	12,44	0,21	0,57
10	11,41	0,30	0,73
11	10,40	0,30	0,69
12	9,88	12,04	1,01
13	9,43	15,75	1,21
14	8,72	15,25	1,09
15	8,62	22,50	1,50
16	7,98	20,83	1,30
17	7,68	23,75	1,40
18	7,37	25,75	1,43
19	7,25	31,00	1,63
20	6,76	28,29	1,41
21	6,75	34,96	1,67
22	6,75	41,63	1,89
23	6,92	52,33	2,28
24	6,74	54,83	2,28
25	6,56	57,13	2,29
26	6,40	59,59	2,29
27	6,34	64,42	2,39
28	6,34	70,75	2,53
29	6,34	77,09	2,66
30	6,34	83,46	2,78
31	6,34	89,79	2,90
32	6,34	96,13	3,00
33	6,34	102,46	3,11
34	6,34	108,84	3,20
35	6,34	115,17	3,29
36	6,34	121,50	3,38
37	6,34	127,83	3,46
38	6,34	134,17	3,53
39	6,34	140,54	3,60
40	6,34	146,88	3,67

### Caso 24623-28843:

Type		Activity	Men
SF02		Level setup	2
SF02		Assembly	8
SF02		Welding	8
SF02		Finishing	4
SF02		Outfitting (pipes, pumps)	3
FL01 y BP01		Level setup	2
FL01 y BP01		Assembly	4
FL01 y BP01		Welding	6
FL01 y BP01		Finishing	2
FL01 y BP01		Outfitting (pipes)	3
FL01 y BP01		Outfitting (accessories)	3



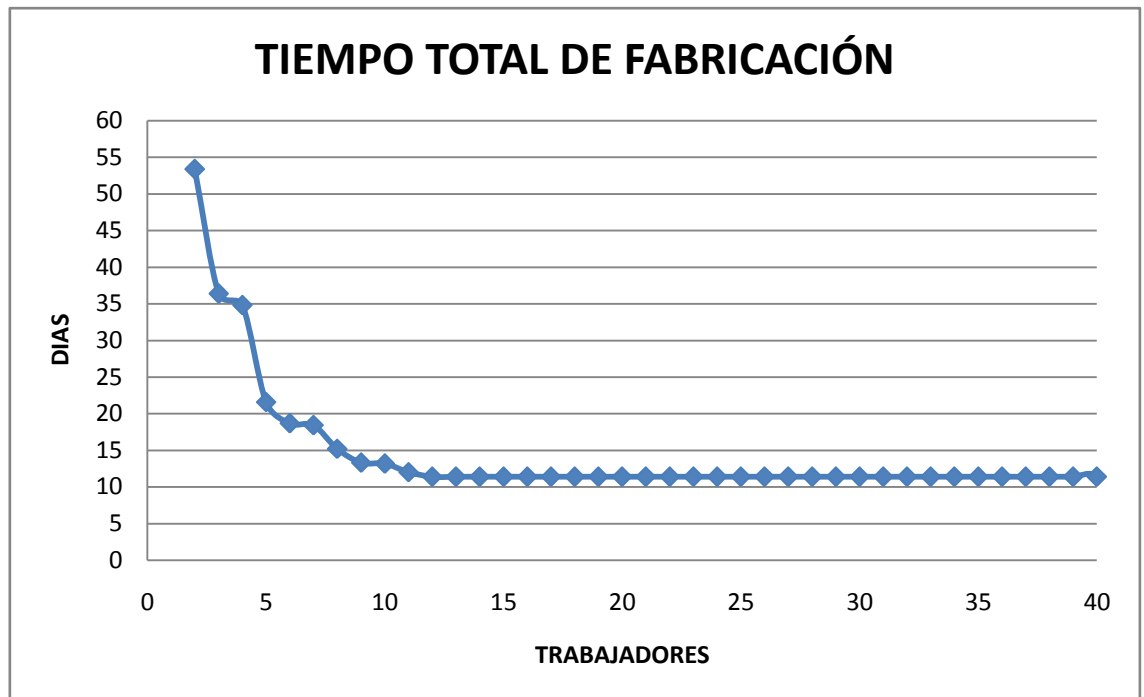


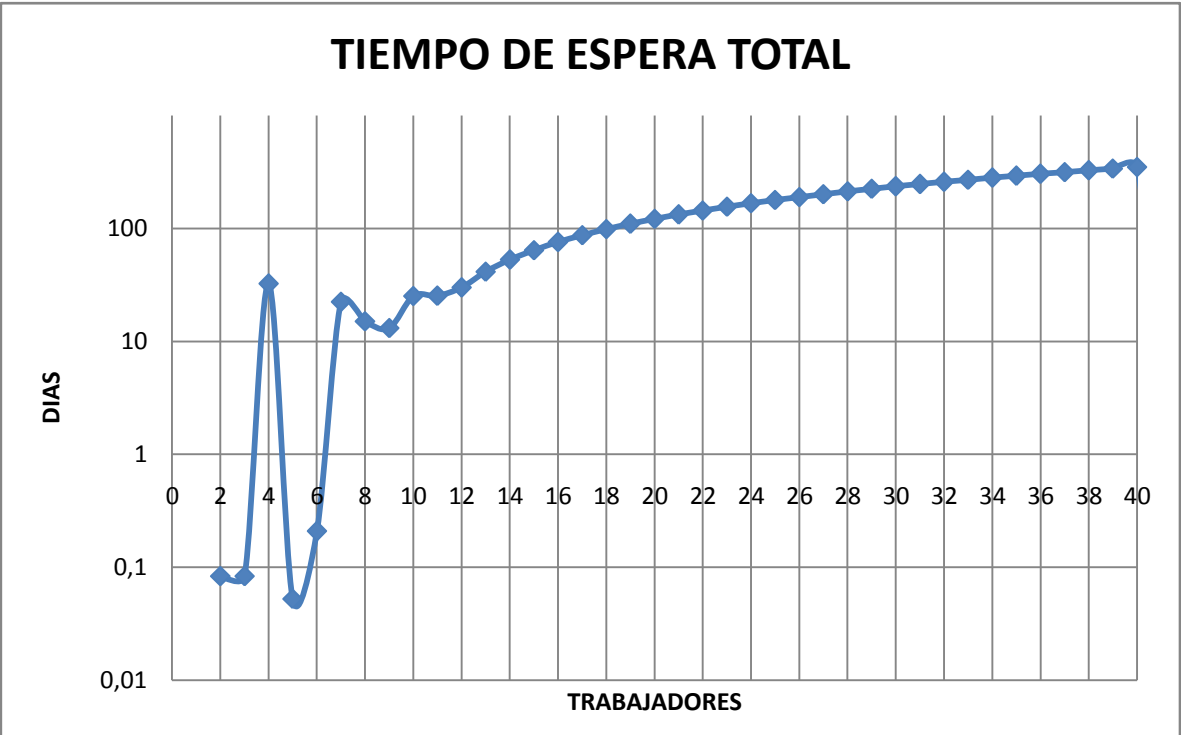


TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,41	0,08	0,00
3	36,41	2,42	0,81
4	26,99	1,13	0,28
5	22,66	0,25	1,30
6	18,03	1,38	0,23
7	15,61	2,42	0,35
8	13,77	3,38	0,42
9	12,54	0,25	0,67
10	11,43	0,29	0,75
11	10,55	0,39	0,84
12	9,63	0,38	0,76
13	9,21	12,88	0,99
14	8,78	16,08	1,15
15	8,42	19,42	1,30
16	7,87	19,13	1,20
17	7,80	25,79	1,52
18	7,14	21,75	1,21
19	6,94	24,96	1,31
20	6,82	29,63	1,48
21	6,71	34,04	1,62
22	6,68	40,04	1,82
23	6,38	39,88	1,73
24	6,38	46,25	1,93
25	6,38	52,63	2,11
26	6,56	63,84	2,46
27	6,42	66,42	2,46
28	6,28	68,96	2,46
29	6,16	71,79	2,48
30	6,04	74,42	2,48
31	6,02	79,92	2,58
32	6,02	85,96	2,69
33	6,02	91,96	2,79
34	6,02	98,00	2,88
35	6,02	104,00	2,97
36	6,02	110,04	3,06
37	6,02	116,04	3,14
38	6,02	122,08	3,21
39	6,02	128,13	3,29
40	6,02	134,13	3,35

### Caso 24623-28943:

Type		Activity	Men
SF02		Level setup	2
SF02		Assembly	8
SF02		Welding	9
SF02		Finishing	4
SF02		Outfitting (pipes, pumps)	3
FL01 y BP01		Level setup	2
FL01 y BP01		Assembly	4
FL01 y BP01		Welding	6
FL01 y BP01		Finishing	2
FL01 y BP01		Outfitting (pipes)	3
FL01 y BP01		Outfitting (accessories)	3





TRABAJADORES	TIEMPO TOTAL DE PRODUCCIÓN (DIAS)	TIEMPO TOTAL DE ESPERA(DIAS)	TIEMPO DE ESPERA UNITARIO (DIAS)
2	53,41	0,08	0,00
3	36,41	2,42	0,81
4	26,99	1,13	0,28
5	22,66	6,50	1,30
6	18,03	1,38	0,23
7	15,61	2,42	0,35
8	13,77	3,38	0,42
9	12,47	5,42	0,61
10	11,38	6,92	0,70
11	10,51	8,83	0,80
12	9,63	9,04	0,76
13	9,16	12,25	0,94
14	8,71	15,13	1,08
15	8,36	18,54	1,24
16	7,80	18,04	1,13
17	7,72	24,38	1,44
18	7,12	21,38	1,19
19	6,94	24,96	1,32
20	6,78	28,67	1,43
21	6,71	34,08	1,62
22	6,63	39,00	1,77
23	6,37	39,67	1,73
24	6,34	45,42	1,89
25	6,19	47,84	1,91
26	6,51	62,46	2,40
27	6,37	65,09	2,41
28	6,24	67,88	2,43
29	6,09	69,63	2,40
30	5,99	72,79	2,43
31	5,95	77,71	2,51
32	5,95	83,67	2,61
33	5,94	89,25	2,71
34	5,94	95,21	2,80
35	5,94	101,13	2,89
36	5,93	106,58	2,96
37	5,93	112,54	3,04
38	5,93	118,46	3,12
39	5,93	124,38	3,19
40	5,93	130,29	3,26

## Conclusiones:

La simulación de la producción es una potente herramienta que nos puede ayudar a resolver problemas de producción, a escoger la solución más adecuada en determinados momentos del proceso, a tener soluciones rápidas a problemas complejos, a tomar decisiones en momentos de retardos de plazos de entrega, a realizar una estrategia constructiva visualizando diferentes escenarios... Podemos decir que la simulación de la producción nos permite tener un punto de vista objetivo donde hasta ahora se tenía a la experiencia como único aliado.

Una combinación de experiencia y herramientas de simulación de la producción, nos permitirán ejecutar los trabajos de producción y planificación con una mayor productividad.

A la vista de los resultados obtenidos, debemos mencionar que la simulación debe servir como ayuda a la producción sin caer en la tentación de aceptar los resultados como auténticas copias de la realidad. Hemos visto todas las hipótesis de partida que se han tomado. Algunas asumibles completamente, otras más alejadas de la realidad. Podemos ser tan precisos como queramos a la hora de asumir hipótesis en la producción, pero en muchos casos, esto llevará implícito un aumento significativo de la complejidad del modelo.

Para nuestro modelo podemos decir que una solución “óptima” sería la adopción de 9 a 12 trabajadores. El concepto de óptimo implica alcanzar el máximo o mínimo de algunas funciones objetivos (tiempo, coste de producción, productividad, etc.), funciones que el proyecto Marstruc no especifica. Para poder decir que un resultado es mejor que otro deberemos responder a la cuestión ¿Respecto a qué?. Con una combinación de resultados obtenidos en la simulación, seremos capaces de acotar la “solución óptima” en un intervalo bastante pequeño.

## Bibliografía.

- BANKS, Jerry; CARSON II, John S.; NELSON, Barry L.: *Discrete-event system simulation*. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 548p.
- HARTMANN, Catherine: *Une approche utilisant une simulation en boucle fermée pour améliorer les performances d'un ordonnancement d'atelier*. Toulouse : E.N.S.E.E.I.H.T., 1987. 224 p.
- HALUK, PhD Bekiroglu : *Simulation in inventory and production control*. La Jolla (California): Society of computer simulation, 1983. 63 p.
- RULE, Keith: *eM-Plant 7.0 user guide*. Tecnomatix Technologies GmbH & Co. KG., 2003. 1700 p.
- MARTINEZ, Jose Alfonso: *Apuntes de clase del curso "Sistemas de construcción de buques y artefactos"*. Cartagena, 2007.