



TRABAJO FIN DE MÁSTER

“SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN”

**Departamento de Ingeniería Mecánica,
Energética y de Materiales**

MEMORIA

Alumno: Rubén Rodríguez Vilches

Tutora: Cristina Azcárate

Fecha: 15/09/2017

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| 1. OBJETO DEL TFM | 4 |
| 2. CONCEPTOS GENERALES | 6 |
| 2.1. QUÉ ES LA SIMULACIÓN..... | 6 |
| 2.2. FASES DEL PROCESO DE MODELIZACIÓN | 8 |
| 2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN | 10 |
| 2.4. FUNCIONAMIENTO DE LA SIMULACIÓN | 11 |
| 3. DISEÑO DE LA PIEZA | 16 |
| 3.1. DESCRIPCIÓN..... | 16 |
| 3.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS..... | 18 |
| 4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA REAL..... | 22 |
| 4.1. LLEGADA DE PIEZAS | 22 |
| 4.2. CÉLULA DE FRESADO..... | 23 |
| 4.3. HORNO DE CEMENTACIÓN | 27 |
| 4.4. RECTIFICADO EXTERIOR..... | 29 |
| 4.5. CÉLULA DE RECTIFICADO INTERIOR..... | 34 |
| 4.6. MONTAJE | 36 |
| 4.7. VERIFICACIÓN..... | 40 |
| 4.8. EMBALAJE..... | 41 |
| 4.9. METROLOGÍA | 41 |
| 4.10. TURNOS DE TRABAJO | 44 |
| 4.11. ESQUEMA PRELIMINAR DEL SISTEMA | 45 |
| 4.12. DISPOSICIÓN DE LA PLANTA DE FABRICACIÓN | 45 |
| 5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN..... | 54 |
| 5.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN..... | 54 |
| 5.2. ANÁLISIS DE DATOS | 54 |
| 5.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN | 69 |
| 5.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)..... | 118 |
| 5.5. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE VARIANZA (TRV)..... | 124 |
| 5.6. VALIDACIÓN DEL MODELO | 132 |
| 6. RESULTADOS ESCENARIO ACTUAL | 136 |
| 7. EVALUACIÓN NUEVO ESCENARIO..... | 142 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 148 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 150 |
| 10. REVISTAS CIENTÍFICAS | 150 |

11. WEBGRAFÍA..... 151

1. OBJETO DEL TFM

Un proceso de fabricación, se define como el conjunto de operaciones unitarias necesarias para modificar una pieza en bruto. Dichas características pueden ser simplemente estéticas, como la forma o el tamaño, o también sus propiedades mecánicas, como la densidad, resistencia, dureza, etc.

El diseño de los procesos de fabricación cambió completamente gracias a la aparición de la simulación con ordenador. La simulación consiste en una técnica numérica para llevar a cabo experimentos sobre un modelo diseñado en base a un sistema real. La finalidad de estos experimentos es predecir el comportamiento del sistema y evaluar diferentes escenarios o estrategias durante largos periodos de tiempo.

La simulación se puede considerar que tiene su origen en 1777 con el experimento de la aguja de Buffon, que servía para aproximar el valor del número π . Este modelo matemático consiste en el lanzamiento de numerosas agujas, de longitud determinada, sobre un plano con líneas paralelas y separadas también por una distancia determinada y a partir de ahí, calcular cuál es la probabilidad de que la aguja caiga sobre una de las líneas. Posteriormente en 1812 Laplace complementó este experimento mejorando la solución y hoy en día se conoce como la solución Buffon-Laplace. Años más tarde, el estadístico William Sealy Gosset fue quién empezó a utilizar estas técnicas de simulación en procesos de control industriales, concretamente inició sus experimentos en la industria agrícola, en la destilería de Arthur Guinness.

Años más tarde, la aparición de los primeros ordenadores dio lugar a una rápida evolución en el ámbito de la simulación y fue en 1960 cuando el científico informático Keith Douglas Tocher, ideó un modelo de simulación basado en una planta de producción, en la cual las máquinas operaban de cuatro modos (Ocupado, Esperando, No disponible y Fallo), de esta manera los diferentes estados de funcionamiento de las máquinas variaban en el tiempo y podía saber la producción final de la planta.

El campo de la simulación llega a su gran periodo de expansión con la creación en 1967 del Winter Simulation Conference (WSC), lugar donde se archivan todas las aplicaciones de simulación. Desde entonces hasta la actualidad, el desarrollo de la simulación ha avanzado muy velozmente, gracias en parte al avance de los soportes informáticos que permiten crear novedosos softwares de simulación, con muy buenas bases de generación de datos y la posibilidad de aplicar la simulación con optimización.

Hoy en día, el campo de la simulación está muy avanzado, por lo que se ha convertido en una parte esencial de la industria. Los actuales softwares de simulación permiten modelar fielmente cualquier sistema real, y además la posibilidad de combinar con optimización ofrece la ventaja de poder valorar diferentes escenarios dentro de la empresa, para ver cuál de ellos ofrece mejores resultados y si dichos beneficios son considerables, proceder a aplicarlos en la empresa. Para reflejar de una manera más clara lo realmente importante que es la simulación en las industrias, se va a proponer la siguiente cuestión. ¿Usted compraría un coche sin realizar una prueba previa?, la respuesta es clara, no. Ocurre lo mismo en las empresas, ¿implementaría un nuevo sistema de logística o de inspección sin saber si realmente es efectivo? Cuando realiza la prueba de manejo del coche, usted puede elegir que ruta quiere seguir y que prestaciones quiere probar. En los modelos de simulación actuales es análogo, usted

puede probar tantos escenarios como desee y necesite probar, hasta dar con la solución que mejor se adapte a sus necesidades en su sistema real.

Se pretende crear en este Trabajo Fin de Máster un modelo de simulación que reproduzca fielmente la línea de mecanizado de una tuerca de bolas del eje de distribución de un vehículo comercial. Esta línea de producción va a estar basada en la línea de fabricación y montaje de la planta que tiene ZF-TRW en Pamplona. Esta fábrica tiene como objetivo suministrar a su cliente con 330.000 conjuntos de direcciones asistidas al año, más un pequeño porcentaje para poder estar cubiertos si sucedieran retrasos o problemas inesperados que puedan surgir. La entrada de material está pensada de tal manera que al año se reciben 356.160 tuercas de bolas, suponiendo que un año tiene 53 semanas completas y sabiendo que las llegadas de camiones con estas piezas son los lunes y jueves y en cada una de las llegadas los camiones abastecen de 3.360 tuercas al almacén de la fábrica. A simple vista se puede ver que existe suficiente materia prima como para cumplir con los objetivos de fabricación y tener siempre un stock con el que poder trabajar siempre sin parones.

Pese a que la fábrica cumple estos objetivos de número de conjuntos a entregar al cliente, se está observando que el sistema tiende a que se forme un cuello de botella cuando las tuercas mecanizadas llegan a la fase de montaje, y además el cliente a partir del año próximo está pensando en aumentar la demanda de 330.00 a 400.000 unidades al año. Por estos motivos se quiere estudiar una solución y evaluar la posibilidad de mejorar y ampliar dicha área y la de verificación con un operario más en cada turno y una máquina más. En el libro del 2002 titulado *MODELADO Y SIMULACIÓN. Aplicación a Procesos Logísticos y Servicios* de Miguel Ángel Piera, Antoni Guasch, Josep Casanovas y Jaume Figueres, se habla sobre que uno de los objetivos fundamentales de la aplicación de la simulación a los procesos industriales es la de evaluar la incidencia de pequeños cambios sobre algunos componentes, ya que pequeños cambios no controlados pueden desembocar en un comportamiento anómalo y no deseado del sistema lo que puede derivar en pérdidas económicas.

Para llevar a cabo esta evaluación, el primer objetivo de este trabajo es realizar un modelo de simulación que reproduzca fielmente el comportamiento del sistema real y posteriormente validar el modelo construido con el programa *ARENA*.

Finalmente, una vez que se tenga validado el modelo, se procederá con el propósito principal con el que se creó este modelo, evaluar el comportamiento del sistema al proponer un nuevo escenario de mejora, aumentar la capacidad de la fase de montaje con un operario más por turno, y la posterior fase de verificación, añadiendo una máquina más. Este nuevo escenario tiene que reportar resultados que, en primer lugar evidencien un alivio de la congestión que se crea a la entrada de esta fase de montaje, y en segundo lugar ver si solo con ese cambio se produce un aumento significativo de la producción, a fin de alcanzar el nuevo horizonte de demanda de ejes de distribución que quiere el cliente para el próximo año.

2. CONCEPTOS GENERALES

2.1. QUÉ ES LA SIMULACIÓN

La simulación según Shannon es “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar diferentes estrategias para el funcionamiento del sistema”. En general, se trata de un conjunto de métodos y técnicas estadísticas, cuyo objetivo es imitar y reproducir el comportamiento de un sistema real.

En la siguiente imagen sacada de la documentación de la asignatura “*Simulación y Optimización de Procesos Industriales*” impartida por Cristina Azcárate y Fermín Mayor, se puede ver un esquema de cómo funciona la simulación.

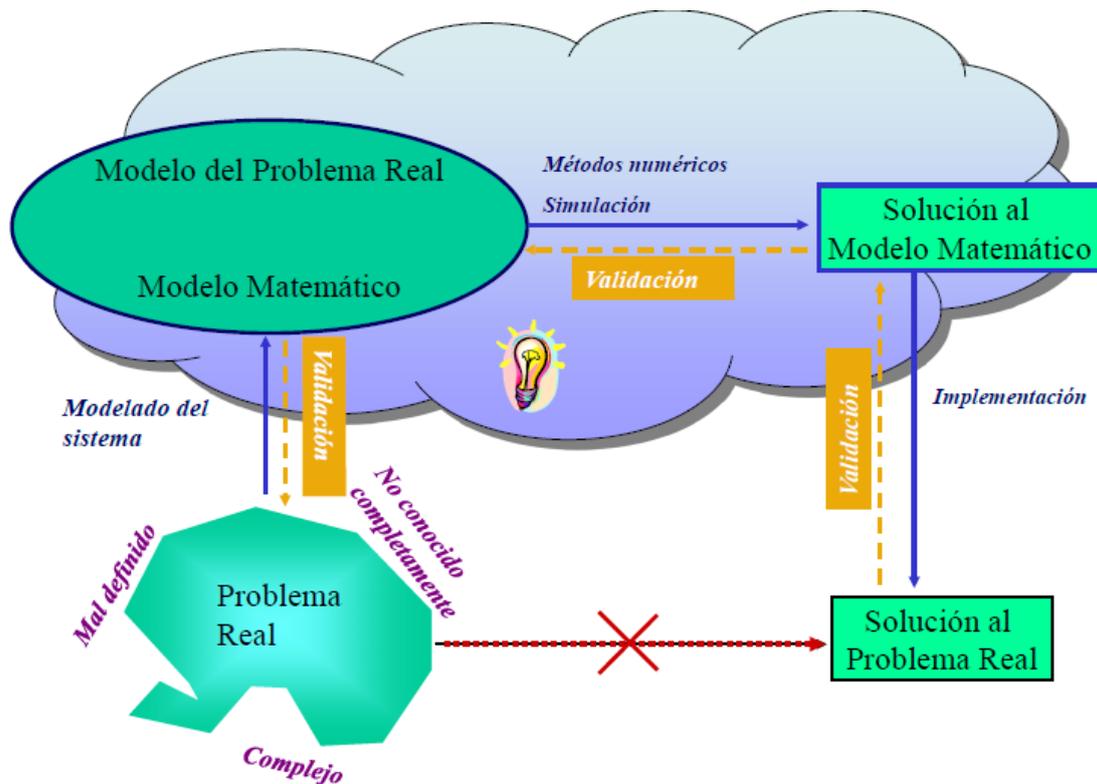


Imagen 1 - Esquema del funcionamiento de la simulación

Se parte de un problema real, el cuál es un problema complejo, que necesita de un análisis previo para poder definirlo e intentar comprender el funcionamiento del mismo. Todo ello impide poder llegar a tener una solución a este problema de manera directa. En esta parte es donde interviene la simulación.

Se empieza por el modelado del sistema, que se trata de crear un modelo de simulación a partir del análisis de datos iniciales. Este modelo es un modelo matemático, el cual se puede resolver mediante métodos numéricos. Este proceso es la simulación, con ello se obtiene una solución al modelo matemático basado en el sistema real. Si dichos resultados son satisfactorios se procede a la implementación del sistema real.

Una vez que se ha implementado el sistema real, se obtendrá la solución real, y si dicha solución coincide o está dentro del margen de error de la solución ofrecida por el

modelo matemático, se puede decir que el modelo de simulación es válido y refleja fielmente el comportamiento a lo largo del tiempo del sistema real.

Las áreas de aplicación de la simulación son muy extensas, y esto es debido a que es una muy útil y potente herramienta matemática, que combinada con la avanzada tecnología informática de la que se dispone hoy en día, permite analizar cualquier tipo de sistema real y además, se consigue dar respuesta a cuestiones como ¿qué pasaría si...?. Es decir, gracias a la simulación se pueden realizar predicciones realmente fiables del comportamiento del sistema real. En este caso, el campo de aplicación va a ser el de producción industrial, pero como ya se ha comentado anteriormente la simulación se extiende a campos como:

- La medicina, para poder evaluar las salas de espera de un hospital de urgencias o las salas de operaciones.
- Diseño y evaluación de redes de telecomunicaciones.
- Aeropuertos, con el fin de ajustar los tiempos de salidas y llegadas de los vuelos.
- Bancos, restaurantes de comida rápida, parques temáticos, en general aquellos locales en los que se puedan llegar a generar largas colas de espera.
- Campo militar.
- Servicios públicos, como por ejemplo el control de los semáforos de tráfico, las planificaciones de evacuaciones de emergencia o la localización de servicios al alcance de todos.

Estos son sólo unos ejemplos donde la simulación se ha convertido en parte fundamental para el desarrollo del trabajo en estos campos, pero existen infinidad de aplicaciones en las que se puede aplicar la metodología de la simulación.

Esta gran variedad de campos de aplicación de la simulación se debe principalmente a que no hay un único tipo de simulación, si no que existen varios tipos de simulación. La variedad de las simulaciones son debidas a la combinación de diferentes características que la definen. Estas características son las siguientes:

- **Estática o Dinámica:** En este primer apartado hay que preguntarse si el paso del tiempo tiene un papel fundamental en el sistema y a su vez en el modelo de simulación. Es decir, si va a afectar el paso del tiempo al comportamiento del sistema o del modelo. Si el tiempo no tiene relevancia la simulación será estática, y si por el contrario, el tiempo marca la evolución del sistema la simulación será dinámica. En este último caso, aparece otra variante para definir de que tipo será la simulación.
- **Cambio continuo o cambio discreto:** Se trata de distinguir si los cambios en el comportamiento del sistema son en instantes concretos del tiempo o si por el contrario el estado cambia continuamente. Los cambios discretos alteran el estado del sistema cuando se producen, y pueden ser aleatorios o fijos en el tiempo, por ello este hecho crea una tercera variable a tener en cuenta.

- **Determinística o Estocástica:** En el primero, los cambios que se producen son conocidos y constantes, se puede decir que todo es seguro y el comportamiento esta predeterminado. En la variante estocástica, existe incertidumbre, es decir, entra en juego la aleatoriedad. Los cambios del sistema se producen en instantes de tiempo determinados por funciones estadísticas, que a su vez dependen de generadores de números aleatorios para determinar en qué instante del tiempo ocurren los eventos.

En este Trabajo Fin de Máster la simulación que se va a llevar a cabo va a ser del tipo dinámica, con cambios discretos y estocástica. A esta variante de simulación se le conoce también como Simulación de Eventos Discretos.

2.2. FASES DEL PROCESO DE MODELIZACIÓN

En este punto se va a explicar brevemente los pasos necesarios para crear un modelo de simulación que se ajuste fielmente al sistema real.

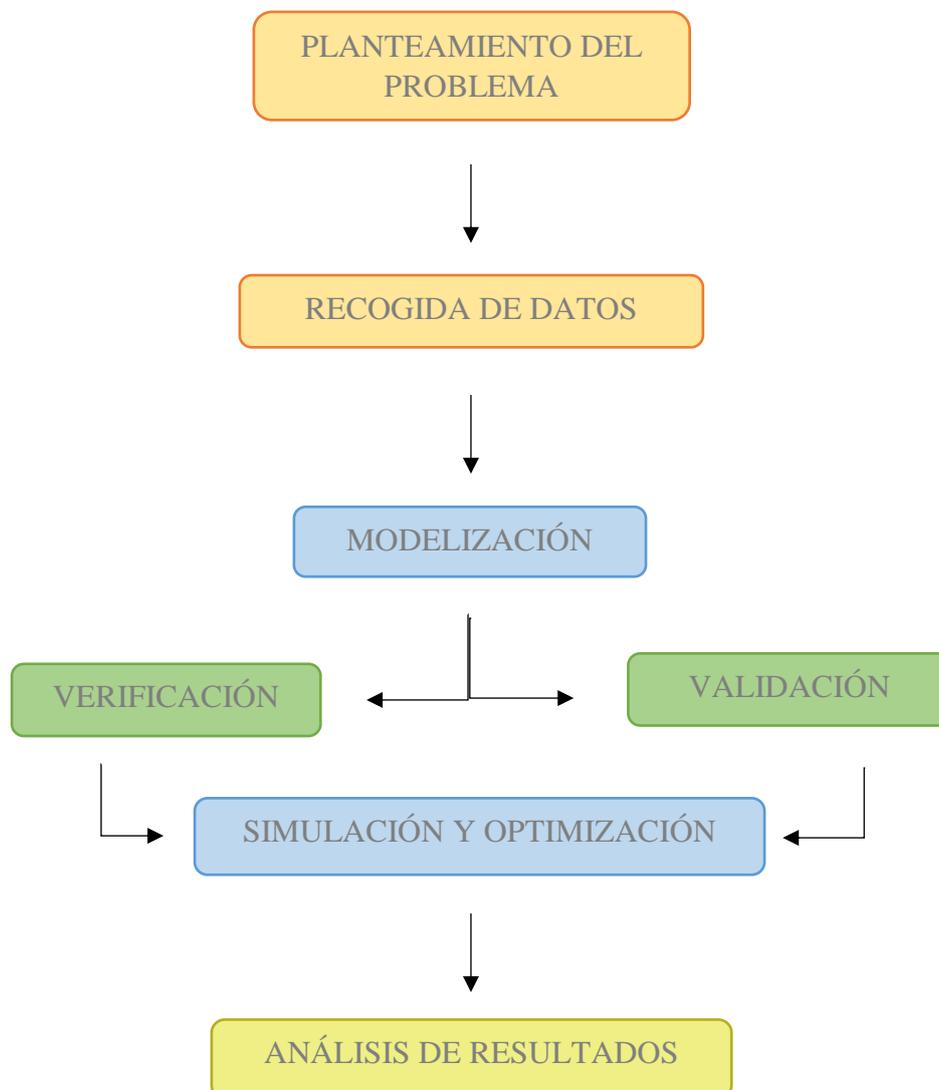


Imagen 2 - Fases del proceso de la simulación

- **Planteamiento del problema:** Esta primera fase y la siguiente son previas a lo que se entiende comúnmente como realizar un modelo de simulación, y son tanto o más importantes como la propia fase de modelado. Esta etapa se trata de entender el sistema real, identificando los problemas que se van a tratar de resolver. A continuación se definen las variables de entrada y salida del sistema, y los procesos y operación de los que consta el sistema real. Con todo ello se plantea un primer esquema de cómo va a ser el flujo del modelo de simulación.
- **Recogida de datos:** Esta segunda fase, también previa a la construcción del modelo, es esencial, puesto que se trata de recoger todos los datos necesarios para poder reflejar fielmente el sistema real en el modelo de simulación. Un buen análisis de estos datos, otorgará gran fidelidad al modelo. En esta etapa, también se elige que datos van a ser aleatorios y cuáles serán determinísticos.
- **Modelización:** En esta etapa se construye el modelo de simulación, dividiendo el trabajo en dos sub-etapas. La primera de ellas, trata de comprender el sistema basándose en la definición de las variables internas y en lo que sucede cada vez que ocurre un evento. Por otra parte en la segunda sub-etapa, se construye el modelo paso a paso, definiendo bien las entidades, atributos, recursos, etc. Además es imprescindible elegir el lenguaje de implementación y definir el “DOE”, es decir, el diseño de experimentos.
- **Verificación:** La verificación es un asunto de consistencia interna entre el modelo lógico y el ordenador.
- **Validación:** Esta etapa trata de ver si hay correspondencia entre el sistema real y el modelo de simulación, es decir, si el modelo refleja fielmente lo que sucede en el sistema real. El modelo y su implementación se deben ir refinando en función de los resultados de la validación.
- **Simulación y Optimización:** Si se desea utilizar la posibilidad de la que se dispone de combinar simulación con optimización, en primer lugar se debe plantear dicho problema, definiendo el objeto de mejora y cuáles son las condiciones de la simulación. Una vez que se tiene todo bien definido, acorde con lo estipulado por el programa, se realiza la simulación repetidas veces con variables de decisión, que en función de las condiciones establecidas, harán que la simulación siguiente varíe en busca de la mejor solución posible.
- **Análisis de resultados:** Esta es la última fase, en la cual se analizan los datos de salida de la simulación para poder comprender el comportamiento del sistema y poder dar respuestas al sistema real. En el caso de que se haya empleado la combinación de simulación y optimización, estas respuestas están guiadas por el programa, ofreciendo los mejores valores, en función de las restricciones y a partir de esos resultados, se debe valorar cuál de ellos se puede aplicar de la mejor manera al sistema real.

2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN

El ámbito de aplicación de la simulación como ya se ha visto es muy amplio, por lo que a partir de este momento, se va a hacer referencia a la simulación dentro del campo de la ingeniería de procesos de fabricación, que es el tema que ocupa este trabajo.

Las ventajas que ofrece la simulación son las siguientes:

- La simulación puede ser aplicada en la fase de diseño de un sistema o bien cuando la producción está en marcha, con el fin plantear alternativas y del mismo modo mejorar ciertos aspectos.
- Enlazando con el punto anterior, la simulación permite evaluar tantos escenarios como se requieran, es decir, se pueden simular diferentes alternativas aplicables al sistema real hasta dar con la mejor solución.
- Permite conocer en profundidad el comportamiento del sistema con rapidez, sin necesidad de realizar una gran inversión. Además, no interfiere en la producción, ya que la experimentación se realiza en el modelo creado a partir del sistema real.
- Aporta gran facilidad para identificar áreas que suponen un problema en la capacidad de producción, ya sea cuellos de botella o por el contrario largos periodos de inactividad.
- Posee una gran flexibilidad para modelizar cualquier tipo de sistema, por muy complejo que este pueda llegar a ser. De esta manera permite que un problema complejo, pueda ser resuelto de manera matemática a través del software de simulación.
- Completando el punto anterior, los grandes avances en la informática garantizar mejores softwares de simulación, y por lo tanto la capacidad de estos para resolver problemas cada vez más complejos y en periodos de tiempo más reducidos.

Al igual que la simulación ofrece grandes ventajas, también tiene ciertos inconvenientes:

- En ocasiones se hace un uso incorrecto de la simulación, es decir, si un modelo analítico es válido, es preferible debido a que la solución será más acertada que la ofrecida por la simulación.
- La simulación no proporciona soluciones exactas, los resultados que ofrece son estimaciones acotadas dentro de un margen de confianza.
- Al tratarse en la mayoría de las ocasiones de simulaciones estocásticas, que como ya se ha explicado consiste en la introducción de la aleatoriedad en el modelo, los resultados también serán aleatorios. Pero dentro de este inconveniente, aparece una ventaja, y es que la simulación posee una incertidumbre, pero se puede llegar a acotar ese ruido mediante técnicas de reducción de varianza o realización de muestreos secuenciales.
- En ciertas ocasiones y dependiendo de la complejidad del sistema, no es posible tener la certeza de que el modelo de simulación sea válido.

2.4. FUNCIONAMIENTO DE LA SIMULACIÓN

Hay dos partes importantes y que están ligadas una con otra. Se trata de entender cómo se realiza la simulación del paso del tiempo y cómo se crea la aleatoriedad, para ello se explicará brevemente qué son los números aleatorios y cómo se generan.

2.4.1. SIMULACIÓN DEL PASO DEL TIEMPO

Para entender el mecanismo de la simulación del tiempo, es mejor verlo reflejado en un simple ejemplo de un proceso productivo, en el cual las piezas van llegando de una en una a una máquina en la cual se les realiza un tipo de operación de un cierto tiempo de operación y las piezas salen finalizadas. La siguiente imagen que también ha sido tomada de la documentación de la asignatura de “*Simulación y Optimización de Procesos Industriales*” muestra el proceso.

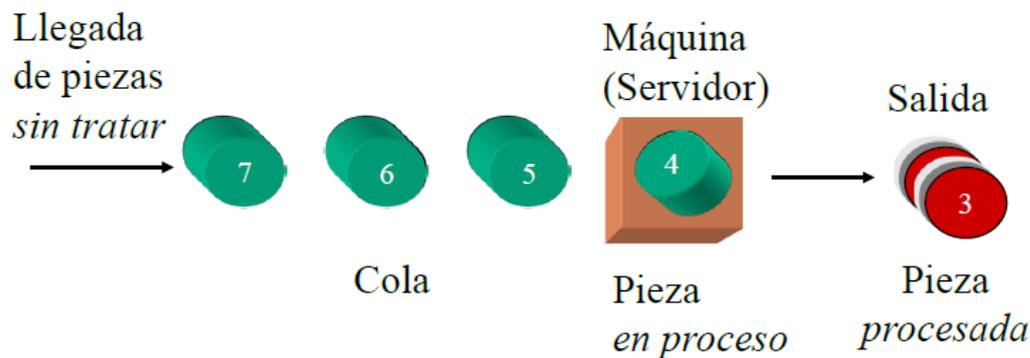


Imagen 3 - Esquema de un proceso sencillo de simulación

En primer lugar hay que identificar los elementos importantes del proceso. En este caso se trata de las piezas que entran sin tratar, la máquina, el operario si fuese necesario para manejar la máquina y el área donde se forma la cola y la disciplina por la que esta se rige, que puede ser infinita o con una capacidad fija.

Una vez identificados los elementos principales del sistema, se procede a describirlos matemáticamente.

- Piezas → Se guían por un patrón de llegadas. Este patrón de llegadas se estima por medio de la recopilación de un histórico de datos, que se traduce en una función de distribución estadística a la que se le denomina tiempo entre llegadas consecutivas.
- Máquina → hay que estimar el tiempo de servicio, que puede estar en relación directa o no, con el tamaño de la pieza y si necesita de la activación o no del operario. Al igual que con las piezas se debe ajustar una distribución estadística si los tiempos de servicio no son constantes.
- Disciplina de la cola → Se trata de saber cuál es el criterio que tiene estipulada la máquina para elegir la siguiente pieza que entra al proceso. Se puede decir que es la relación entre la pieza y la máquina. Existen diferentes disciplinas:

- **FIFO:** “First In First Out”. La primera que llega a la cola es la primera en recibir el servicio y salir. En teoría de colas cuando se trata de esta disciplina con un área de cola infinita se denomina M/M/1.
- **LIFO:** “Last In First Out”. La última que llega es la primera en recibir el servicio. Esta variante se refiere a cuando las piezas llegan y se van apilando en columnas, por lo tanto la última siempre estará arriba y será la primera que entra en la máquina.
- **Aleatorio:** No existe ninguna regla que regule el orden de entrada de las piezas en la máquina.
- **Disciplina de prioridades:** Se pueden combinar las dos primeras. Es decir, se puede estar en un régimen de FIFO y puntualmente por urgencia puede pasar a ser del tipo LIFO para determinadas piezas que necesiten tratarse a la mayor brevedad de tiempo.

Con los elementos que participan en el proceso, ya identificados y definidos, se procede a la construcción del modelo de simulación. Para ello se necesita previamente identificar cuáles son las variables de estado que van a determinar el funcionamiento de la simulación. Las variables de estado son un conjunto de variables que si se conoce su valor, se sabe cómo se encuentra el sistema en cada instante. Permiten describir por completo el sistema en cada momento. Estas variables permanecen constantes durante ciertos periodos de tiempo, hasta que se produce un cambio (evento), que en este caso puede ser la llegada de una pieza o la finalización de un servicio. Un evento es algo puntual que sucede y que hace cambiar de valor, al menos una de las variables de estado del sistema.

A continuación se van a definir las variables de estado para este ejemplo:

- **B(t):** Esta variable indica si la máquina está trabajando o no. En caso afirmativo, esta variable toma el valor 1, y por el contrario toma el valor 0. Si se produjera un fallo en la máquina o hay una parada programa para mantenimiento, en este caso tomaría el valor -1.
- **Q(t):** Esta variable cuantifica el número de piezas en cola.
- **A(t):** Este vector guarda en cada posición el tiempo en el que llegó la pieza a la cola. Es importante no confundir con el tiempo que lleva la pieza en la cola. De este modo quedaría el vector de la siguiente manera.

A(tiempo llegada 1º pieza en cola, tiempo llegada 2ª pieza en cola,...)

- **Reloj de la simulación (R):** Variable que mide cuanto lleva la simulación activa. Ficticiamente mide el tiempo que llevaría en la realidad el sistema. En el instante inicial $R=0$.

En el instante de tiempo ($R=15$) por ejemplo, las variables podrían ser:

- $B(15)=1$

- $Q(15)=2$
- $A(15)=(6,11)$

Ahora la pregunta es cómo cambiarían esas variables si se produjera uno de los dos eventos que ya se han comentado que harían modificar estas variables de estado.

- o Finalización de un servicio:
 - Si no hay piezas en cola $\rightarrow B(t) = 0$
 - Si hay piezas en cola $\rightarrow Q(t) = Q_o(t) - 1$
- o Llegada de pieza:
 - Si la máquina no trabaja $\rightarrow B(t) = 1$
 - Si la máquina si trabaja $\rightarrow Q(t) = Q_o(t) + 1$
- o Parada por fallo o mantenimiento $\rightarrow B(t) = -1$

Para finalizar y para llevar un orden en la simulación se hace necesario la utilización de un **calendario de eventos**. El calendario de eventos no es más que un vector, que posee tantas componentes como eventos hay. Es decir, la dimensión del vector es igual al número de eventos, en este caso dos. En el ejemplo que se está viendo el calendario de eventos se correspondería con el siguiente: (Instante de tiempo de la futura llegada, Instante de tiempo del futuro fin de servicio).

Esta es la clave para poder simular el paso del tiempo, mediante las distribuciones estadísticas de los elementos principales del sistema, se va actualizando el calendario de eventos, y con este las variables de estado van cambiando en función del evento que se produzca en cada instante del tiempo. Una vez que el reloj de la simulación alcanza su valor final, quedan registrados todos los datos de las variables, en cada instante de tiempo que se actualizó el calendario de eventos.

En este caso la simulación ha acabado porque se ha fijado un tiempo máximo de simulación, pero en la mayoría de los casos no es así, existen los llamados **criterios de parada**. Estos criterios consisten en condiciones que en caso de llegar a producirse la simulación se pararía automáticamente. Estos criterios pueden ser varios:

- Alcanzar un número de piezas finalizadas determinado
- Tiempo de simulación prefijado
- La cola del proceso alcance un determinado número
- De tipo estadístico
- Etc.

2.4.2. ALEATORIEDAD

Para introducir aleatoriedad en las simulaciones, se hace necesario la incorporación de sucesiones de números aleatorios. Estas sucesiones de números aleatorios son secuencia de observaciones independientes y uniformes de una variable aleatoria distribuida uniformemente en el intervalo (0,1).

Los números aleatorios forman la base para generar observaciones de cualquier distribución de probabilidad y de otros muchos procesos aleatorios, para ello se necesita realizar transformaciones adecuadas a cada caso de estos números aleatorios. En este punto, y en especial para simulación, es imprescindible contar con un excepcional mecanismo de generación de números aleatorios. Lo ideal son métodos matemáticos, que puedan ser implementados en ordenadores.

Los generadores de números aleatorios se caracterizan por dos elementos fundamentales, la **semilla** y su **longitud de ciclo o periodo**. La semilla es el número (Z_0) que se necesita para iniciar la sucesión y la longitud de ciclo o periodo es la longitud de la secuencia de números aleatorios antes de comenzar a repetirse en el mismo orden.

Estos generadores artificiales de números aleatorios tienen como objetivo producir una secuencia de números entre 0 y 1, que refleje las propiedades ideales de los números aleatorios que son, uniformidad e independencia de los mismos respecto al anterior.

Para que esto sea posible, los generadores deben cumplir con una serie de propiedades, que si las cumplen se pueden considerar como buenos generadores de números aleatorios.

- Buenas propiedades estadísticas. Esta propiedad es la base. Como se ha comentado anteriormente, las secuencias de números aleatorios generadas deben ser uniformes en el intervalo (0,1) y también deben ser independientes.
- Buenas propiedades computacionales.
 - El coste computacional del cálculo de la secuencia de números aleatorios debe ser despreciable. Esto se traduce en que el tiempo que pasa desde que le pides al generador la secuencia y aparece debe ser lo más corto posible, y eso se debe a que la simulación puede requerir una cantidad de números aleatorios muy grande.
 - Dicha secuencia debe precisar del mínimo espacio de almacenamiento en la memoria del ordenador.
 - La longitud del ciclo de la secuencia debe ser suficientemente larga para que la simulación pueda estar utilizando números aleatorios, sin que llegue el momento en que se repitan.
 - El generador debe poder permitir la repetición de la secuencia, es decir, si se quiere volver a empezar desde el inicio la simulación, se debe poder empezar nuevamente desde el inicio de la secuencia de números aleatorios.

En la actualidad los generadores más comunes están cuidadosamente seleccionados para optimizar estas propiedades.

De entre los todos los generadores que existen, el software ARENA que es el que se va a emplear en el desarrollo de este trabajo tiene implementado el denominado *Combined Multiple Recursive Generator* (CMRG) cuya secuencia se saca de las siguientes fórmulas matemáticas.

$$A_n = (1403580 A_{n-2} - 810728 A_{n-3}) \text{ mod } 4294967087$$

$$B_n = (527612 B_{n-1} - 1370589 B_{n-3}) \text{ mod } 4294944443$$

$$Z_n = (A_n - B_n) \text{ mod } 4294967087$$

$$U_n = \left\{ \begin{array}{l} Z_n / 4294967088 \text{ if } Z_n > 0 \\ 4294967087 / 4294967088 \text{ if } Z_n = 0 \end{array} \right\}$$

$$\text{longitud del ciclo} = 3.1 \times 10^{57}$$

3. DISEÑO DE LA PIEZA

3.1. DESCRIPCIÓN

La pieza sobre la que va a tratar este Trabajo Fin de Máster es una tuerca de bolas. Esta tuerca forma parte de la dirección asistida eléctrica de un vehículo comercial estándar. Forma parte de todo el conjunto del eje de distribución, el cual es un sistema que requiere un elevado volumen de producción y en concreto este tipo de pieza tiene una demanda de casi 4.000 piezas al día. Uno de los motivos por lo que la demanda es tan elevada es porque en la industria automovilística, la tendencia actual es a sustituir los mecanismos hidráulicos, por mecanismos eléctricos. Las razones porque los que la balanza se inclina hacia los mecanismos eléctricos son:

- Menos ruidosos. El cliente cada vez es más exigente en cuanto al confort y la ergonomía, por lo que cuanto menos ruido se sienta en el habitáculo del coche, hace que sea más atractivo a ojos del consumidor.
- Mayor estabilidad. En unión al punto anterior, la ergonomía y seguridad a la hora de conducir un vehículo van de la mano, por tanto, los mecanismos eléctricos reducen las vibraciones que el conductor percibe por medio del volante.
- No hay necesidad de circuito hidráulico. La ausencia de tubos, motor hidráulico, juntas estancas, etc. Hace el coche más ligero y abarata el precio de mantenimiento, lo cual repercute positivamente en prestaciones y en el precio de venta al público respectivamente.

A su vez hay que comentar, que este tipo de mecanismos eléctricos, a día de hoy en la industria del automóvil no es posible implementarlos en la totalidad de los vehículos. En coches de gran tamaño y peso el tamaño del motor eléctrico que sería necesario debería ser muy grande, y por lo tanto el consumo energético también sería, en consecuencia, muy alto.

La siguiente imagen muestra la tuerca de bolas que se estudia en este trabajo.



Imagen 4 - Tuerca de bolas

En la imagen que viene a continuación se puede ver todo el mecanismo del eje de distribución del vehículo, y se detalla dónde se encuentra en particular la tuerca de bolas del estudio.

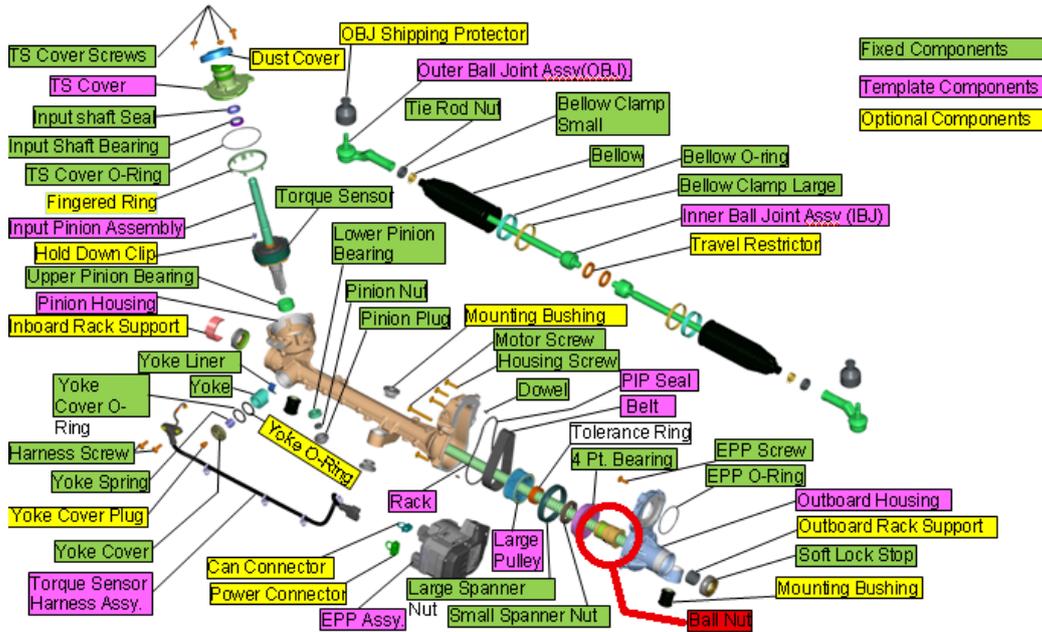


Imagen 5 - Despiece del sistema de distribución completo

Dentro de todo el entramado del mecanismo, la función específica que realiza esta pieza es transmitir a la cremallera del eje la ayuda ofrecida por el motor eléctrico. Este fenómeno tiene lugar mediante rodamientos situados en el interior de cuatro pistas independientes, que la tuerca tiene mecanizadas en el interior. Estos rodamientos transmitirán el movimiento rotacional de la tuerca y el husillo de la cremallera de la dirección, en movimiento lineal, reduciendo el esfuerzo que tiene que realizar el conductor.

En la imagen siguiente se ve un detalle de este particular fenómeno.

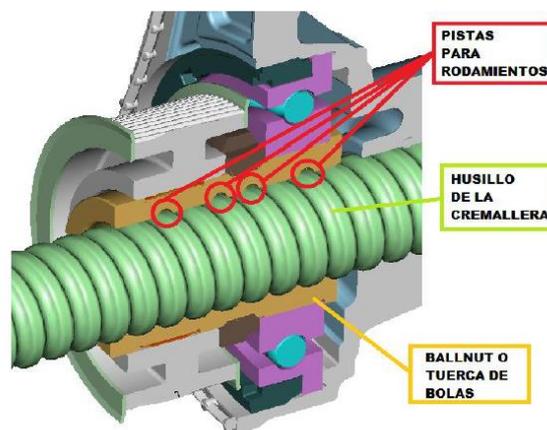


Imagen 6 - Detalle del mecanismo tuerca-husillo

3.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Se trata de una tuerca y en su interior, circularán pequeños rodamientos encargados de transmitir el movimiento de la tuerca al husillo de la cremallera. La pieza, tiene simetría de revolución en la cara externa, mientras que en la cara interna se mecanizan cuatro pistas asimétricas.

En la siguiente imagen se puede ver los planos de la planta y el alzado de la pieza.

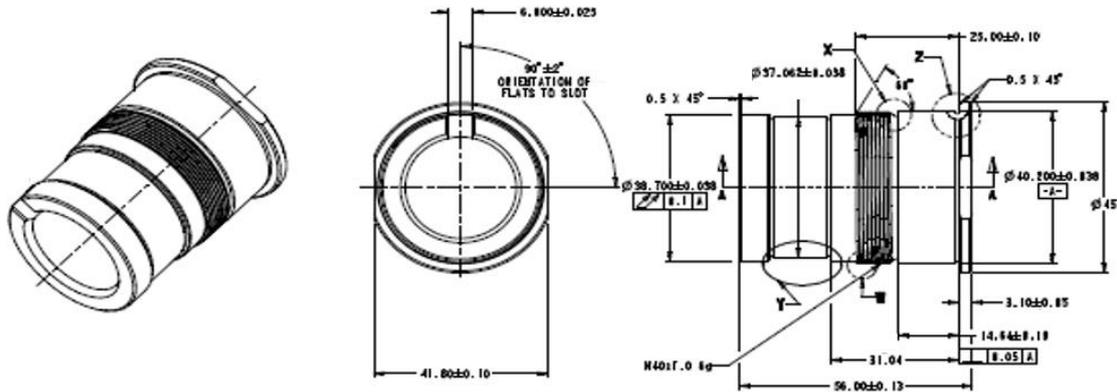


Imagen 7 - Planos tuerca de bolas

3.2.1. PISTAS INTERIORES

Se trata de cuatro pistas independientes, por lo que crean cada una un circuito cerrado. Son mecanizadas en el interior de la tuerca por la que circularán los rodamientos. Que las pistas sean independientes unas de otras, significa que, el paso de la pista cambia a lo largo de los 360° , es decir, las pistas están compuestas por dos partes, la pista activa (180°), con avance constante y la parte de retorno (180°), cuyos pasos son cambiantes.

En la siguiente imagen se puede ver en detalle, esta peculiaridad que caracteriza la pieza.

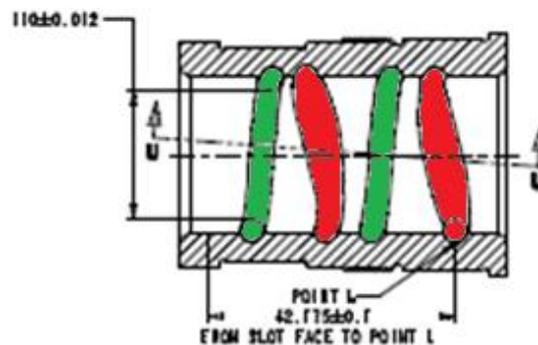


Imagen 8 - Detalle pistas interiores

Como se puede apreciar en la imagen, las pistas activas pintadas de color verde, el diámetro de la entalla es constante en los 180° de recorrido por el que circulan las bolas. En cambio, las pistas de retorno, pintadas de color rojo, el diámetro aumenta, para permitir a los rodamientos retroceder y volver a empezar el ciclo activo en la siguiente vuelta.

En esta parte de la pieza es donde se transmite el movimiento circular, que proviene del motor eléctrico, a la cremallera del eje, disminuyendo el esfuerzo que el conductor tiene que hacer a la hora de girar el volante.

3.2.2. REBAJES GUÍA

En una de las caras planas del cilindro, la circunferencia se puede decir que no es completa, es decir, la pieza posee dos rebajes paralelos en los que no dispone de dos segmentos circulares.

Ambos rebajes, no se realizan en planta, ni están presentes en la fase de fabricación, pero sí que facilitan la labor de producción, pues las piezas pueden ser guiadas por las cintas transportadoras que comunican las diferentes zonas de mecanizado.

En las imágenes siguientes, se observan ambos rebajes, tanto en plano, como en la pieza real.

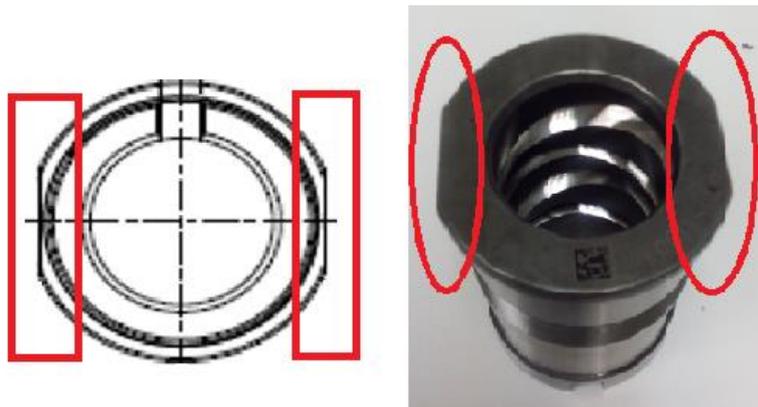


Imagen 9 - Detalle rebajes guía

Gracias a estas guías, y en conjunto con el punto siguiente, las piezas estarán siempre dispuestas en la posición correcta, durante en el transporte y en el momento de que sean recogidas por los robots para ser insertadas en las diferentes células de mecanizados, de tal manera que todas las piezas producidas sean idénticas, tanto en la cara exterior, como en los mecanizados interiores.

3.2.3. REBAJE DE ALINEACIÓN

En la cara opuesta, y de diámetro sensiblemente más pequeño, presenta una muesca. Este rebaje sirve para tener siempre una referencia de la orientación que debe seguir la pieza, tanto en las fases de transporte, como en los momentos en los que las tuercas son recogidas por el robot para colocarlas en las máquinas, y conseguir mecanizar todas las piezas por igual.

Al igual que en el apartado anterior, este mecanizado, no se tiene en cuenta en esta fase de producción de la pieza, pero si se tiene en cuenta en la fase de diseño, ya que este pequeño rebaje, permite la uniformidad de todas ellas.

En las imágenes que vienen a continuación se puede observar este rebaje, tanto en el diseño en plano, como en la pieza real.



Imagen 10 - Detalle rebaje de alineación

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA REAL

Para poder construir un buen modelo de simulación, que refleje fielmente el comportamiento de la línea de producción, primero hay que comprender y analizar el funcionamiento del ya mencionado sistema real.

Como toda cadena de fabricación, tiene una llegada y una salida, y en medio se aplican las transformaciones necesarias para conseguir el objetivo deseado. Además, el transporte de las piezas es un elemento muy importante en simulación, por lo tanto es imprescindible conocer que medios se utilizan, ya sea transporte manual realizado por un operario o mediante maquinaria específica, y que distancias separan los puntos de origen de los puntos de destino.

Por último y ligado a cualquier proceso productivo, existe un control de calidad. Este control de calidad también es posible simularlo, pero es necesario conocer todos los aspectos que caracterizan las verificaciones necesarias para asegurar que la producción se está llevando a cabo de manera correcta. Más adelante se analizará, cómo se llevan a cabo las inspecciones, en qué lugar de la planta se realiza, quién y cómo se encarga de transportar las piezas hasta el área de verificación, qué operaciones se deben realizar y cuánto tiempo se invierte en dichos procesos.

4.1. LLEGADA DE PIEZAS

La llegada de las piezas se produce en una zona específica de la fábrica, concretamente en el muelle de carga y descarga de camiones. Cuando se produce la llegada de un camión, proveniente de otra empresa, un operario de la planta ayuda al repartidor a descargar el camión, y llevar la mercancía a la zona de almacenaje. En dicha zona, las cajas que contienen las tuercas de bolas, esperan hasta que llegue el turno de comenzar con el proceso de mecanizado.

Las piezas llegan a la planta de fabricación pretratadas, es decir, ya han sido mecanizadas previamente en otra empresa con un proceso de torneado, haciendo el primer desbaste de la cara exterior de las tuercas.

Cuando llegan a la fábrica están empaquetadas en cajas. Cada caja contiene 30 tuercas de bolas dispuestas en filas y columnas de seis por cinco. A su vez, dichas cajas llegan apiladas en palés, que cada uno de ellos contiene 16 de estas cajas, dispuestas en cuatro pisos, y cada uno de esos pisos contiene cuatro cajas, colocadas en dos filas y dos columnas. Si se hace la cuenta, cada palé contiene 480 tuercas.

Si cada camión cuando llega deposita palés de los anteriores, se tiene que en cada llegada se alimenta la fábrica con **3.360 tuercas por llegada**. También se sabe que los camiones tienen estipuladas las llegadas los lunes y jueves, con lo que a la semana el almacén recibe 6.720 tuercas de bolas.

Esta entrada de piezas, debe ser suficiente para mantener el flujo de producción y además, poder tener una reserva de piezas en caso de que fuese necesario por cualquier circunstancia que se pudiera dar, ajena a la fábrica.

En la siguiente imagen se puede observar el tamaño de las cajas y como están apiladas a su llegada para el transporte. También se ofrece un detalle del estado inicial de la tuerca a su llegada a la fábrica.



Imagen 11 - Llegada de los palés y detalle del interior de una tuerca

El color tan brillante de estas tuercas, viene a indicar que todavía no han sido sometidas a ningún tipo de tratamiento térmico, el acero se mantiene intacto de fabricación, a excepción del mecanizado exterior.

4.2. CÉLULA DE FRESADO

Una célula consiste en un conjunto de máquinas y elementos, enlazadas entre sí mediante un sistema de transporte de piezas común, constituido en este caso por una cinta transportadora y un robot, y además un sistema de control centralizado, que permite realizar el trabajo de mecanizado de manera automática.

En la siguiente imagen se puede ver, de manera general, la célula de fresado.



Imagen 12 - Célula de Fresado Interior

A continuación se van a detallar los aspectos que intervienen en esta primera etapa de la producción.

- **Cinta transportadora:** Para la entrada de las piezas en la célula se dispone de una cinta transportadora paletizada, en la cual las piezas no se van a introducir individualmente, sino por cajas, de manera que la ubicación y la descarga de las piezas está previamente programada. En cada una de las paletas de la cinta, estará ubicada una caja, que contiene las 30 tuercas de bolas organizadas de tal manera, que el robot pueda ser capaz de gestionar la carga y descarga de las piezas, a través del programa diseñado para ello.
- **Robot manipulador:** Este robot tiene varias funciones, las dos más importantes son las de alimentar las máquinas fresadoras de piezas y la descarga después de terminar el proceso de mecanizado. Para mejorar el rendimiento de la célula y al mismo tiempo mantener el menor tiempo posible los centros de mecanizado parados, este robot posee dos pinzas de sujeción, con las que en el mismo movimiento, puede liberar la máquina y cargarla con una nueva pieza. En la siguiente imagen se puede ver con detalle el extremo del brazo robot donde se alojan las pinzas de sujeción de piezas.



Imagen 13 - Robot de carga y descarga. Detalle pinzas

Como se puede ver, la pinza entra en el cilindro interior de la tuerca y una vez colocada en la posición correcta, se abre de manera neumática, contactando con la pieza en tres puntos interiores, para mantener la concentricidad y a su vez, siempre estén todas las piezas sujetas en la misma posición, a la hora de entrar en las fresadoras.

- **Centros de mecanizado (fresadoras):** Se trata de máquinas fresadoras. La célula consta de tres de ellas, con las instrucciones de corte ya programadas, es decir, cada una tiene instalado el programa de operaciones de control numérico para poder realizar los mecanizados de manera automática. En esta primera etapa de mecanizado, se va proceder al desbaste de las pistas interiores. Estos tres centros de mecanizado son de la marca DRAKE y constan de los siguientes elementos principales:
 - Bancada o estructura
 - Transformador
 - Plato de garras con su respectivo motor de giro “C”

- Motor del eje de avance “X” (lineal)
- Motor del eje del paso de la pista “Z”
- Motor del eje del talonado de la fresa “A”
- Motor de giro de la fresa
- Refrigeración del cabezal de la fresa
- Grupo extractor de viruta

El cabezal de estas máquinas posee tres ejes de giro, que se complementan con el eje “C”, que es puramente rotacional y sobre el que gira la pieza en el plato de garras.

- Eje “A” de talonado de fresa:
Ayuda a crear un diámetro mayor en las pistas interiores de las tuercas, en la carrera de retroceso de las bolas, para que éstas puedan saltar sobre el husillo de la cremallera para volver a la pista activa de nuevo.
- Eje “Z”: Es el encargado de hacer que la fresa suba y baje en la dirección vertical, para poder mecanizar las 4 pistas independientes de cada tuerca.
- Eje “X” de avance: Este eje permite a la fresa profundizar en las piezas para mecanizar y arrancar la viruta.

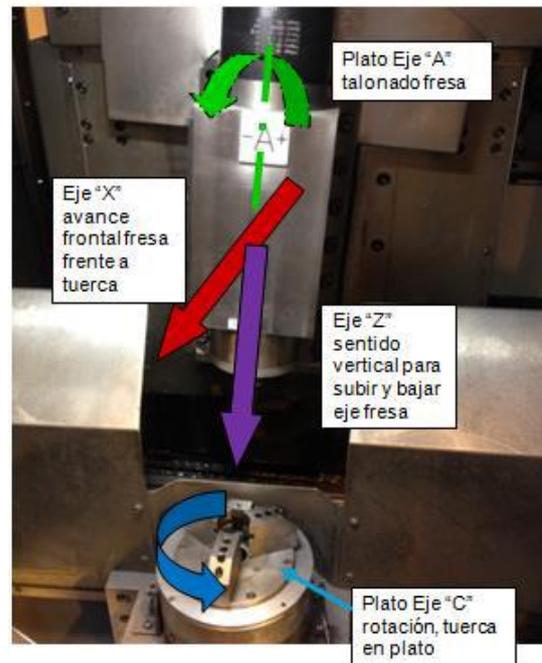


Imagen 14 - Detalle ejes DRAKE

El fresado que se aporta a las piezas, es de tipo periférico, donde el avance por filo es de 1,25 mm y el ancho del filo es el ancho de la propia pista en la mitad activa. En consecuencia, y según el diseño de las pistas, la mitad de la pista correspondiente a la carrera de retorno tiene una anchura superior y además la profundidad de corte también es mayor. Esto se consigue inclinando la fresa, como ya se ha visto, gracias al eje de talonado.

Para conseguir un mecanizado perfecto de las cuatro pistas interiores de las tuercas los movimientos de los 4 ejes ya comentados deben estar en perfecta sincronización.

En cuanto a la herramienta de corte de estas máquinas fresadoras DRAKE, está formada por tres dientes en forma de cono para disminuir el efecto del rozamiento, cuya relación de diámetro de cuerpo y el total de la fresa es de 11,8/19 (aproximadamente 2/3). El material con la que se fabrican es de Carburo de Tungsteno y además para mejorar su dureza superficial y por lo tanto aumentar su vida útil, lleva un recubrimiento de Nitruro de Titanio.

Al tratarse de mecanizado de alta velocidad, se tiene la ventaja de poder refrigerar la herramienta mediante aire, evitando el uso de taladrina, cuyo uso conlleva un gasto extra en utillaje y el mecanizado es más sucio.

En las siguientes imágenes, al igual que con el plato de garras, se puede ver una de estas fresas de tres dientes y el diseño en plano.

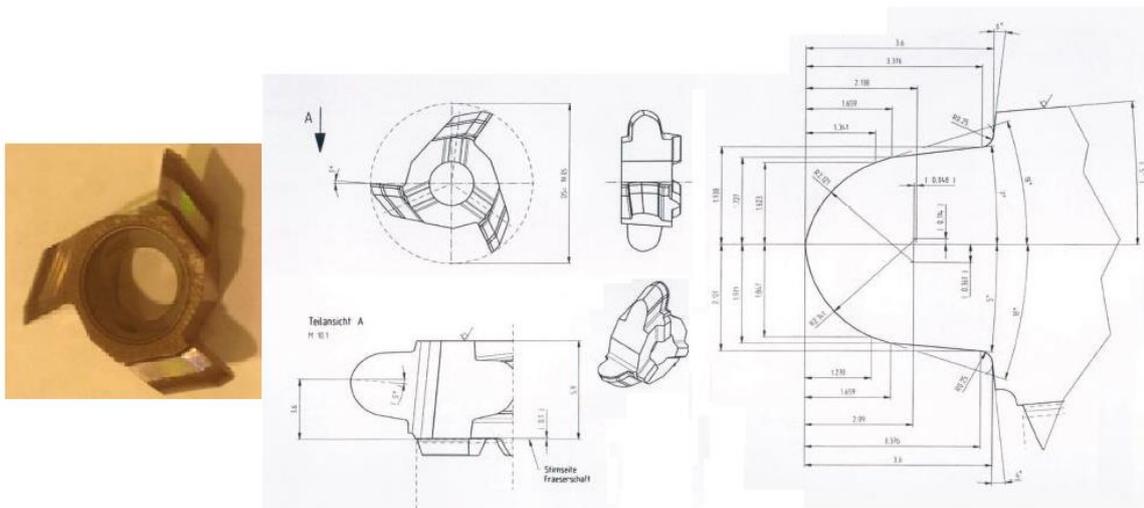


Imagen 15 - Planos herramienta. Fresa

La vida útil de cada una de estas fresas es de 400 ciclos, en el caso de que no se produzca ninguna anomalía en el proceso y la fresa colapse y se rompa. En ese momento las fresas son remplazadas ya que por desgaste no mantienen su eficacia.

Si se quiere saber cuántas veces va arrancar material cada uno de los dientes, se puede realizar el siguiente cálculo, sabiendo que la longitud de la pista va a ser

$$\Pi \times 19 \text{ mm (diámetro)} = 60 \text{ mm}$$

Las veces que un diente toca la pieza por cada pista es igual a

$$\text{Longitud de la pista } 60 \text{ mm} / (3 \times 0,125 \text{ mm separación entre dientes}) = 160$$

Por último y sabiendo que cada fresa es capaz de mecanizar 400 tuercas, da un total de 256.000 pasadas por diente a lo largo de su vida útil.

- **Operario:** Este operario se encarga del manejo de la célula. Va a realizar las siguientes tareas:

- Carga de material: Esta función a desempeñar es rápida y se trata de abastecer la cinta transportadora de carga de cajas de tuercas provenientes del almacén. Para ello, debe desplazarse hasta la zona de almacenaje y mediante el uso de carretillas especiales, acercar palés que contienen las propias cajas con tuercas.
- Transporte de las piezas: En aquel momento que se consigue llenar un palé entero de cajas de tuercas ya fresadas, este operario tiene que transportarlas desde la célula de fresado, hasta la siguiente etapa, que se encuentra en el área de hornos de la fábrica.
- Transporte de las piezas de control: Además, aquellas piezas que tienen que ser llevadas a verificar, también tienen que ser transportadas por este mismo operario, utilizando otro tipo de carretilla manual. Estas tuercas que deben ser verificadas, son aquellas primeras tuercas mecanizadas en cada cambio de turno o de herramienta, puesto que en ambos momentos, las máquinas han parado su funcionamiento y deben volver a reiniciar su actividad correctamente.
- Cambio de herramienta: Como ya se ha explicado, la herramienta de los centros de mecanizado, tiene que ser sustituida cada 400 tuercas mecanizadas o en el caso que se produzca una rotura de la misma. En este caso, el operario tiene que parar la producción de la célula y proceder al cambio de la herramienta.
- Mantenimiento. Ante cualquier problema que pueda surgir, este operario tiene los conocimientos necesarios para poder efectuar rectificaciones en la secuencia del programa de fresado, también debe ser capaz de corregir los posibles fallos que se puedan dar en el área de verificación. En caso de que la avería sea más grave y la solución requiera de mano de obra especializada, este operario debe alertar al encargado de la línea de fabricación y éste se encargará de buscar las soluciones oportunas.

4.3. HORNO DE CEMENTACIÓN

Posteriormente a esta primera etapa, llega el momento de conferir a las piezas las propiedades mecánicas adecuadas y que se requieren por diseño. Para ello, las piezas apiladas en palés, son transportadas hasta el área de la fábrica en la que se encuentran los hornos. Esta fase, se lleva a cabo en dos etapas.

La primera de las etapas consiste en un tratamiento de temple en una atmósfera rica en carbono. Para ello las piezas se introducen en el primero de los hornos y se mantienen dentro a una temperatura de entre 880°C y 900°C. A lo largo de este periodo de tiempo, se mantiene constante la inyección de gases de carbono, por lo que gracias a las altas temperaturas, favorece la difusión del carbono en la capa superficial de las tuercas. Posteriormente se debe enfriar las tuercas, para asegurar el proceso completo del tratamiento térmico en las piezas.

Con este proceso se consigue crear una capa exterior de entre 0,9 y 1,4 mm de espesor, muy dura y con gran resistencia al desgaste.

Tras esta primera etapa, las piezas pasan al segundo horno, en el que las tuercas se someten a un segundo tratamiento térmico, esta vez de revenido, con el fin de aliviar las tensiones internas que provoca el primer tratamiento de temple y cementación. Para llevar a cabo el revenido, las piezas deben estar sometidas a una temperatura de entre 160°C y 180°C.

Al finalizar este último proceso de revenido, se da por acabado el proceso de tratamiento térmico, y las tuercas han sufrido una transformación en cuanto a dureza superficial se refiere de 140-190 HB inicialmente, a finalizar con dureza de 690 HK en la escala Knoop o lo que es lo mismo 58 HRC.

El tiempo total invertido en esta fase de la fabricación es de dos horas, es decir, el tiempo de exposición de las tuercas a las altas temperaturas, juntando el tiempo del tratamiento en el horno de cementación y el de revenido, ambos dos, suman un total de dos horas.

En la siguiente imagen se observan las especificaciones técnicas de todo este proceso de temple, cementación y revenido.

| | |
|---|--|
| <p>① MATERIAL CONDITION: BAR STOCK SHALL BE FULLY ANNEALED (PEARLITE-FERRITE STRUCTURE); ANNEALING TEMPERATURE SHALL BE 880°C-900°C. ANNEALING TIME IS 2 HOURS MINIMUM AT TEMPERATURE. SURFACE AND CORE HARDNESS SHALL BE 140-190 HB. STEEL QUALITY SHALL CONFORM TO ITEM 104 (TS2-17-081).</p> | <p>PROCESS: CARBURIZE PER ITEM 103 (TS2-53-020) AFTER MILLING ROUGH THREADS TO AN EFFECTIVE CASE DEPTH OF 0.9-1.40mm. MEASURED BEFORE FINAL GRINDING. (MEASURED TO 576 HK500 OR 550 HV1 AFTER TEMPERING) TEMPERING TEMPERATURE SET POINT SHALL BE BETWEEN AT 320°F AND 360°F (160°C-180°C) TEMPERING TEMPERATURE TOLERANCE SHALL BE ± 10°F (±6°C)</p> |
| <p>② MATERIAL: SAE J1268 GRADE 4617H EXCEPT J2 SHALL BE 35-41 ALTERNATE MATERIAL: DIN EN 10084 GRADE 16MnCr5 H (1.713H) EXCEPT J3 (mm) SHALL BE 35-41 ALTERNATE MATERIAL: JIS G4052 GRADE SC415H EXCEPT J3 (mm) SHALL BE 35-41 COLD FORM MATERIAL SHALL BE SPHEROIDIZED ANNEALED PRIOR TO COLD FORMING.</p> | <p>SURFACE HARDNESS ON BALL NUT OD SHALL BE 89.5 HR15N BALL GROOVE SURFACE HARDNESS BEFORE GRINDING-MEASURED AT 0.4mm BELOW THE SURFACE SHALL BE 690 HK 500 OR HK655 HV1 MINIMUM BALL GROOVE SURFACE HARDNESS AFTER GRINDING-MEASURED AT 0.1mm AND 0.25mm BELOW THE SURFACE SHALL BE 690 HK500 OR HK655 HV1 MINIMUM</p> |

Imagen 16 - Especificaciones técnicas de los Tratamientos Térmicos

Después del aporte del tratamiento térmico y de cementación, las piezas son apiladas nuevamente en palés y seguidamente, un operario devuelve dichos palés mediante una carretilla específica, a la zona de mecanizado para continuar con el proceso.

En la siguiente imagen se puede observar el antes y el después de una de las tuercas, tras esta etapa.



Imagen 17 - Antes y después del T.T.

4.4. RECTIFICADO EXTERIOR

Seguidamente a la etapa del tratamiento térmico, las piezas regresan a la línea de fabricación. En esta fase y en la siguiente, se consigue ajustar las tuercas a las tolerancias dimensionales, ya que en el tratamiento térmico, las tuercas pueden haber sufrido alguna variación dimensional.

En esta estación, se trata de realizar el rectificado en la cara exterior de las tuercas. Para ello se dispone de varios elementos con lo que llevar a cabo el rectificado.

Para mostrar el proceso de una manera más sencilla, se van a definir aquellos elementos más importantes que intervienen en esta fase de la producción.

- Pieza pre-tratada: La primera operación que se realiza sobre las tuercas, es serigrafar mediante una impresora láser un código, en el cual quedan registrados los procesos que se realizan a las tuercas, el día, la hora, el operario que está al cargo de cada estación de mecanizado, la máquina con la que se han realizado cada operación y demás aspectos importantes que intervienen en el proceso y pueden ser de ayuda en el caso que sea necesario. El proceso empieza con el operario de esta área de la línea de fabricación, colocando las tuercas procedentes de los hornos de tratamiento térmico en una cinta transportadora que conduce las tuercas guiadas en fila hacia la impresora láser. El guiado de las tuercas todas en la misma posición, se consigue gracias a los rebajes paralelos que ya se explicaron en el apartado anterior.

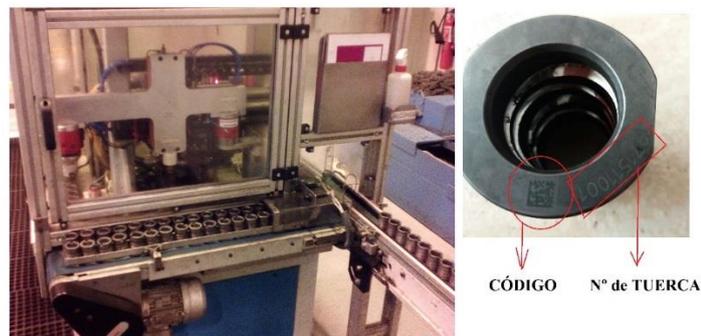


Imagen 18 - Impresora láser y detalle del código serigrafado

Seguidamente, las tuercas siguen por la cinta transportadora, que se ramifica en dos. Cada uno de los dos canales, conduce las piezas hacia las dos máquinas de rectificado. En ellas las piezas son recogidas por un robot, que las introduce en la máquina que realiza el rectificado exterior y seguidamente el robot devuelve la tuerca a la cinta transportadora, que ahora ya es conducida hacia la siguiente etapa de mecanizado.

- Máquina rectificadora: Se dispone de un total de dos máquinas rectificadoras, ambas son de la marca DANOBAT y se diferencian por el nombre de la marca y un número, 1 y 2. Se tratan de rectificadores de la gama LG-1000, diseñada específicamente para el proceso de rectificado de piezas de alta precisión. Esta versión ofrece dos variantes de mecanizado, el mecanizado convencional y el

mecanizado de alta velocidad, que para este caso va a ser necesario operar en el segundo de los modos, alta velocidad. Estas máquinas se caracterizan por ofrecer las siguientes ventajas:

- Alta producción: estas máquinas son capaces de completar la operación de rectificado por pieza en tan solo 6 segundos, incluyendo la acción del robot de carga y descarga que está implementado dentro de la misma máquina.
- Tiempos de cambio cortos: Ligado al apartado anterior, la presencia de este robot, mejora la capacidad de producción gracias a que posee dos pinzas de amarre, por lo que el cambio de tuerca entre la terminada y la que entra al proceso se produce simultáneamente.
- Acabado en un solo “set up”: La operación completa es realizada en una sola pasada, no se necesita un complejo programa de operaciones.
- Proceso automático (CNC): Esta máquina dispone de un software programable al cual introducirle las órdenes requeridas para llevar a cabo el proceso de manera automática y poder repetir siempre el mismo ciclo con cada tuerca.

A continuación, se explicará con detalle la configuración de estas máquinas DANOBAT, desglosados en los elementos que intervienen en la operación de rectificado exterior y una observación sobre los ejes de la máquina.

- Plato de garras: El plato de garras de esta máquina, debe ser adecuado a la pieza a la operación que se debe realizar. En este caso, se trata de una pieza cilíndrica y hueca en el centro, y la operación es un rectificado en la cara exterior, por lo tanto la sujeción de la pieza se debe hacer desde el interior, y más concretamente, centrado en tres puntos, ejerciendo la misma fuerza en cada uno, para asegurar que las tuercas queden perfectamente centradas y listas para el rectificado. Este tipo de agarre, es muy similar al que se tiene en el robot de la célula de fresado interior.
- Muela de abrasión: Se trata de la herramienta con la que se realiza este tipo de mecanizado de rectificación. El material y el diseño deben ser adecuados para soportar las extremas condiciones de fricción, temperatura, desgaste, etc. que se producen durante el proceso.

En cuanto al material, se trata de Carburo de Silicio (SiC). Se escoge este material ya que es uno de los materiales más duros que existen en el mercado. Este material se obtiene a partir de coque (Combustible sólido formado por la destilación de carbón bituminoso calentado a temperaturas de 500 a 1.100 °C y sin contacto con aire) y de arena de Silicio a más de 2.000 °C.

En la zona de ataque, debe tener el perfil igual al de la pieza, para poder completar el proceso de una única pasada o ataque de herramienta. La

dimensión en cuanto a diámetro es de 500 mm. Aunque esta medida disminuirá en función del uso, debido al desgaste.

Teniendo en cuenta las revoluciones máximas a las que puede llegar el servomotor de la muela y el diámetro máximo, se puede llegar a alcanzar una velocidad de corte en el extremo de unos 140 m/s. Pese a que esta velocidad tan elevada mejoraría el tiempo del proceso, siempre se va a operar a velocidades más reducida para no estar funcionando a potencia máxima.

El ataque de la muela se produce diagonalmente, es decir, el ataque no es en dirección perpendicular al eje axial del cabezal de la máquina, se produce simultáneamente en este eje como en el eje radial de la pieza como se puede apreciar en la imagen siguiente.

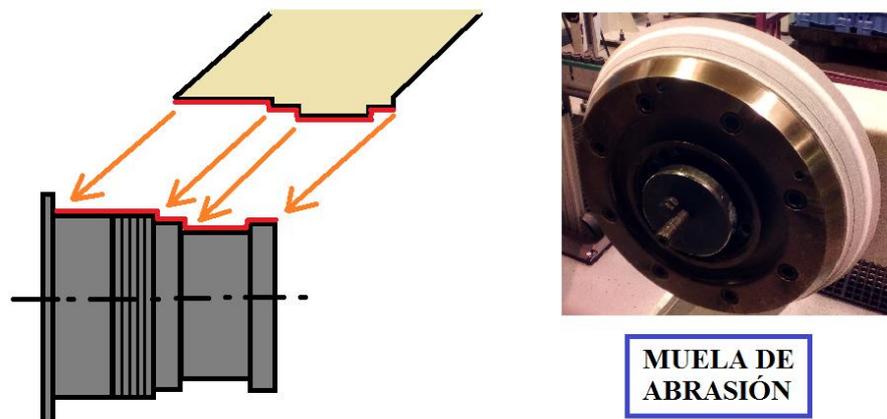
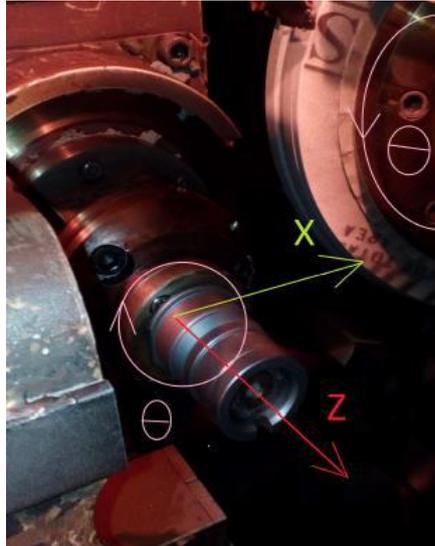


Imagen 19 - Ataque de la muela y muela de abrasión

Como se ha comentado, la muela sufre un desgaste progresivo, que aunque es mínimo, para garantizar que el rectificado se produce con la precisión requerida y la rugosidad de acabado también es la adecuada, es necesario realizar cada diez piezas rectificadas, una operación denominada diamantado. Esta operación consiste en repasar el perfil de ataque de la muela, de manera que se asegura la perfecta relación de geometrías entre este perfil y el de la tuerca de bolas. Para ello, la muela se desplaza hacia una zona de la máquina donde se encuentra instalada una cuchilla, formada por cuatro láminas de diamante (material más duro que existe). Este proceso se lleva a cabo cada 10 tuercas rectificadas.

Al igual que cualquier herramienta de corte, la muela de abrasión tiene una vida útil. Esta vida de uso está definida por el radio crítico, al que se llega por el desgaste y el propio proceso de diamantado. El cambio de herramienta es manual y se lleva a cabo por el operario, ayudado por una máquina especial debido al elevado peso de estas muelas de abrasión.

- Ejes del proceso: Existen dos tipos de ejes en este tipo de máquinas DANOBAT, los ejes lineales y los ejes de giro.



- Ejes lineales: Estos ejes están representados en coordenadas cilíndricas, en relación a las tuercas, es decir, se tiene el eje axial (Z) y el eje radial (X). Estos ejes son accionados por motores lineales y controlados por reglas ópticas, por lo que se obtiene una mejor repetitividad del proceso y mayor precisión. Estos ejes sirven como referencia para los movimientos de ataque de la muela.

Imagen 20 - Detalle ejes de giro máquina DANOBAT

- Ejes de giro: Estos dos ejes de giro los posee el cabezal del plato de garras y el cabezal de la herramienta. Ambas revoluciones se controlan mediante el programa de CNC y están calculados para optimizar el proceso, teniendo en cuenta el tiempo de rectificado y el desgaste de la muela. Además, como apoyo a tener el mejor resultado combinado también con un desgaste adecuado de la herramienta, los ejes giran en sentidos opuestos, con ello se disminuye la acción de la fricción y además, no se produce en condiciones de temperatura elevadas.
- Robot de carga y descarga: Se trata de un brazo robot antropomórfico de seis grados de libertad, cuya función es recoger las tuercas de la cinta transportadora de carga e introducirlas en el plato de garras, y una vez finalizado el proceso de rectificado, recogerla y depositarla en la cinta transportadora de descarga. Este robot, al igual que el de la célula de fresado, posee dos pinzas de amarre de tuercas. Con ello se consigue minimizar el tiempo de cambio de pieza, y en consecuencia, se optimiza el tiempo total del proceso, siendo de 6 segundos por tuerca completa

Este robot requiere una alta inversión inicial, tanto el propio coste del brazo robot, como de instalación y preparación del programa de tareas, pero asimismo, hay que decir que las ventajas que ofrece hacen que se amortice con creces esta inversión. Dichas ventajas son las siguientes:

- Maniobrabilidad: Permite alcanzar zonas de la máquina, que a un operario le costaría mucho esfuerzo y riesgo.
- Seguridad: Complementario al anterior, la tarea de carga y descarga no la realiza una persona, por lo que en el proceso no se expone a ningún operario a los riesgos que entraña dicha función.

- Tareas repetitivas y pesadas: El robot es capaz de realizar siempre el mismo movimiento, de la misma manera y además, sin sufrir fatiga o cansancio y sin bajar la calidad de la producción.
- Velocidad de producción: Como ya se ha comentado, el uso de dos pinzas y la ubicación dentro de la máquina, permite que este robot opere mientras se está trabajando y mecanizando tuercas.
- Operario: En esta área de la línea de producción, se hace necesaria la presencia de un operario para que el proceso tenga continuidad y sea un proceso de calidad. Las tareas que este operario desempeña son varias y se van a especificar a continuación:
 - Recepción de material: En esta parte de su labor, el operario tiene que recepcionar las tuercas que llegan de la fase de tratamiento térmico y cementación y de la colocación de dichas tuercas una a una, en la posición correcta en la cinta transportadora que da comienzo al proceso de rectificado y que guía las piezas, en primer lugar, a la fase de impresión del código por láser.
 - Verificación de diámetros: Se lleva a cabo al empezar el turno y en la primera tuerca rectificada, en cada máquina, después de la operación de diamantado o cuando haya habido un cambio de herramienta. El operario debe sacar la tuerca en cuestión de la cadena de fabricación, para realizar una breve inspección de calidad en lo referente a los diámetros exteriores de la tuerca. Este control se lleva a cabo mediante un útil muy sencillo de medición, en el cual el operario coloca la tuerca en la posición correcta dentro del útil y mediante una pantalla el operario puede leer al momento el valor de los diámetros a controlar, y están dentro de las tolerancias exigidas.

Las imágenes siguientes muestran el útil de medición y el valor de una medición realizada a una de las tuercas de bolas.



| | | | |
|----|------------------------------|---------|----|
| M1 | Diámetro 38.504 0.0 / -0.012 | 38.4966 | mm |
| M2 | Diámetro 36.862 0.0 / -0.012 | 36.8578 | mm |
| M3 | Diámetro 38.504 0.0 / -0.012 | 38.4967 | mm |
| M4 | Diámetro 39.994 0.0 / -0.012 | 39.9888 | mm |

Imagen 21 - Útil de medición de diámetros. Valores de medición

Siendo los diámetros de control los siguientes.

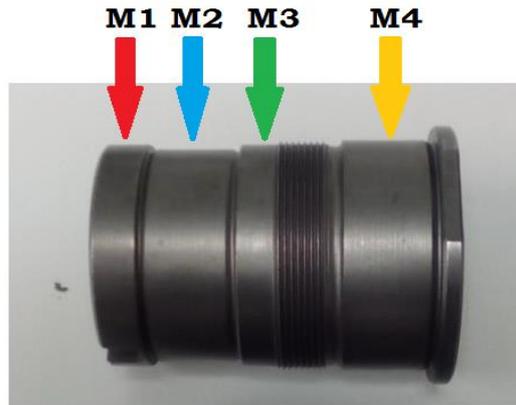


Imagen 22 - Detalle diámetros de control

Si la tuerca diera un error en alguno de los cuatro diámetros, el operario automáticamente y ayudado por el código impreso en las tuercas, debe localizar las nueve tuercas siguientes a la tuerca de control y retirarlas del proceso, para que puedan ser evaluadas una a una y ver si han sufrido el mismo problema, y en caso de ser afirmativo, ver si existe la posibilidad de recuperar dichas piezas o si se consideran chatarra.

- Transporte de tuercas de control: Las primeras tuercas rectificadas, en cada una de las máquinas, al inicio de cada turno o después de un cambio de herramienta, ya que en estos cambios de turno o de herramienta, las máquinas han parado su actividad y deben iniciarla nuevamente de manera óptima. El transporte lo realiza después de la verificación anterior de los diámetros y las conduce hasta la zona de metrología, donde se producen las mediciones de calidad específicas para verificar que el proceso está siendo adecuado. Al acabar el turno, el operario debe guardar un tiempo para recoger esas tuercas que han sido llevadas a inspección y devolverlas a la línea de fabricación, para seguir con la siguiente etapa de producción.

4.5. CÉLULA DE RECTIFICADO INTERIOR

Esta es la última etapa en la que se van a realizar operaciones de mecanizado sobre la pieza y se trata de ajustar las tuercas a tolerancias dimensionales y de rugosidad a niveles de acabado, es decir, de micrómetros, en el interior de las tuercas, más concretamente en las cuatro pistas interiores donde circularán los rodamientos.

Esta estación consiste en una célula de mecanizado, similar a la célula de fresado, con un robot que se encarga de la carga y descarga de las tuercas y los centros de mecanizado, que en vez de utilizar herramientas de corte, mecanizan por medio de muelas de abrasión especiales. Si bien es verdad, existen dos claras diferencias.

- Llegada de piezas: Las tuercas van llegando de una en una, procedentes de la cinta transportadora de descarga de la fase anterior (rectificado exterior). De esta manera el brazo robot va tomando piezas, siempre desde el mismo punto de origen y llevándolas al centro de mecanizado que haya terminado ya con una tuerca. La salida de las tuercas se produce por medio de una ventana, donde se

van almacenando y el operario las coloca en cajas a la espera de ser llevadas a la zona de montaje de la fábrica.

- Número de centros de mecanizado: En esta fase, se cuenta con cinco centros de mecanizado, en lugar de los tres de la célula de fresado. Este hecho consigue que se tenga un buen régimen de producción, pero a su vez exige al robot manipulador estar en constante movimiento, trabajando a pleno rendimiento. Además, como se ha explicado, estos centros de mecanizado son idénticos, de la marca DRAKE tanto en el plato de garras, como en los ejes, etc. La única salvedad, es la herramienta. Para el rectificado interior se emplean muelas de anchura igual a la que se necesita en el paso de las pistas en la carrera activa y de diámetro que permita entrar dentro de la tuerca y mecanizar, sin poner en riesgo la pieza en la acción de talonado para mecanizar la carrera de vuelta. El material es el mismo que el que se utiliza en las muelas de rectificado exterior, Carburo de Silicio y eso se debe a las mismas razones, que anteriormente, es uno de los materiales más duros y resistirá durante más tiempo la acción de fricción entre la herramienta y la pieza.



Imagen 23 - Muelas de abrasión (DRAKE)

La vida de estas herramientas no soporta muchos ciclos, ya que no es posible reparar el perfil como en el caso del rectificado exterior. Los cambios de herramienta o de muela, se produce de manera automáticamente y está controlado por el programa de CNC que maneja toda la célula de fabricación y está previsto que cada 50 tuercas rectificadas por máquina, salta el programa de cambio de herramienta.

Al igual que en cada una de las estaciones de fabricación de esta línea, es necesario la acción de un operario encargado del control de la célula de rectificado interior. Este operario va a desempeñar las siguientes tareas:

- Descarga de material: El operario debe colocar las tuercas que van siendo expulsadas por el robot en las cajas de embalaje estándar que se utilizan durante todo el proceso. Debe ir colocándolas en palés, a la espera de que un operario de la zona de montaje aparezca con una carretilla motorizada y las transporte para su montaje en las direcciones asistidas.

- Transporte de las piezas de control: Aquellas piezas que se deben controlar, al igual que en los otros dos procesos anteriores, son las primeras tuercas que se mecanizan en cada uno de los centros de mecanizado, al empezar el turno del operario y cuando se haya realizado un cambio de herramienta, en alguno de las máquinas DRAKE. En este caso, el operario debe llevar cinco tuercas (una de cada máquina) al área de metrología ayudado por una carretilla manual.
- Cambio de herramienta: Aunque hemos comentado que el cambio de herramienta se realiza automáticamente, lo que debe hacer el operario es cerciorarse de que siempre haya suficientes muelas de abrasión en cada máquina para poder realizar ese cambio, sin necesidad de que se vea afectada la producción.
- Mantenimiento: Si surgen complicaciones, ya sea por la rotura inesperada de una de las muelas o porque en el laboratorio de metrología una de las tuercas no ha podido ser verificada, este operario debe ser capaz de realizar las correcciones necesarias, para que la célula de rectificado esté el menor tiempo sin producir. También debe tener conocimientos sobre el programa de CNC que maneja la célula, para poder introducir modificaciones si fuese necesario. En caso de que la avería fuese de gran calibre, este operario tiene que hacérselo saber al encargado de producción de la línea de fabricación.

4.6. MONTAJE

Esta es la última fase de todas las operaciones que se realizan en la fábrica antes de ser empaquetados los sistemas de dirección asistida y preparados para ser distribuidos. Las tuercas llegan desde el área de mecanizado hasta la zona de montaje, situada en otra parte de la fábrica y las cuales son transportadas por un operario, ayudado de una carretilla.

Para realizar el montaje se hace necesaria también la presencia de todos los componentes que forman este sistema de dirección asistida. Algunos de estos elementos, al igual que las tuercas de bolas, también reciben las últimas operaciones de mecanizado y acabado dentro de la empresa, y otros provienen de empresas suministradoras. A parte de elementos de conexión, juntas de estanqueidad y demás elementos de unión, como tornillos, arandelas, etc. Los elementos principales que llegan a esta área de producción final son los siguientes:

- Tuerca de bolas: Este es elemento de estudio en este trabajo y toda la información sobre su función, proceso y demás información de interés está completamente explicada en este Trabajo Fin de Máster.
- Cremallera o husillo: Es una de las piezas clave dentro del complejo sistema de distribución de la dirección, ya que se encarga de transformar el movimiento giratorio del volante, en movimiento lineal gracias a unos piñones mecanizados en uno de los extremos que en conjunto forman lo que se denomina como cremallera, y que da nombre a la pieza. En el otro extremo de la pieza se mecaniza una hélice, cuyo diámetro de paso es igual al de las pistas interiores de

las tuercas, y donde se transmite el movimiento de ayuda de la tuerca al eje, para favorecer y minimizar el esfuerzo que se debe realizar para girar el volante.

En la imagen siguiente se puede ver una imagen general de este elemento y además se ofrece en detalle el husillo o hélice y la cremallera compuesta por piñones de igual tamaño.

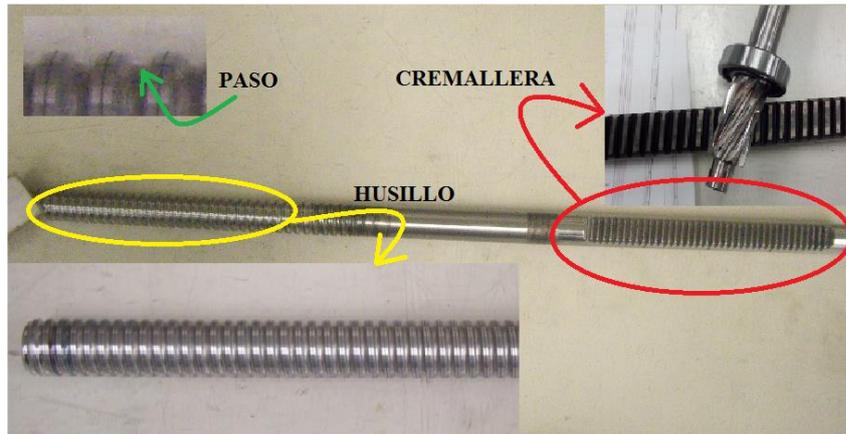


Imagen 24 - Descripción gráfica de la cremallera de dirección

Esta pieza se mecaniza por completo en la empresa. Se reciben barras de acero de la medida requerida y a partir de ahí, las barras pasan por una serie de etapas en las que van sufriendo diferentes transformaciones hasta conseguir las cremalleras que se montan en el conjunto de distribución de la dirección. Estas operaciones son las siguientes:

- Laminado
 - Brochado
 - Mecanizado interior de los extremos
 - Tratamiento térmico
 - Rectificado exterior
 - Primer y segundo rectificado del husillo
 - Autopuling de los dientes de la cremallera
- Rodamientos: También llamados bolas por su forma esférica, se introducen dentro de las tuercas en las cuatro pistas y además se tiene que hacer coincidir con la colocación de la tuerca en el husillo de la cremallera. Los rodamientos ruedan sobre el eje, circulando entre el husillo y la tuerca, encerrados en las pistas interiores de la tuerca y el paso de la hélice. De esta manera se consigue

rebajar la fricción entre el husillo y la tuerca a cero, por lo que se alarga la vida útil de ambos elementos.

La siguiente imagen muestra un esquema del funcionamiento de este sistema de bolas, donde se puede observar como gracias a estos rodamientos no existe contacto directo entre la tuerca y el husillo.

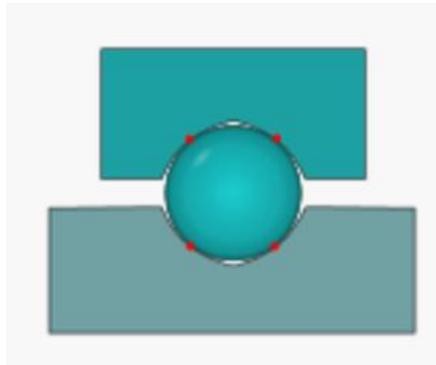


Imagen 25 - Esquema sistema tuerca-rodamiento-husillo

- **Caja de dirección:** Este elemento es la pieza base donde se ensamblan todos los elementos que intervienen en el mecanismo de la dirección asistida eléctrica. Se construye mediante moldeo por fundición de acero y posteriormente solo necesita ser rectificada por la parte interior y aquellos orificios destinados a la unión mediante tornillería. Las cajas de dirección llegan al área de montaje, provenientes del área de fundición y hornos de la fábrica, y son transportadas gracias a una carretilla conducida por el mismo operario que se encarga de abastecer y transportar aquellas piezas destinadas al área de montaje.

En la imagen que viene a continuación, se muestra la caja de dirección en conjunto con algunos de los elementos que componen todo el sistema del eje de dirección.

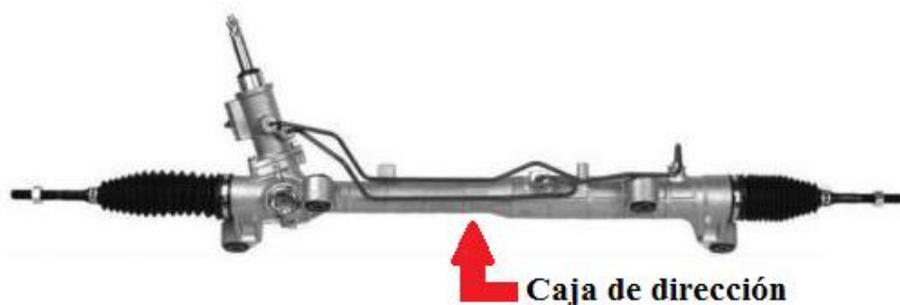


Imagen 26 - Conjunto dirección asistida eléctrica. Detalle caja

- Motor eléctrico: Estos pequeños motores son suministrados por una empresa externa, la cual los fabrica según las especificaciones y necesidades de potencia y geometría para que encajen perfectamente en el conjunto. Estos motores son los encargados de proporcionar la fuerza de ayuda, para hacer más cómoda la conducción. Al accionarse el motor, éste da impulso a la tuerca de bolas que girará en función del sentido que sea preciso, de tal manera que los rodamientos impulsarán la hélice de la cremallera, acompañando el movimiento y minimizando el esfuerzo necesario para girar el volante. El accionamiento del motor viene controlado por la unidad de control de la dirección asistida que es el último de los componentes principales que se montan en esta etapa de fabricación.
- Unidad de control: Esta unidad de control se encarga de accionar y regular la acción del motor eléctrico. Se encarga de procesar la información que le llega desde un sensor situado en el volante. Gracias a este sensor, cuando el conductor gira el volante, la unidad de control recibe toda la información y según los parámetros que le han sido programados, activa el motor eléctrico, haciendo que aporte la potencia requerida en cada preciso momento.

En la siguiente imagen se puede ver un esquema del montaje completo de todo el sistema de distribución de la dirección del vehículo.



Imagen 27 - Montaje completo del sistema de distribución de la dirección

Una vez que se dispone de todos estos componentes, puede dar comienzo el montaje del sistema de dirección asistida. El proceso está constituido por subprocesos, en los que se van acoplando los componentes, de manera progresiva y es el operario el que va realizando las diferentes operaciones de ensamblaje. El número de etapas que constituyen el proceso final de montaje son tres. Estas sub-estaciones son las siguientes:

- Montaje del sistema mecánico: Se precisa de la tuerca y de la cremallera en un primer momento. Ambas son colocadas en una máquina especialmente diseñada para introducir los rodamientos en las pistas interiores de la tuerca, al mismo tiempo que es introducida en la hélice de la cremallera. Una vez que se tienen los dos componentes ensamblados, se introducen dentro de la caja de dirección para formar la base, en la cual se van a ir acoplando los demás componentes. Al acabar esta etapa, el operario empuja el conjunto hasta la siguiente etapa.
- Montaje del sistema eléctrico: Seguidamente el mismo operario recoge el motor eléctrico y la unidad de control, para a continuación, atornillarlos y fijarlos en su posición a la caja de dirección. Este proceso es manual, y el operario se ayuda de pistolas neumáticas para realizar la fijación de los tornillos con la presión adecuada. Por este motivo, el tiempo invertido no es constante, es diferente cada vez que se realiza esta operación, ya que el factor que influye es el factor humano y no es un proceso programable.

Debido a que es uno de los procesos más costosos en cuanto a tiempo, se dispone de tres líneas de montaje, con tres operarios para realizar esta operación, y de esta manera conseguir que la producción sea más constante y no haya mucho atasco en la llegada de material.

4.7. VERIFICACIÓN

El sistema de dirección asistida llega a la máquina de verificación. Igualmente que en el apartado anterior, también se dispone de tres máquinas de verificación. Aquí, el operario conecta el sistema a la máquina y se trata de comprobar que todo el mecanismo está perfectamente ensamblado y puede ser llevado a la fase embalaje y distribución. Las comprobaciones que se necesitan realizar son las siguientes:

- Vibraciones
- Ruido
- Fuerza de empuje adecuada
- Estabilidad

Este proceso está programado y la duración es fija, la única variable aleatoria que influye en la no repetitividad del tiempo de proceso, es el tiempo que el operario invierte en ajustar el sistema de dirección a la máquina de verificación.

Si el resultado de la verificación no fuese satisfactorio, el conjunto se llevaría a una estación complementaria en la cual se analizaría y se intentaría poner solución a al problema.

Por otro lado, si el conjunto es válido, se llevará a la zona de embalaje.

4.8. EMBALAJE

En esta área de la fábrica llegan todos los sistemas de dirección asistida fabricados en la línea y se empaquetan en cajas formadas por ocho conjuntos.

Se dispone de dos operarios y dos máquinas que ayudan a estos operarios a realizar las tareas de manera más sencilla, y que además permite completar las tareas en el menor tiempo posible. Este tiempo no es constante, puesto que el factor humano está presente y no siempre se realiza la tarea de la misma manera y en el mismo tiempo.

A parte de estos dos operarios, hay un tercero encargado de manejar una carretilla, cuya función es transportar los conjuntos que finalizan su verificación en el área de montaje, hasta el área de embalaje y cuando los paquetes estén preparados para su distribución, recogerlos y trasportarlos hasta la zona donde se almacenan y esperan a ser distribuidos a la siguiente empresa dedicada a seguir con la producción del conjunto del vehículo.

4.9. METROLOGÍA

El área de metrología dimensional consiste en un laboratorio aislado de la zona de máquinas y producción de la fábrica donde se aplica la ciencia que tiene como objeto el estudio de las unidades y las medidas, que en este caso sirve para la realización del control de calidad y verificación de piezas, en lo relativo a dimensiones y geometría de las tuercas.

El laboratorio de metrología está aislado de la cadena de producción por varios motivos que tienen que ver con las condiciones físicas y ambientales que se necesitan para realizar mediciones de calidad. De no ser así, no sería posible asegurar que las piezas están siendo verificadas y que se encuentran dentro de las tolerancias exigidas en el diseño de las piezas. Por ello este laboratorio cumple con las especificaciones técnicas demandadas por los organismos que regulan la normativa que debe seguir cualquier laboratorio de metrología dimensional, cuyos aspectos fundamentales son los siguientes:

- Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Humedad relativa: $50\% \pm 1\%$
- Limpieza: Ya sea en las máquinas de medición, en los útiles que se utilizan, como en todo el proceso que tiene que seguir el operario durante su trabajo.
- Exento de vibraciones.

Si por lo que sea alguno de estos factores fallara, las mediciones podrían no ser válidas y desencadenando una serie de sucesos que repercutirían en el mal funcionamiento de la línea de mecanizado y por lo tanto, alterando la calidad de la producción.

Para la gestión de esta área, es necesaria la función de un encargado de laboratorio de metrología. A esta persona se le denominará para este trabajo como operario de metrología. Las funciones de este operario son, distinguir mediante las etiquetas con las

que llegan las tuercas, en qué fase del proceso de fabricación llegan las piezas y colocarlas en sus respectivas máquinas de medición.

Una vez conocido en profundidad este laboratorio de metrología y cuál es la metodología del funcionamiento de las máquinas de medición, se va a especificar qué tipo de revisiones necesitan las tuercas de bolas según la procedencia de las mismas, dependiendo en qué fase de la línea de fabricación se encuentren.

- Célula de fresado.
 - Perfil: Se trata de ver que la dimensión de las pistas no es mayor que la tolerancia especificada, según el plano interior de esta fase de desbaste. Si la anchura fuese excesiva, se corre el riesgo de que en la fase de rectificado no haya material que mecanizar, y por tanto no alcanzando la rugosidad necesaria para no comprometer la vida útil de las tuercas. Esta comprobación se realiza con el perfilómetro mecánico. El ordenador recoge el perfil de una de las pistas, y es capaz de calcular todos los parámetros y compararlos con los nominales, como se ve en la imagen siguiente.

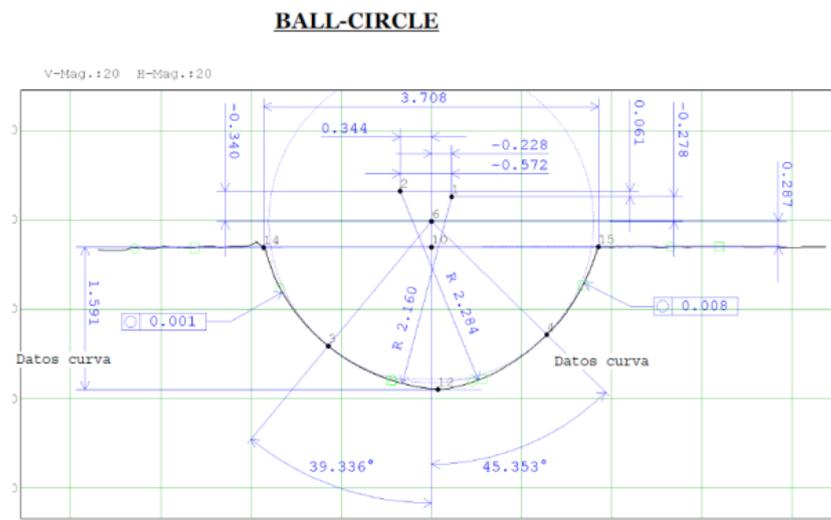


Imagen 28 - Verificación del perfil de una pista interior

- Zeiss: El operario coloca la tuerca en el plato de garras de la máquina tridimensional, la cual da nombre al proceso (ZEISS), y selecciona el programa de *Ballnut* → *Desbaste*. Con esta comprobación, se quiere verificar varias cuestiones, entre ellas la posición relativa de las pistas frente a una referencia externa de la tuerca, como es el rebaje que se explicó en la parte del diseño de la pieza. Además se verifica la concentricidad de todos los diámetros, tanto exteriores, como los interiores de las pistas. También realiza mediciones dimensionales, para comprobar que las tuercas tienen las dimensiones específicas de diámetros, y longitudes para esta fase en concreto.

- Rectificado exterior.
 - Rugosidad exterior: Para ello el operario coloca la tuerca en útil de sujeción específico y con mucho cuidado debe colocar el palpador en el punto de inicio de la medición. Una vez colocado el palpador, el operario ajusta en la máquina la longitud de la medición y pulsa el botón de inicio. Cuando finaliza la medición, la pantalla de la máquina muestra el resultado de la rugosidad media (Ra), que debe situarse siempre por debajo de $0,6 \mu\text{m}$.



Imagen 29 - Verificación rugosidad exterior de una tuerca

- Célula de rectificado interior.
 - Perfil: Esta operación es análoga a la de la fase de desbaste, con la diferencia que el cabezal de la máquina es otro, para que ajuste la pieza completamente. El programa que selecciona el operario es el correspondiente a esta fase de producción, ya que los valores nominales con los que comparar los datos obtenidos en la medición son específicos para el rectificado exterior.
 - Rugosidad interior: La metodología que sigue el operario, es similar al procedimiento de medición con el perfilómetro, el operario coloca la pieza en el cabezal de la máquina y posiciona el palpador manualmente en el punto de inicio y ejecuta el programa.
 - Zeiss: Al igual que el perfil, el procedimiento es el mismo que en el desbaste y las mediciones que realiza la máquina son las mismas. La diferencia radica, en el programa seleccionado por el operario, que en este caso es el correspondiente al rectificado interior.

Los datos e informes obtenidos en la verificación de las tuercas en las dos últimas fases de la producción, quedan registradas en el código que posee cada tuerca. En el caso de la célula de desbaste, al no haber pasado por la estación de impresión láser, la manera de distinguir la procedencia de las tuercas, es mediante unas marcas, de tal manera que si procede de la DRAKE 1, la tuerca tendrá un punto en una de sus caras frontales, si procede de la DRAKE 2 tendrá marcados dos puntos y si fue procesada en la DRAKE 3, no tendrá ninguna marca.



Imagen 30 - Detalle de las marcas de las máquinas fresadoras DRAKE

4.10. TURNOS DE TRABAJO

Esta es una empresa que trabaja las 24 horas del día, con tres turnos de trabajo de ocho horas cada uno. Estos turnos son los siguientes:

- Mañana → De 6:00 h a 14:00 h
- Tarde → De 14:00 h a 22:00 h
- Noche → De 22:00 h a 6:00 h

Con el fin de no saturar la línea de producción y teniendo en cuenta que, algunos de los procesos de mecanizado se realizan en cuestión de segundos, y otros procesos invierten varios minutos e incluso horas, la fábrica dispone de un calendario de horarios dependiendo la fase del proceso, de tal manera que no siempre se trabaja al 100% de la capacidad en algunas fases, y puede que si se trabaje durante las 24 horas del día pero con una carga de trabajo menor.

De esta manera, la empresa también se garantiza, poder tener capacidad de reacción si necesitara aumentar la producción en caso de ir tarde con el pedido.

A continuación se mostrará una tabla dónde se expone los turnos de trabajo y la capacidad con la que se trabaja en dicha área.

| Fase del Proceso | Turnos y Capacidad | | | | | |
|------------------------|--------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| | Mañana | Capacidad | Tarde | Capacidad | Noche | Capacidad |
| Área de Fresado | ✓ | 3/3 | ✓ | 3/3 | ✗ | 0 |
| Área de Hornos de T.T. | ✓ | 2/2 | ✓ | 2/2 | ✓ | 1/2 |
| Área de Rec. Ext. | ✓ | 2/2 | ✓ | 2/2 | ✗ | 0 |
| Área de Rec. Int. | ✓ | 5/5 | ✓ | 5/5 | ✗ | 0 |
| Área de Metrología | ✓ | 5/5 | ✓ | 5/5 | ✗ | 0 |
| Área de Montaje | ✓ | 3/3 | ✓ | 3/3 | ✓ | 3/3 |
| Área de Embalaje | ✓ | 2/2 | ✓ | 2/2 | ✓ | 2/2 |

Tabla 1 - Turnos de trabajo

4.11. ESQUEMA PRELIMINAR DEL SISTEMA

En el proceso de crear un modelo de simulación, en puntos anteriores se ha explicado, que se debe crear un primer esquema de flujo, en el que se representen las operaciones y sucesos, más relevantes, es decir, los eventos, y a partir de este esquema ir desarrollando con más detalle el sistema completo, que se ha acaba de analizar en profundidad.

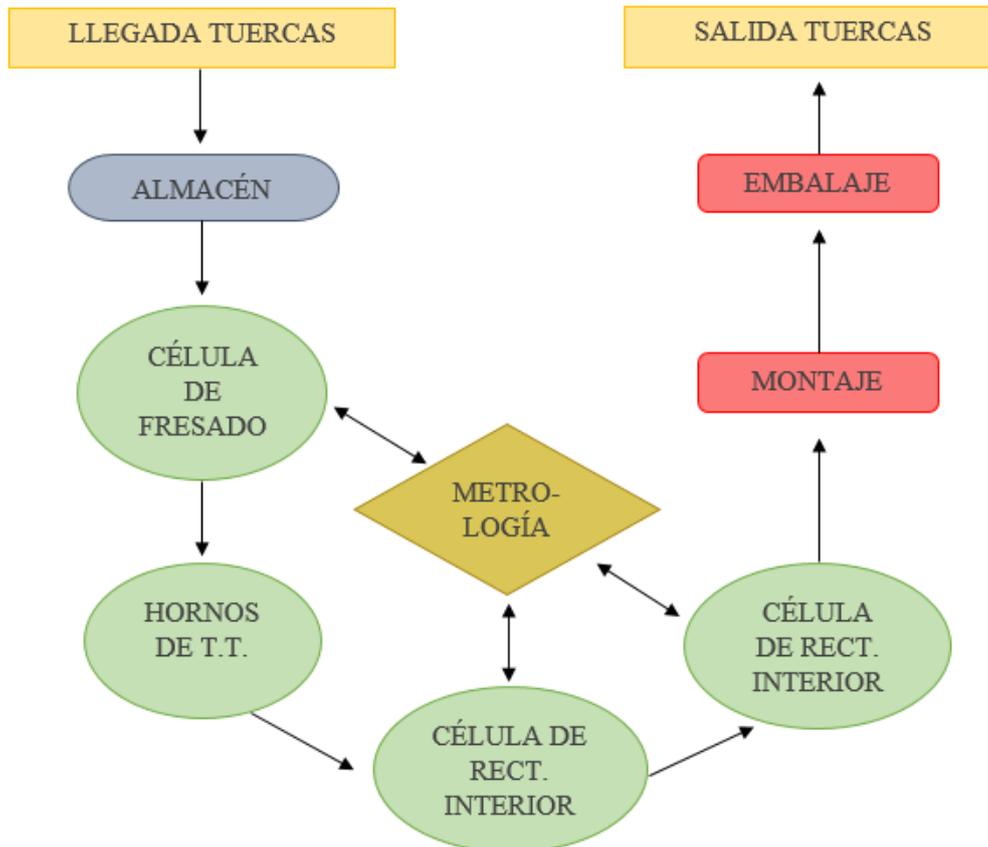


Imagen 31 - Esquema preliminar del sistema

En este esquema, sin llegar a entrar en detalle se puede observar el camino que debe realizar cada una de las tuercas dentro del sistema. Por tanto, a partir de este diagrama esquemático, habrá que ir agregando datos estadísticos que ayuden a completar el modelo de simulación.

4.12. DISPOSICIÓN DE LA PLANTA DE FABRICACIÓN

Después de analizar en detalle cada uno de los procesos de los que consta esta línea de fabricación, a continuación se mostrará la ubicación de cada fase dentro de la planta industrial, y se hará mediante el apoyo de planos, de los cuales, se comenzará dando una visión global de toda la fábrica, y a partir de ahí, se irá describiendo con más detalle cada una de las secciones.

Este punto es muy importante, ya que posteriormente, cuando se necesite modelar los transportes de las piezas, es necesario conocer las distancias que separan los puntos de origen, de los puntos de destino de las tuercas de bolas.

En los planos se ha querido exponer únicamente las zonas que tienen interés para este trabajo. Es decir, en esta planta de producción, se fabrican más componentes a parte de la tuerca de bolas de la que se ocupa este trabajo, también se fabrican las cremalleras de la dirección, las cajas del conjunto en la zona de hornos, y otro tipo de materiales para otros modelos de vehículos.

4.12.1. PLANO FÁBRICA

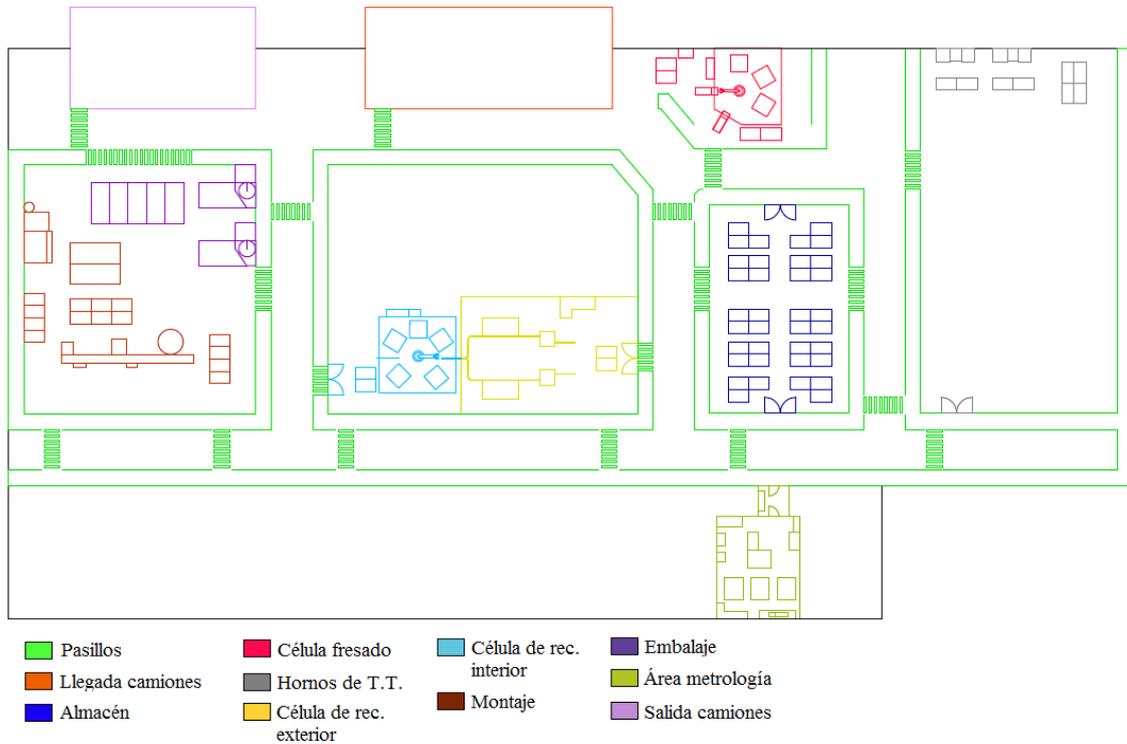


Imagen 32 - Plano fábrica

Esta es la disposición de las estaciones que entran en juego en la fábrica para poder conseguir el estado final del sistema de dirección asistida eléctrico, mediante el seguimiento de la tuerca de bolas.

Como se puede ver, la zona naranja de la parte superior del plano, es un área destinada a la recepción de material, es decir, los camiones llegan a esa parte de la fábrica y descargan todo tipo de piezas que van a ser tratadas en esta fábrica. Una vez que el camión a depositado la carga en el muelle de la fábrica, los operarios de la misma se encargan de llevar el material al área pintada de azul oscuro, que se trata de un almacén donde se depositan las cajas recién llegadas a la fábrica, y con un cierto orden lógico, para poder ir sacando el material de manera que la primera tanda en llegar al almacén, debe ser la primera que entre a trabajar en la línea de producción. Esto es lo que se denomina, como ya se vio, “FIFO” que quiere decir, *First In First Out*. A partir de este punto las tuercas empiezan a seguir el proceso anteriormente descrito, y que a continuación se va a complementar con planos visuales de cada zona. Esta línea de producción está orientada a que los transportes de piezas de un área a otra, sean lo más

cortos posibles, dentro de las posibilidades que ofrece la fábrica, puesto que no es la única línea de fabricación de la empresa,

4.12.2. CÉLULA DE FRESADO

Es la primera fase de todas, y está situada cerca del muelle de recepción de material y del almacén de piezas en bruto. A continuación se puede ver en detalle esta zona de operación exclusiva de fresado.

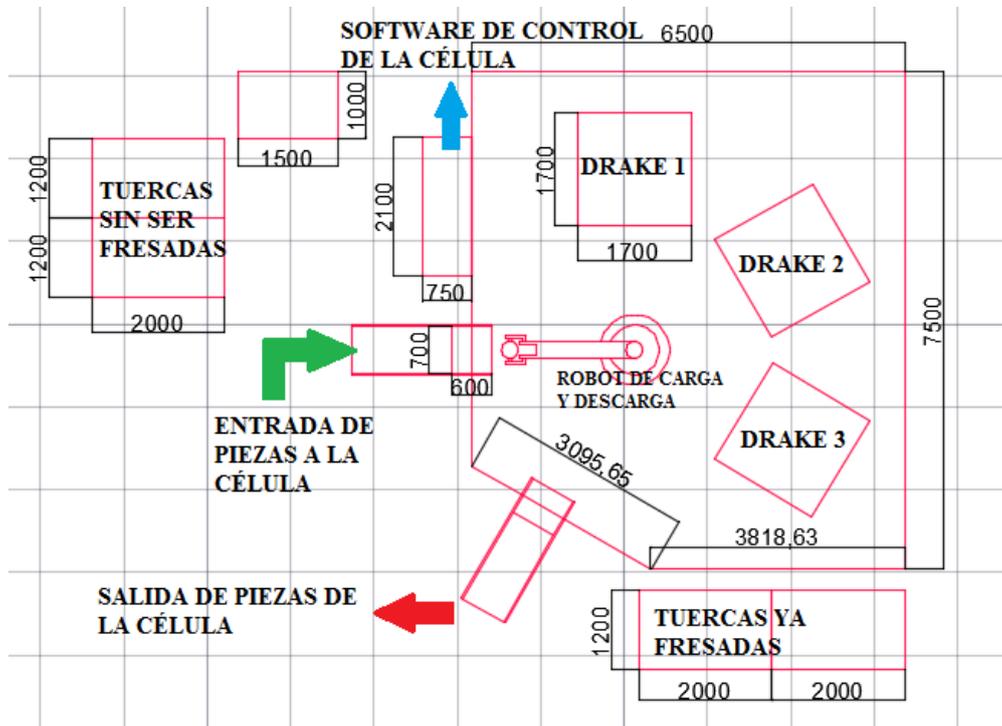


Imagen 33 - Plano célula de fresado

En esta imagen se puede ver como entran y salen las tuercas de la célula de mecanizado, mediante cintas transportadoras paletizadas, que permiten la entrada y la salida de cajas, cuyo contenido es de 30 tuercas.

Una vez que la caja se encuentra dentro de la célula, el robot se encarga de distribuir las tuercas entre los tres centros de mecanizado "DRAKE", y una vez finalizado el proceso de fresado, este mismo robot es el que se encarga de descargar las tuercas y depositarlas en la caja que se encuentra en la cinta transportadora de salida.

Para las tuercas que están esperando a entrar en la célula, hay una zona destinada a su almacenamiento, el orden de prioridades de entrada a la célula es del tipo "FIFO". Igualmente sucede con las tuercas que ya han sido mecanizadas, hay un área reservada para que puedan ser agrupadas para su posterior traslado a la siguiente etapa del proceso.

4.12.3. HORNOS DE T.T.

El área destinada en la fábrica a la industria de la fundición y hornos de tratamiento térmico y químico es muy amplia, ya que las dimensiones de los hornos de fundición son muy grandes. Además esta zona se encuentra apartada del resto de las operaciones,

debido a que las condiciones que se tienen en esta área de calor e impurezas atmosféricas podrían llegar a perjudicar el resto de operaciones.

A continuación se expone un plano, de la zona de interés que tiene esta área para este trabajo.

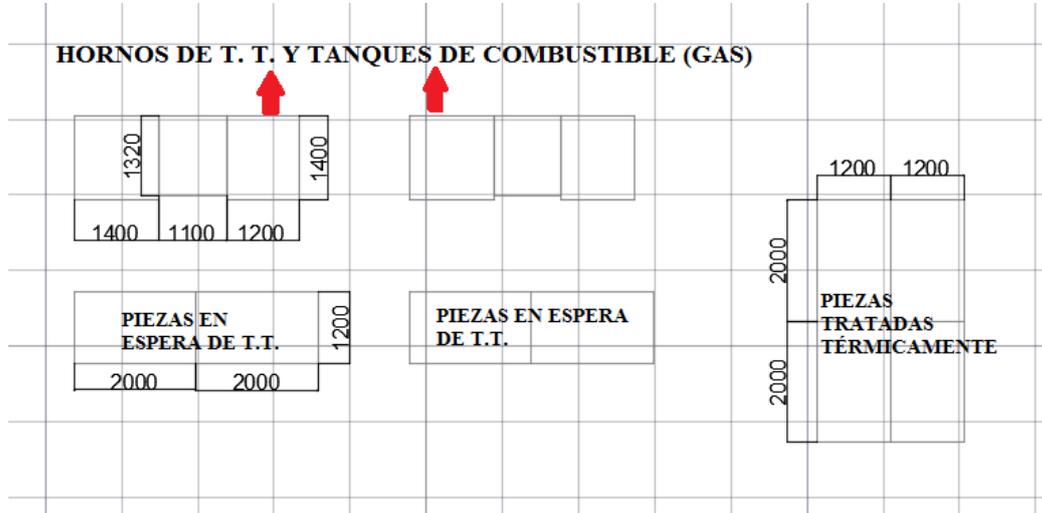


Imagen 34 - Plano área hornos de T.T.

Como se puede ver, existen dos hornos para realizar tratamientos térmicos sobre las tuercas, cada uno con su respectivo tanque de combustible y su salida de humos y ventilación. Además existen áreas para almacenar las piezas que llegan a esta fase para ser tratadas térmicamente, e igualmente hay otra área donde se almacenan a la espera de poder continuar hacia la siguiente estación de producción.

4.12.4. CÉLULA DE RECTIFICADO EXTERIOR

En esta fase, las tuercas inician un encadenamiento de operaciones en las cuales son todas automáticas hasta terminar con el proceso de mecanizado, y por lo tanto, estar preparadas para entrar en la fase de montaje.

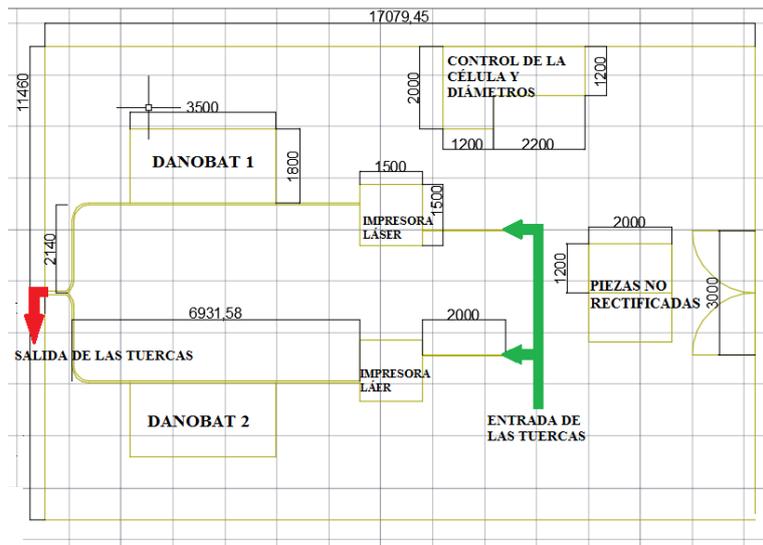


Imagen 35 - Plano célula de rectificado exterior

Como se puede apreciar, al llegar las piezas se depositan en un área donde el operario pueda, cómodamente, ir colocándolas de una en una en la cinta transportadora. A partir de ahí, el proceso es como el que describió anteriormente, las tuercas pasan por la impresora láser, luego entran en la máquina rectificadora “DANOBAT” y continúan su camino a la siguiente fase.

4.12.5. CÉLULA DE RECTIFICADO INTERIOR

Siguiendo la cinta transportadora que enlaza con el final del proceso de rectificado exterior, se llega a la célula de rectificado interior, donde cinco centros de mecanizado “DRAKE” se encargan de llevar las dimensiones de las pistas interiores dentro de los límites de tolerancias.

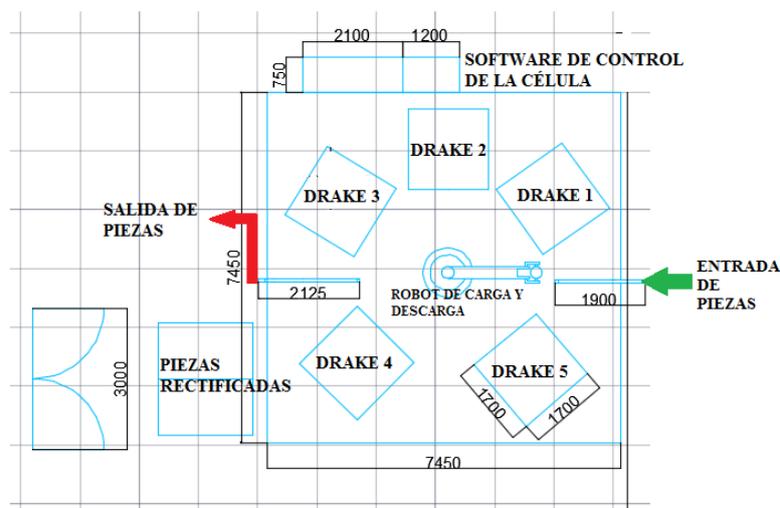


Imagen 36 - Plano célula de rectificado interior

El control de la célula, lo realiza el operario mediante el ordenador y el software instalados en la parte superior del plano.

Una vez finaliza el proceso de mecanizado, las piezas son agrupadas en cajas y almacenadas en un área específica, a la espera de ser transportadas a la zona de montaje.

4.12.6. MONTAJE

En esta fase convergen todas las líneas de fabricación de la planta, y se van acoplando siguiendo un orden de montaje, para que el proceso sea fluido.

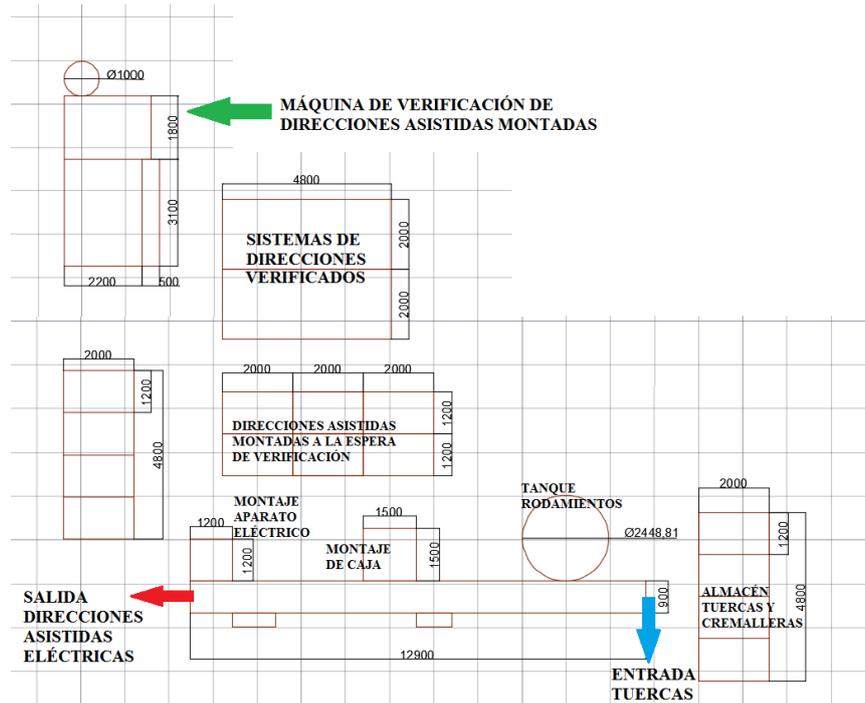


Imagen 37-Plano área de montaje

Cuando están las direcciones asistidas montadas, estas se depositan en una zona a la espera de pasar el control de verificación. Finalmente, después de ser verificadas en la máquina que se encuentra en la esquina superior derecha de la imagen anterior, las direcciones asistidas válidas, esperan el momento de ser agrupadas para la fase de embalaje.

Al igual que este ejemplo, hay otras dos líneas exactamente iguales, para poder tener una producción más fluida.

4.12.7. EMBALAJE

Esta es la última fase de todo el proceso, y en ella se tiene que asegurar que las direcciones asistidas eléctricas, se empaquetan perfectamente para poder ser facturadas en los camiones y que lleguen a su destino en perfecto estado.

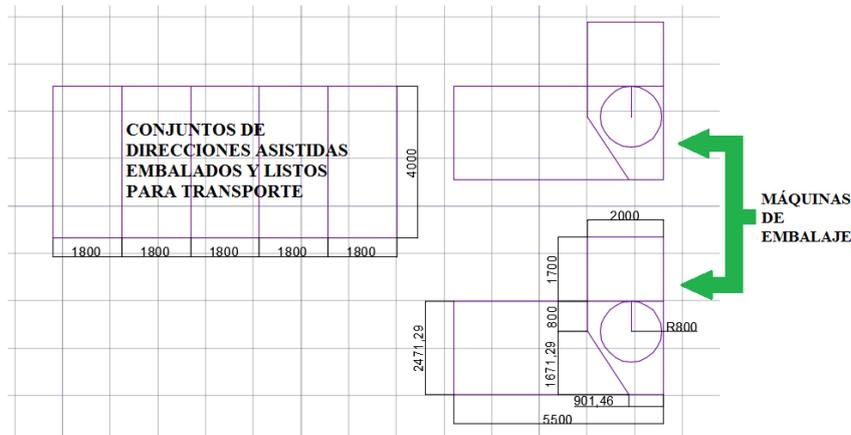


Imagen 38 - Plano área de embalaje

Esta área dispone de dos máquinas de embalar. Una vez que los operarios terminan de empaquetar los conjuntos de direcciones, las depositan en el área reservada para almacenar dichos bultos frente a la puerta de esta sección, la cual tiene acceso directo al muelle de carga de los camiones que salen de la fábrica cargados con los ejes de dirección.

4.12.8. LABORATORIO DE METROLOGÍA

Según la normativa vigente, el laboratorio de metrología debe estar aislado de vibraciones, ruido y suciedad, y además tener unas condiciones específicas de temperatura y humedad relativa en el interior, para que las mediciones sean veraces. Es por este motivo, que el área de metrología y verificación se encuentra apartado de las demás estaciones de producción.

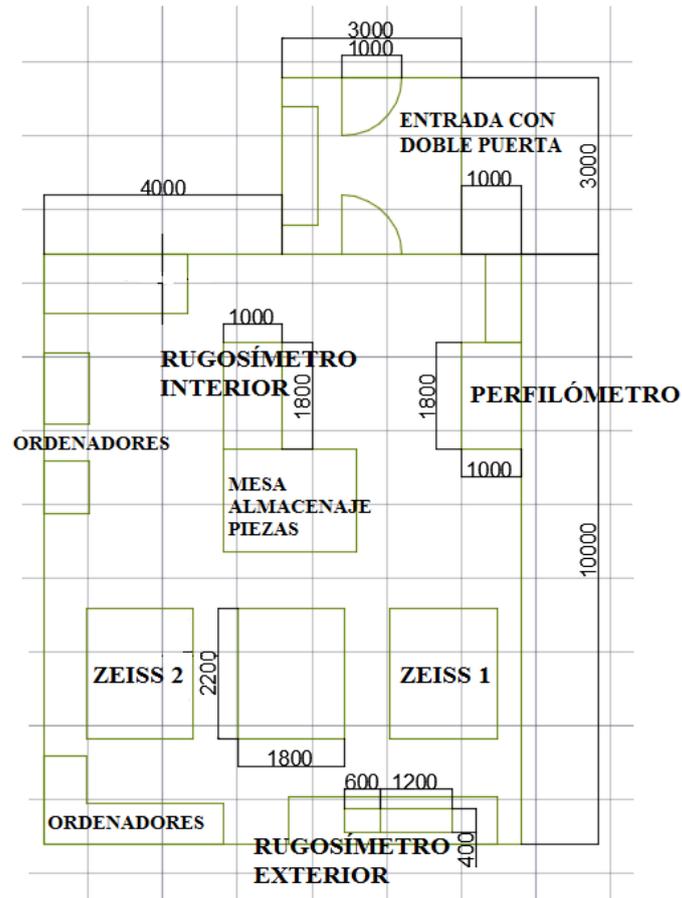


Imagen 39 - Plano laboratorio de metrología

5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

5.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

El software de simulación elegido para la realización de este Trabajo Fin de Máster, es el software *ARENA*. El programa de simulación *ARENA* ha sido diseñado para que se pueda utilizar en las empresas en cualquier tipo de ámbito de trabajo, ya que permite el análisis de todo tipo de procesos, ya sean de producción, fabricación, logísticos, atención al cliente... Además permite el análisis de procesos en los que intervienen diferentes áreas funcionales, consiguiendo una simulación de diferentes ámbitos en un mismo modelo de simulación.

En uno de los anexos del trabajo, se adjunta una descripción detallada del software *ARENA*, sus elementos básicos de trabajo y como trabajar con este programa de simulación.

5.2. ANÁLISIS DE DATOS

Los modelos de simulación son diferentes entre sí, no hay ninguno que pueda ser utilizado para resolver dos casos diferentes, pero dentro de la diversidad se pueden distinguir dos grandes grupos:

- Determinísticos
- Aleatorios

En este trabajo se trata de un modelo aleatorio, ya que hay varios factores que afectan al funcionamiento del sistema que no son controlables como los tiempos de tareas realizadas por operarios, tiempo de cambio de algunas herramientas, fallos en las máquinas, etc. Por lo tanto se debe aplicar el procedimiento para modelar el sistema como un modelo de simulación aleatorio.

Para empezar es necesario, conocer el sistema real, el cual se ha explicado cuidadosamente e intentando exponer la mayor cantidad de detalles y posteriormente realizar un estudio de sensibilidad.

Un estudio de sensibilidad consiste en recopilar la mayor cantidad de datos y detalles para que el modelo de simulación se pueda equiparar al sistema real y se pueda decir que es válido. Estos datos que se hacen necesarios para construir el modelo pueden ya existir, puesto que se trata de modelar un sistema que ya existe o pueden no existir debido a que se está realizando un estudio sobre algún tipo de diseño. En cada caso hay que evaluar los datos de manera diferente.

1. NO existen datos: En este caso, es necesario evaluar la aleatoriedad desde cero, contando con la ayuda de expertos, diseñadores y la experiencia que se pueda tener de otros casos previos.
2. SI existen datos: Si se cuenta con la ayuda de un histórico de datos, pueden darse tres circunstancias:
 - a. Estos datos representar fielmente lo acontecido en el pasado, pero no son válidos para representar el comportamiento futuro del modelo.

- b. Pueden ser absolutamente válidos para representar el sistema fielmente en el modelo.
- c. Siendo válidos, puede que no estén en los términos adecuados que se necesita para construir el modelo de simulación.

Para la creación de este modelo de simulación se pidió a la empresa información acerca de llegadas, tiempos de procesos, fallos y demás información necesaria para realizar el modelo. La empresa facilitó la posibilidad de visitar la fábrica para analizar los tiempos de los procesos, aportó un registro de fallos de los tres últimos meses (Octubre, Noviembre y Diciembre de 2016) y además dio su consentimiento para observar el registro de llegadas de camiones. Otro dato muy importante es la tasa de producción anual. Este dato es muy importante ya que va a ser el objetivo de estudio en el proceso de validación del modelo. Este objetivo de producción que tienen marcado en la fábrica de Pamplona, es de **330.000 unidades al año**, aunque cumplen con ese objetivo más un plus que dependiendo de cómo sea el año pueden ser más o menos. Según comentaros responsables de producción de la empresa, se suele intentar fabricar alrededor de unos **15.000** sistemas de dirección asistida extras al año.

Para los tiempos de proceso, como ya se ha comentado, se realizaron varias visitas a la fábrica para poder cronometrar *in-situ* el tiempo que se invertía en cada una de las operaciones, recogiendo los tiempos de varias operaciones consecutivas. Gracias a estas visitas se pudieron obtener tablas de datos para poder representar mediante una función de distribución el tiempo de ocupación de los recursos.

Es necesario comentar que si el proyecto tuviese la categoría de oficial, estos datos se quedarían escasos, habría que tener un horizonte de tiempo mayor, para obtener un histórico de datos con el que ajustar con mayor precisión las distribuciones estadísticas. Sobre todo hay que destacar que hay fallos que son muy poco frecuentes, y que apenas se llegan a producir en este corto periodo de tiempo, por lo que una ventana mayor de tiempo de recogida de datos, facilitaría la implementación de esta información en el modelo, haciendo que el modelo sea más representativo reproduciendo los fallos en la simulación.

Con las tablas de datos ordenadas, el siguiente paso es analizar estos datos. Para ello ARENA ofrece una herramienta para poder realizar un análisis básico de estas tablas de datos y poder obtener funciones de distribución ajustadas correctamente. Esta herramienta se denomina INPUT ANALYZER y su funcionamiento es muy sencillo, basta con cargar una columna de datos al programa y pedir que ajuste estos datos, con una serie de distribuciones estadísticas que tiene programadas, ofreciendo en primera instancia la que mejor se ajusta.

La orden que rige este procedimiento y que permite al programa saber que función de distribución es la que mejor ajusta, es mediante ajustes gráficos y tests, de los cuales es muy importante fijarse en el p-valor en el test de chi cuadrado. El software evalúa todas y cada una de las funciones que han sido implementadas, como por ejemplo la función de distribución uniforme, exponencial, beta, etc. Si este p-valor es mayor que 0,05 no hay evidencias para rechazar la hipótesis, por lo que es posible ajustar mediante la función que se está evaluando.

A continuación se va a exponer el proceso de análisis de datos completo que se ha llevado a cabo, de un ejemplo por cada uno de los tipos de registros de datos. El resto de los análisis pueden verse en los anexos de esta memoria.

5.2.1. LLEGADA DE PIEZAS

Las llegadas de camiones han podido ser conocidas gracias a que la empresa dio su consentimiento para observar el registro de llegadas de material. En ese registro se pudo saber que las llegadas de camiones eran periódicas, siendo siempre lunes y jueves cuando se abastecía de tuercas el almacén de la empresa.

Recordar que cada camión abastece a la fábrica con 7 palés de 16 cajas cada uno y que cada caja contiene 30 tuercas pretratadas, por lo que hace un total de **3.360 tuercas por llegada**.

5.2.2. TIEMPOS DE PROCESO

Los procesos de mecanizado están completamente automatizados, por lo que el tiempo invertido en realizar la operación sobre cada pieza es constante cada vez, y en cada estación tendrá una duración determinada. Con el tratamiento térmico ocurre lo mismo, no deja de ser un proceso que depende del tiempo de exposición de las piezas a altas temperaturas, por lo que para conseguir una homogeneidad en cada una de las tuercas deben de estar expuestas al tratamiento el mismo periodo de tiempo.

A su vez, los tiempos de carga del material de las células de mecanizado se considerarán despreciables, ya que son tiempos muy cortos, que apenas tienen repercusión en el proceso, además, estos tiempos de carga y descarga van a estar considerados en los transportes de las tuercas, de una estación a otra.

Volviendo a los tiempos de procesos y del tratamiento térmico de cementación y revenido, a continuación se va a exponer una tabla mostrando el tiempo que necesita cada máquina para mecanizar una tuerca de bolas.

| TIPO DE OPERACIÓN | TIEMPO DE PROCESO | MAGNITUD DE TIEMPO |
|---------------------------|-------------------|--------------------|
| Fresado pistas interiores | 19 | Segundos |
| Tratamiento térmico | 2 | Horas |
| Rectificado exterior | 6 | Segundos |
| Rectificado interior | 16 | Segundos |

Tabla 2 - Tiempos de procesos constantes

Los tiempos se contabilizan de suelo a suelo que se llama, es decir, desde que el robot de carga y descarga, recoge la pieza de la cinta transportadora o punto de carga, hasta que una vez realizada la operación la deposita en el punto de salida de la célula.

El proceso de fabricación continúa con las fases de montaje y de embalaje. En ambas fases, el factor humano es muy importante, pese a que el operario este ayudado en los dos casos por maquinaria específica para realizar correctamente cada operación.

En una de las visitas, se recopiló información sobre el tiempo total invertido de 50 direcciones asistidas montadas y el embalaje de 50 bultos, y con las que se obtienen las siguientes tablas de datos.

| MONTAJE | EMBALAJE | MONTAJE | EMBALAJE |
|------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Tiempo invertido (min) | Tiempo invertido (segundos) | Tiempo invertido (min) | Tiempo invertido (segundos) |
| 3,3 | 85 | 4,98 | 76 |
| 3,32 | 93 | 4,74 | 96 |
| 4,27 | 76 | 3,73 | 115 |
| 3,5 | 94 | 4,57 | 109 |
| 3,71 | 108 | 4,81 | 103 |
| 4,51 | 112 | 3,63 | 118 |
| 3,9 | 96 | 3,98 | 108 |
| 3,3 | 75 | 4,12 | 94 |
| 4,2 | 86 | 4,2 | 114 |
| 4,52 | 78 | 3,5 | 120 |
| 5,16 | 83 | 4,42 | 108 |
| 4,6 | 90 | 3,65 | 93 |
| 4,13 | 107 | 4,4 | 117 |
| 5,03 | 98 | 3,3 | 105 |
| 4,12 | 89 | 3,71 | 114 |
| 4,98 | 76 | 3,9 | 90 |
| 4,74 | 96 | 3,63 | 96 |
| 3,73 | 115 | 3,49 | 88 |
| 4,57 | 109 | 4,42 | 114 |
| 4,81 | 103 | 3,65 | 108 |
| 3,63 | 118 | 3,7 | 107 |
| 3,98 | 108 | 3,84 | 91 |
| 4,12 | 94 | 4,12 | 115 |
| 4,2 | 114 | 3,84 | 112 |
| | | 4,56 | 94 |

Tabla 3 - Tiempos de procesos variables

Con esta tabla, se procede a introducir los datos en el programa para poder estimar la expresión de la función de distribución estadística que permita modelar el tiempo invertido en cada fase de la producción.

Se va a realizar el ajuste del proceso de embalaje y el proceso de montaje se puede consultar en los anexos de la memoria como ya se ha comentado.

Al pedir al programa que realice la evaluación sobre todas las se puede observar que hay dos distribuciones que se ajustan gráficamente y pasan el test de chi cuadrado. Además también hay que tener en cuenta que si ninguna de estas fuese la correcta siempre se puede acudir a la distribución empírica, ya que el horizonte de datos no es muy amplio y para observar mejor la tendencia que tienen los datos habría que tener más información. Otro dato a tener en cuenta es que esta herramienta de ARENA ofrece análisis de datos de manera básica, si de verdad se quisiera realizar un estudio en profundidad, aparte de tener un rango de datos mayor, lo ideal sería utilizar programas específicos los cuales trabajan con otras familias de distribuciones más flexibles y que ajustan mejor los datos de entrada.

A continuación se va a exponer una comparativa de las dos opciones que se tienen para este tiempo de proceso de embalaje.

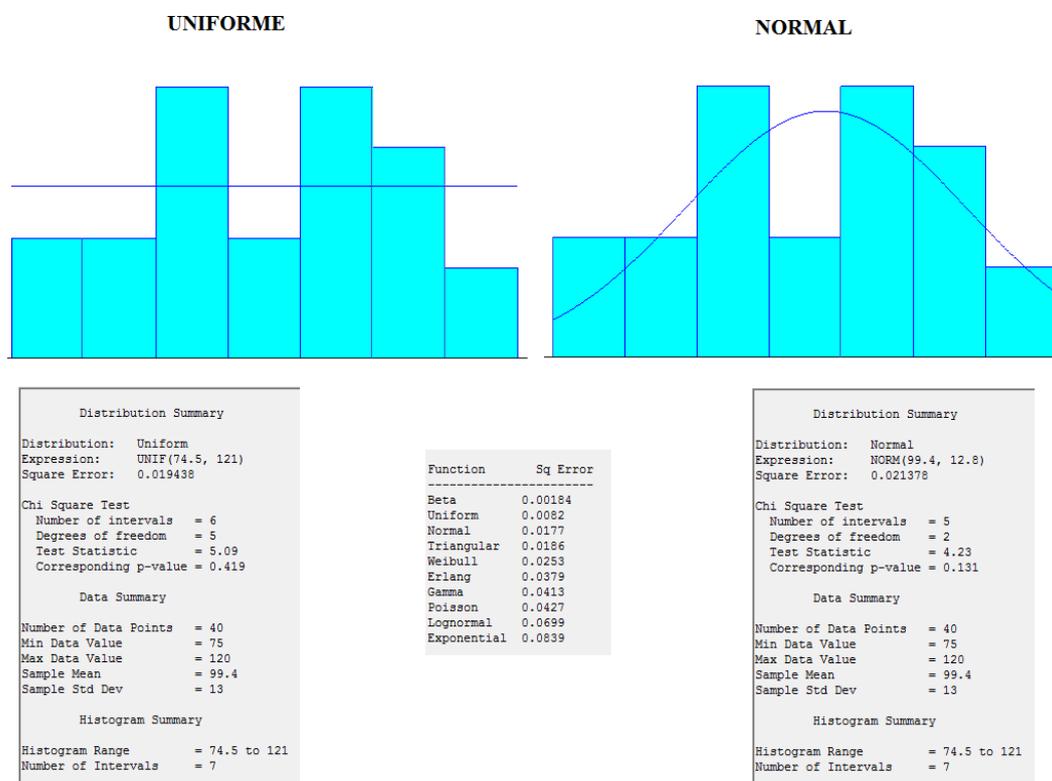


Imagen 40 - Ajuste gráfico y sumario. Tiempo de embalaje

Puede verse en esta imagen que ambas tienen un ajuste gráfico correcto, y las dos tienen un p-valor mayor que 0,05.

En este caso, al tener varias opciones que puedan representar mejor el histórico de datos, se debe proceder a realizar un estudio de sensibilidad, para valorar los parámetros de salida que se obtienen con cada una de las expresiones de cada distribución, y poder decidir mediante la consulta de expertos cual es la que ofrece resultados más parecidos a lo que ocurre en este sistema real.

Ya que no se tiene la posibilidad de consultar a expertos analistas, se decide escoger la función uniforme, ya que ajusta mejor gráficamente, y además tiene un p-valor mayor.

Finalmente, para resumir los tiempos de proceso, se ofrece la siguiente tabla para poder visualizar cada uno de los tiempos de cada fase del proceso.

| TIPO DE OPERACIÓN | TIEMPO DE PROCESO | MAGNITUD DE TIEMPO |
|---------------------------|--|--------------------|
| Fresado pistas interiores | 19 | Segundos |
| Tratamiento térmico | 2 | Horas |
| Rectificado exterior | 6 | Segundos |
| Rectificado interior | 16 | Segundos |
| Montaje | $3.11 + 2.24 * \text{BETA}(1.55, 2.1)$ | Minutos |
| Embalaje | UNIF(74.5, 121) | Segundos |

Tabla 3 - Expresiones de las funciones de distribución. (2)

5.2.3. TIEMPO DE LOS PROCESOS DE CONTROL

En este apartado se distingue dos operaciones, uno es el control de diámetros que se produce en la misma célula de rectificado exterior mediante el operario, y luego las verificaciones que se llevan a cabo en el laboratorio de metrología, en donde hay que distinguir con qué tipo de máquina, se realiza la verificación.

También es imprescindible saber que todos estos tiempos están compuestos por dos términos, uno de ellos constante que corresponde al tiempo que la máquina está en servicio realizando la verificación y otro término que tiene cierta aleatoriedad y que es el objetivo de estudio en este punto. Esta aleatoriedad se debe a que es el tiempo que el operario tarda en colocar la tuerca en la máquina de medición y cargar el programa. Las recogidas de tiempos se realizaron únicamente de este último tiempo, que es el que ofrece variabilidad entre uno y otro.

En las visitas se tomaron los siguientes tiempos.

| TIPO DE VERIFICACIÓN | | | | |
|----------------------|---------------|--------------|------------|-------------------|
| Rug. Exterior | Rug. Interior | Perfilómetro | Zeiss | Control Diámetros |
| tiempo (s) | tiempo (s) | tiempo (s) | tiempo (s) | Tiempo (s) |
| 298 | 215 | 363 | 105 | 157 |
| 273 | 237 | 411 | 143 | 169 |
| 248 | 242 | 434 | 129 | 95 |
| 229 | 225 | 325 | 137 | 138 |
| 250 | 224 | 341 | 130 | 90 |
| 252 | 186 | 402 | 110 | 133 |
| 212 | 199 | 358 | 97 | 139 |
| 274 | 204 | 331 | 146 | 140 |
| 261 | 242 | 445 | 107 | 98 |
| 272 | 247 | 408 | 125 | 157 |
| 247 | 264 | 409 | 147 | 140 |
| 245 | 210 | 439 | 113 | 104 |
| 255 | 188 | 379 | 104 | 112 |
| 228 | 198 | 372 | 101 | 93 |
| 214 | 168 | 391 | 150 | 95 |
| 239 | 225 | 385 | 102 | 138 |
| 273 | 238 | 388 | 116 | 95 |
| 230 | 245 | 368 | 99 | 120 |
| 222 | 204 | 326 | 106 | 174 |
| 227 | 253 | 395 | 126 | 145 |
| 279 | 264 | 358 | 97 | 120 |
| 247 | 225 | 372 | 94 | 98 |
| 214 | 195 | 434 | 102 | 90 |
| 256 | 215 | 445 | 104 | 138 |
| 246 | 225 | 439 | 122 | 158 |
| | | | | 123 |
| | | | | 142 |
| | | | | 178 |
| | | | | 118 |
| | | | | 95 |

Tabla 4 - Tiempos de verificación

Al igual que en el anterior apartado, se va proceder a explicar el procedimiento de uno de los procesos verificación, ya que el resto se realiza de manera completamente análoga y se podrá consultar los resultados de los ajustes en el anexo 2 de este trabajo.

Como ejemplo se detalla el proceso de verificación de la rugosidad exterior.

Primero se cargan los datos en el programa y se le pide que haga los cálculos para ajustar todas las distribuciones y poder comparar. Tras estudiar todos los ajustes se vuelve a tener la duda entre las distribuciones uniforme y triangular. A continuación se muestran los resultados de ambos ajustes.

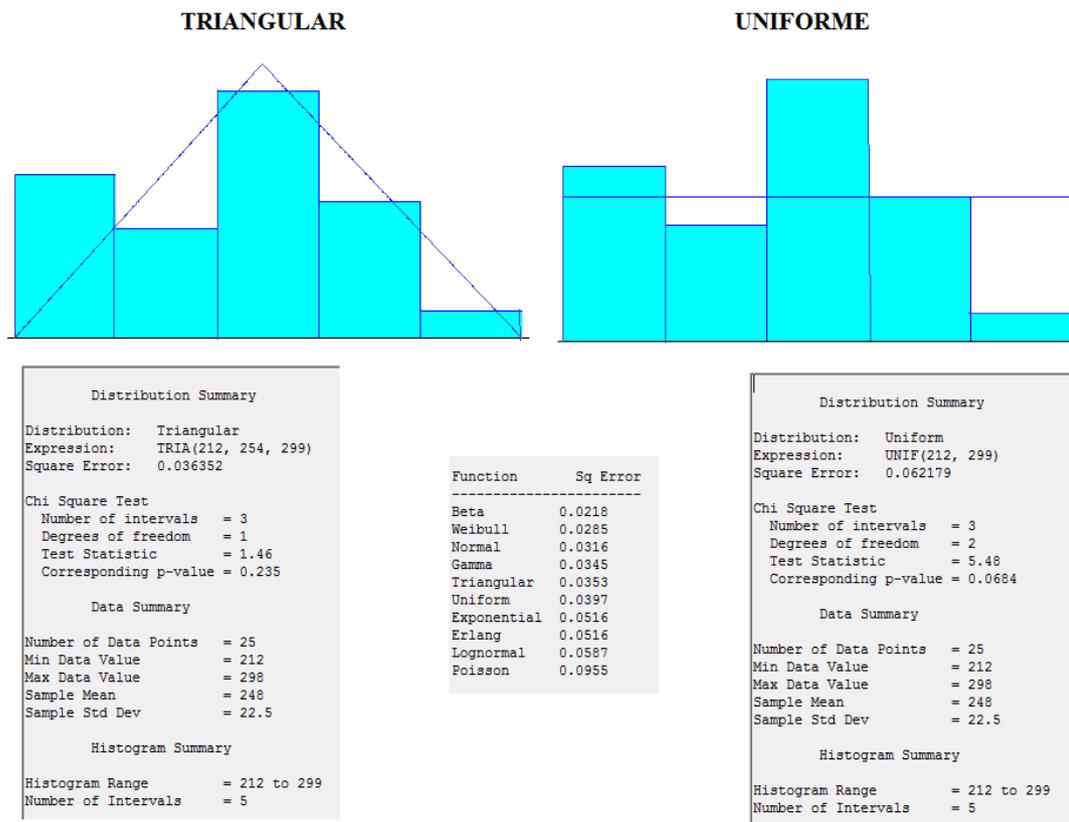


Imagen 41 - Ajuste gráfico y sumario. Rugosidad exterior

En este caso, e igual que pasaba anteriormente en el proceso de embalaje, lo ideal sería hacer un estudio de sensibilidad. Al no tener esa posibilidad, se escoge la función de distribución Triangular, que ofrece un mejor ajuste gráfico y el p-valor es ampliamente mayor.

La siguiente tabla aporta las expresiones que se han escogido en los ajustes de cada uno de los procesos de verificación, los cuales se pueden visualizar en el anexo II.

| TIPO DE VERIFICACIÓN | EXPRESIÓN | MAGNITUD |
|----------------------|-----------------------|----------|
| Control Diámetros | TRIA(89,5,98,5,179) | Segundos |
| Rug. Exterior | 4 + TRIA(212,254,299) | Segundos |
| Rug. Interior | 195 + NORM(222,24,5) | Segundos |
| Perfilómetro | 275 + UNIF(325, 445) | Segundos |
| Zeiss | 1513,5 + EXPO(23) | Segundos |

Tabla 5 - Expresiones de las funciones de distribución.

Recordar que estos tiempos corresponden a la suma del proceso automático que realiza la máquina de verificación, el cual es constante, y el tiempo aleatorio a cargo del procedimiento que realiza el operario para realizar dicha verificación.

5.2.4. TIEMPOS DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento es la conservación de la maquinaria y el equipo con el fin de maximizar su disponibilidad. Es decir, tratar de tener las máquinas operativas el mayor tiempo posible.

En este trabajo, se van a tener en cuenta como tiempos de mantenimiento, los cambios de herramienta que tienen lugar en las dos primeras fases de mecanizado, dentro de toda la línea de producción y los fallos que se puedan producir en la línea de producción..

- **Cambios de herramienta:** Para ello, se ha registrado el tiempo que tarda cada operario, en cambiar la herramienta de cada estación de mecanizado correspondiente, a lo largo de treinta cambios consecutivos. Hay que recordar que en el rectificado interior de las tuercas, el cambio de herramienta se produce de manera automática.

A continuación se expone el histórico de datos recogido, como ya se ha comentado anteriormente, durante treinta cambios de herramienta.

| MANTENIMIENTO | | MANTENIMIENTO | |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| Rect. Exterior | Fresado int. | Rect. Exterior | Fresado int. |
| Tiempo (s) | Tiempo (s) | Tiempo (s) | Tiempo (s) |
| 549 | 103 | 569 | 128 |
| 529 | 122 | 561 | 112 |
| 470 | 140 | 684 | 107 |
| 510 | 110 | 557 | 102 |
| 422 | 129 | 534 | 160 |
| 489 | 147 | 492 | 148 |
| 457 | 117 | 596 | 127 |
| 563 | 149 | 711 | 125 |
| 723 | 114 | 515 | 151 |
| 450 | 105 | 444 | 150 |
| 558 | 123 | 466 | 159 |
| 788 | 157 | 503 | 137 |
| 521 | 104 | 552 | 142 |
| 477 | 100 | 734 | 106 |
| 592 | 118 | 604 | 116 |

Tabla 6 - Tiempos de mantenimiento. Cambios de herramienta

Como en apartados anteriores, se va a exponer el procedimiento del rectificado exterior, que es el que tiene más variables que entran en el proceso y el del desbaste de las pistas interiores se puede consultar en los anexos.

Se trata de la tarea más laboriosa y pesada de todas. Esto es debido a que la herramienta utilizada en las máquinas DANOBAT es una muela de abrasión de gran tamaño. El operario debe ayudarse de una máquina específica para este trabajo, y que le permita manipular la muela, sin que el peso sea un obstáculo. Las pautas que debe seguir el operario son las siguientes:

- Abrir la puerta de la máquina.
- Acercar el soporte de la muela a la máquina de retirada de la muela.
- Soltar la muela y asegurarla en la máquina.
- Retirar la muela
- Colocar la nueva muela (con la misma máquina) y ajustarla en su posición.
- Colocar el soporte de la muela en una posición dentro de la máquina.

Este tiempo es variable, ya que depende claramente del factor humano y de las complicaciones que se puedan llegar a dar. Pero a su vez, hay que sumarle un tiempo fijo, que deriva de las operaciones de diamantado de la muela (definir el perfil) y el periodo de calentamiento de la misma. Este tiempo, constante cada vez que se realiza esta operación es de seis minutos y veinte segundos, o lo que es lo mismo 380 segundos.

Respecto al tiempo que invierte el operario, se introduce la tabla de datos en el programa y se obtiene el siguiente ajuste gráfico.

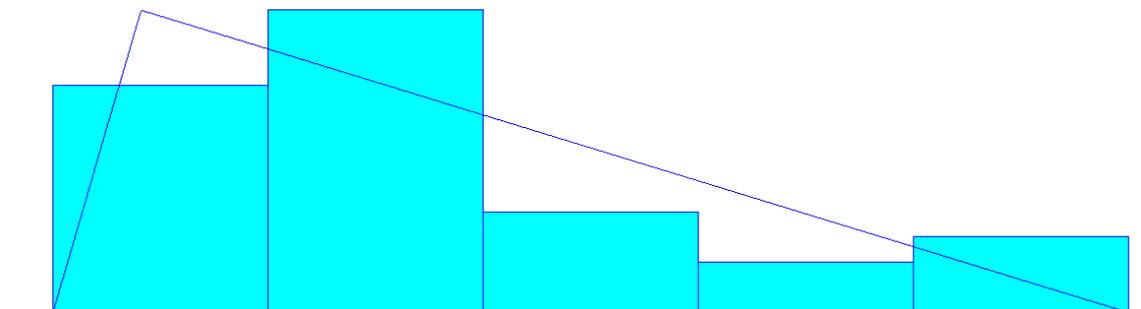


Imagen 42 - Ajuste gráfico. Mantenimiento Rec. Ext.

- Ajuste gráfico: Se puede observar que gráficamente la curva de la expresión ajusta perfectamente.

| Distribution Summary | |
|-----------------------|---------------------|
| Distribution: | Triangular |
| Expression: | TRIA(422, 452, 788) |
| Square Error: | 0.023464 |
| Chi Square Test | |
| Number of intervals | = 4 |
| Degrees of freedom | = 2 |
| Test Statistic | = 1.88 |
| Corresponding p-value | = 0.411 |

Imagen 43 - Sumario. Mantenimiento Rec. Ext.

- Test Chi Cuadrado: Se puede ver que aunque por poco, el p-valor es menor de 0,05 y por tanto es válida la expresión para ajustar estos datos.
- Error cuadrático: El error cuadrático también apoya la teoría sobre esta función de distribución.

De este modo la expresión que se tendría que introducir en el programa de simulación estaría compuesta por los 380 segundos del proceso y **TRIA(422,452,788)**, lo que resultaría como expresión: **380 + TRIA(422,452,788)**,

- Máquina de rectificado interior: Como se ha comentado al empezar este apartado, el cambio de herramienta de estas máquinas DRAKE, se produce de manera automática, estando introducido en su programa de CNC. El tiempo invertido es constante, ya que es completamente automático, y es de 8 segundos. Además, hay que tener en cuenta que esta operación tiene lugar cada vez que una de las máquinas rectifica 50 tuercas de bolas consecutivas.

Como se está haciendo en apartados anteriores al finalizar la exposición de cada punto, se procede a mostrar una tabla explicativa con los tiempos de mantenimiento ofrecidos según un valor constante o expresión y con su periodicidad asociada.

| MANTENIMIENTO | EXPRESIÓN | MAGNITUD | PERIODICIDAD |
|------------------|-----------------------------|----------|--------------|
| Rect. Exterior | 380+TRIA(422,452,788) | Segundos | 1600 tuercas |
| Fresado interior | 99.5 + 61*BETA(0,773,0,891) | Segundos | 400 Tuercas |
| Rect. Interior | 8 | Segundos | 50 Tuercas |

Tabla 7 - Expresiones de las funciones de distribución. (2)

5.2.5. TIEMPOS DE FALLOS

Como en cualquier proceso productivo, existe la posibilidad de que se produzcan errores o problemas desencadenados por diferentes motivos, ya sean errores humanos o fallos de maquinaria. En este trabajo se ha tenido la oportunidad de conseguir el informe de accidentes y fallos de los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre de 2016, en los cuales estaban recogidos de la siguiente manera, los accidentes laborales que puedan venir derivados de un error humano, y las roturas de herramientas. En el informe está

recogida la información del día que se produjo un fallo y el tiempo invertido en solucionar el error

Ambos tipos de fallos se producen de manera muy aleatoria, por lo que son prácticamente imposibles de predecir, ya sea cuándo se van a producir y cuánto tiempo se invertirá para que se subsane dicho problema.

Con los datos recogidos se obtienen, las siguientes tablas de datos.

| ROTURAS DE HERRAMIENTAS | | | | | |
|-------------------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|
| Célula fresado | | Rect. Exterior | | Rect. Interior | |
| Fecha | tiempo (s) | Fecha | tiempo (s) | Fecha | tiempo (s) |
| 11-sep | 187 | 28-sep | 915 | 15-nov | 135 |
| 22-oct | 162 | 21-nov | 644 | 18-nov | 98 |
| 03-nov | 177 | | | | |
| 08-nov | 153 | | | | |

Tabla 8 - Tiempos de fallos. Rotura de herramientas

| ACCIDENTE LABORAL | | | | | |
|-------------------|------------|----------|------------|--------|------------|
| Montaje | | Embalaje | | Hornos | |
| Fecha | tiempo (s) | Fecha | tiempo (s) | Fecha | tiempo (s) |
| 02-sep | 315 | 07-oct | 122 | 03-sep | 244 |
| 05-sep | 205 | 22-oct | 145 | 15-sep | 166 |
| 15-sep | 416 | 19-nov | 158 | 26-oct | 479 |
| 29-sep | 1349 | | | | |
| 11-oct | 903 | | | | |
| 11-oct | 884 | | | | |
| 18-oct | 627 | | | | |
| 26-oct | 144 | | | | |
| 02-nov | 423 | | | | |
| 17-nov | 568 | | | | |
| 19-nov | 719 | | | | |
| 28-nov | 249 | | | | |

Tabla 9 - Tiempos de fallos. Accidentes laborales

En estas tablas, cabe destacar que tanto las roturas de las herramientas, como los accidentes laborales, suceden sin ningún patrón definido y cada caso, es muy diferente del anterior, y por lo tanto el tiempo de reparación no tiene por qué ser siempre el mismo o parecerse en cada caso a otro.

Debido a que las muestras en la mayoría de los casos no son muy grandes, y por lo tanto, no se pueden llegar a considerar significativos, por lo que se va a optar por escoger la función de distribución empírica, ya que poder ajustar a cualquier otra

distribución se necesita, como ya se ha comentado varias veces anteriormente, una ventana de tiempo de recogida de datos más grande.

Debido a la cantidad de fallos que se pueden producir y para aligerar el contenido de la memoria, se van a exponer los datos de análisis de un ajuste mediante función de distribución empírica y el resto se puede observar en el anexo, y a parte, al final de este punto se mostrará directamente unas tablas, en las que se representan directamente las funciones.

A continuación se va a exponer el tiempo que se tarda en recuperar el funcionamiento, una vez que ocurre una rotura en la célula de fresado.

Lo primero es ver que solo se dispone de 4 datos registrados en los tres meses, por lo que se hace casi imposible mediante INPUT ANALYZER aproximar una función de distribución. Por ese motivo se decide escoger la función de distribución empírica que daría la siguiente gráfica y su correspondiente sumario de resultados en el cual se encuentra la expresión.

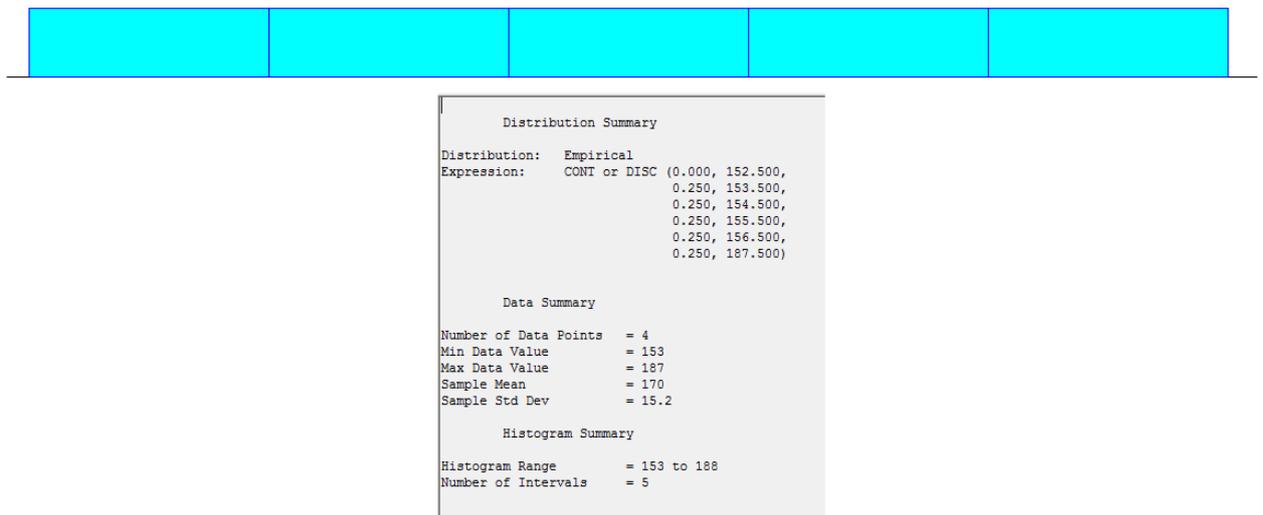


Imagen 44 - Ajuste gráfico y sumario. Rotura célula fresado

La expresión al tratarse de una función de tiempo se escoge la opción CONT que representa una función continua, como es el tiempo. Hay que decir, que esta expresión hay que hacerle dos correcciones. La primera es que el primero de los datos de probabilidad acumulada en ARENA nunca puede ser cero, por lo que se debe sustituir ese 0 por una probabilidad muy muy pequeña como por ejemplo 0,001. Y la segunda es similar, ya que la última probabilidad acumulada, al ser como bien dice su nombre acumulada debe ser 1.

De esta manera la expresión quedaría **CONT (0.001, 152.500, 0.250, 153.500, 0.250, 154.500, 0.250, 155.500, 0.250, 156.500, 1, 187.500)**

- Rotura de herramienta: En la línea de producción hay tres estaciones de mecanizado, en las cuales se utilizan herramientas de corte. Como se puede ver en la tabla, las roturas de las herramientas no son muy

habituales, ya que los mecanizados no son muy agresivos, pero sí que se puede ver una ligera tendencia a que se producen más roturas en la primera fase, que esta si es algo más intensa que las dos fases de rectificado.

CELULA DE FRESADO

- Tiempo entre roturas: CONT(0.001, 4.500, 0.500, 11.500, 0.750, 18.500, 0.750, 25.500, 0.750, 32.500, 1, 41.500)
- Tiempo reparación: CONT (0.001, 152.500, 0.250, 153.500, 0.250, 154.500, 0.250, 155.500, 0.250, 156.500, 1, 187.500)

CELULA DE RECTIFICADO EXTERIOR

- Tiempo entre roturas: CONT (0.001, 27.500, 0.500, 32.500, 0.500, 37.500, 0.500, 42.500, 0.500, 47.500, 1, 54.500)
- Tiempo entre roturas: CONT(0.001, 643.999, 0.500, 698.199, 0.500, 752.400, 0.500, 806.600, 0.500, 860.801, 1, 915.001)

CELULA DE RECTIFICADO INTERIOR

- Tiempo entre roturas: CONT(0.001, 2.500, 0.500, 17.500, 0.500, 32.500, 0.500, 47.500, 0.500, 62.500, 1, 76.500)
- Tiempo entre roturas: CONT(0.001, 97.500, 0.500, 105.500, 0.500, 113.500, 0.500, 121.500, 0.500, 129.500, 1, 135.500)
 - Accidentes laborales: Al igual que las roturas de herramientas, estos accidentes también son muy poco habituales, y la frecuencia con la que se producen depende de en qué fase de la producción suceda. Por ese motivo a continuación se muestran las expresiones de las distribuciones empíricas que se van a programar en el modelo de simulación de este trabajo.

HORNOS DE T.T.

- Tiempo entre accidentes: CONT(0.001, 2.500, 0.333, 3.500, 0.333, 4.500, 0.333, 5.500, 1, 46.500)
- Tiempo de recuperación: CONT(0.001, 165.999, 0.333, 228.599, 0.667, 291.200, 0.667, 353.800, 0.667, 416.401, 1, 479.001)

FASE DE MONTAJE

- Tiempo entre accidentes: CONT(0.001, 0.500, 0.273, 3.500, 0.273, 6.500, 0.636, 9.500, 0.818, 12.500, 1, 15.500)
- Tiempo de recuperación: CONT(0.001, 143.999, 0.333, 384.999, 0.583, 626.000, 0.750, 867.000, 0.917, 1108.001, 1, 1349.001)

FASE DE EMBALAJE

- Tiempo entre accidentes: CONT (0.001, 14.500, 0.333, 15.500, 0.333, 16.500, 1, 37.500)
- Tiempo de recuperación: CONT(0.001, 121.500, 0.333, 122.500, 0.333, 123.500, 1, 158.500)

5.2.6. TRANSPORTES

Para la modelización del transporte en el programa de simulación que se va a emplear en este trabajo (ARENA), no influye en tanto el tiempo, si no la distancia que separa ambos puntos y la velocidad a la que va a ser transportado el bulto.

En cuanto a la velocidad, se van a distinguir tres tipos de transportes:

- Carretilla manual: Este transporte consta de una carretilla especial para el transporte de este tipo de piezas, la cual es empujada por un operario de la fábrica. Por ese razonamiento, la velocidad de transporte es la que puede tener un humano cuando camina, por lo que la velocidad de la carretilla manual, se considerará que tiene una velocidad de **5 km/h**.
- Carretilla motorizada: A este transporte también se le denomina carretilla elevadora, o coloquialmente *toro*. Es un vehículo pesado de acero con una plataforma en la parte delantera que se desliza por dos guías verticales y paralelas. Este transporte está destinado en la empresa para el transporte de los bultos que llegan a la fábrica, es decir, para llevar los elementos descargados en el muelle de entrada de camiones al almacén y también para transportar las direcciones asistidas embaladas al muelle de carga de camiones que salen de la fábrica. En resumen, este transporte se emplea para la carga y descarga de los camiones que llegan y salen de la planta de fabricación. La velocidad máxima que puede alcanzar está limitada por ciertas normas de seguridad, y en esta fábrica está limitada a **10 km/h**, que a su vez, como se ha comentado, es el máximo permitido por la ley para espacios de actuación en interiores.
- Cinta transportadora: Este transporte es utilizado en una zona concreta de la producción, con el fin de conectar ciertas operaciones que tienen lugar de manera consecutiva y sin necesidad de que intervenga algún operario. La velocidad es más baja que si fuera transportado por un operario, pero al ser las distancias muy cortas, permite la implantación de cintas transportadoras y se evita la necesidad de tener un operario pendiente de una tarea tan repetitiva y monótona, como es el transporte de tuercas una a una, de un punto a otro. Dicha velocidad es de **3 km/h**.

Una vez que se conocen los tres medios de transporte empleados en esta línea de fabricación, se va a proceder a definir cada uno de los transportes que tienen lugar en la fábrica para la producción de tuercas de bolas.

Para mayor sencillez, se ha elaborado una tabla en la cual se expone en cada transporte, cuál es el punto de origen y el punto de destino, qué distancia separa estos dos puntos y qué tipo de transporte de los anteriores descritos se emplea.

| Punto Origen | Punto Destino | Distancia (m) | Tipo de Transporte | Velocidad (m/s) |
|--------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| Muelle de entrada | Almacén | 23 | Carretilla motorizada | 2,7778 |
| Almacén | Célula de Fresado | 20,5 | Carretilla manual | 1,3889 |
| Célula de Fresado | Hornos de T.T. | 30 | Carretilla manual | 1,3889 |
| Hornos de T.T. | Célula de Rec. Ext. | 53 | Carretilla manual | 1,3889 |
| Punto inicial de Cél. Rec.Ext. | Impresora Láser | 2 | Cinta Transportadora | 0,8333 |
| Impresora Láser | Rectificadora Danobat | 4 | Cinta Transportadora | 0,8333 |
| Rectificadora Danobat | Célula de Rec. Int. | 7,5 | Cinta Transportadora | 0,8333 |
| Célula de Rec. Int. | Montaje | 23 | Carretilla manual | 1,3889 |
| Montaje | Embalaje | 8,5 | Carretilla manual | 1,3889 |
| Embalaje | Muelle de salida | 7,2 | Carretilla motorizada | 2,7778 |
| Célula de Fresado | Metrología | 36,5 | Carretilla manual | 1,3889 |
| Célula de Rec. Ext. | Metrología | 32 | Carretilla manual | 1,3889 |
| Célula de Rec. Int. | Metrología | 56,5 | Carretilla manual | 1,3889 |

Tabla 10 - Transportes

5.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Como se ha mencionado al inicio de este trabajo, el objetivo es recrear en un modelo de simulación una cadena de producción real en su totalidad, más concretamente la producción de una tuerca de bolas y el montaje dentro del conjunto de la dirección asistida eléctrica de un vehículo. Esta simulación permitirá observar y analizar el comportamiento del sistema, en función de los resultados de la simulación, que permitirán valorar si la fábrica tiene viabilidad funcionando de esta manera, y además, ver si existe la posibilidad de realizar una mejora que contribuya a tener un mayor flujo de piezas acabadas y montadas.

Debido a la complejidad del modelo y a la gran extensión que ocupa, se ha dividido el modelo en varias partes.

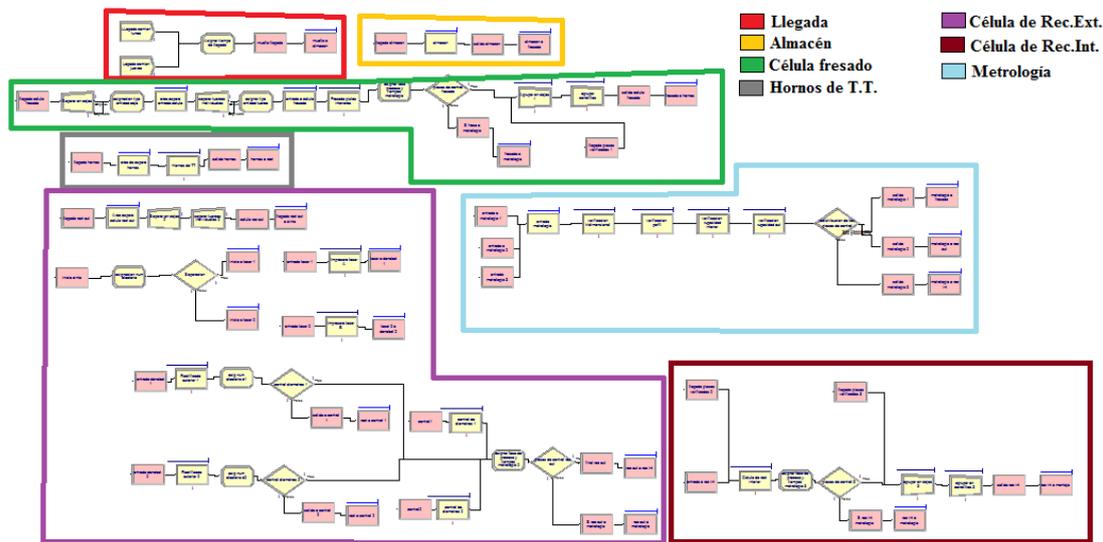


Imagen 45 - Modelo mecanizado tuerca (Arena)

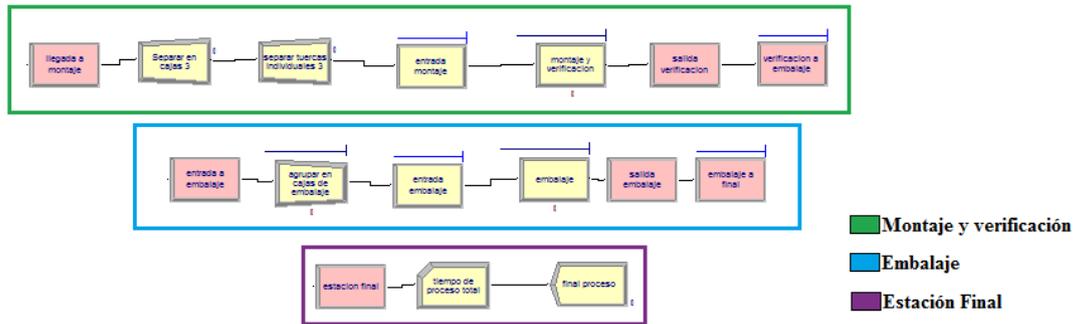


Imagen 46 - Modelo montaje, embalaje y final (Arena)

Después de tener una visión global, es el momento de analizar parte por parte, y detallar los aspectos que caracterizan las estaciones que forman este modelo de simulación.

5.3.1. LLEGADA DE PIEZAS

Esta primera zona del modelo pretende simular la llegada de piezas a la fábrica mediante la creación de las entidades.

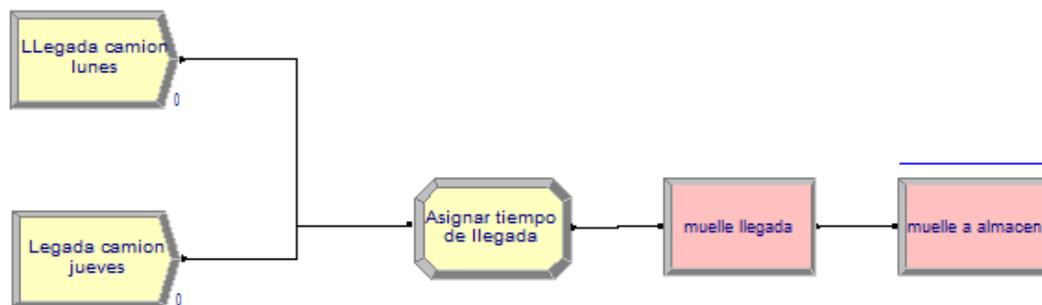


Imagen 47 - Llegada de piezas (Arena)

- **Creación de entidades:** Como en todos los modelos de simulación, empieza con un módulo *Create*. En este caso se ha procedido a crear dos módulos, uno que represente las llegadas de los lunes y otro que represente las llegadas de los jueves. Para programar estos módulos de llegadas, se especifica que el tiempo entre llegadas es de **constante de 7 días**, para asegurar la periodicidad semanal, y que en cada llegada descargue **7 entidades** del tipo “**Pales Tuercas**”.

La diferencia entre los dos módulos se basa en la creación de la primera entidad, en el módulo que representa la llegada de los lunes la primera creación se producirá en el instante 0 de la simulación. En cambio, en el módulo de llegadas de los jueves, la primera creación se produce al cuarto día, correspondiente al jueves.

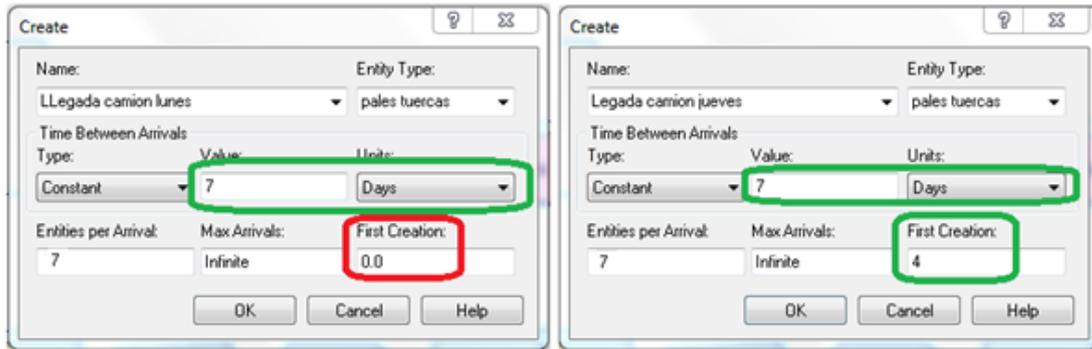


Imagen 48 - Módulo Create (Arena)

- Asignación de atributos: El primer módulo que se encuentran las entidades, una vez que son creadas, se trata de un módulo *Assign*, nombrado como “Asignar tiempo de llegada”. En este módulo se va a crear un Atributo, denominado “tiempo llegada” y que va a estar asociado a cada entidad que pase por el módulo. Con este atributo se quiere asignar el valor del tiempo, en el instante en el que fue creada la entidad, y con el que más adelante se pueda conocer el tiempo total, en forma de media, que las entidades permanecen en el sistema. Para conseguir asignar el valor del tiempo de la simulación a cada entidad, teniendo en cuenta que no es un valor fijo, hay que introducir en el valor del atributo el parámetro *TNOW*. Es una abreviación de *Time Now*, que traducido del inglés significa *tiempo ahora*, con lo que se consigue asignar el valor del tiempo en el momento exacto que se encuentre la simulación.

La creación de este atributo y el correspondiente valor adjudicado, se ven representados en las ventanas que se abren en el programa al hacer doble click en el módulo.

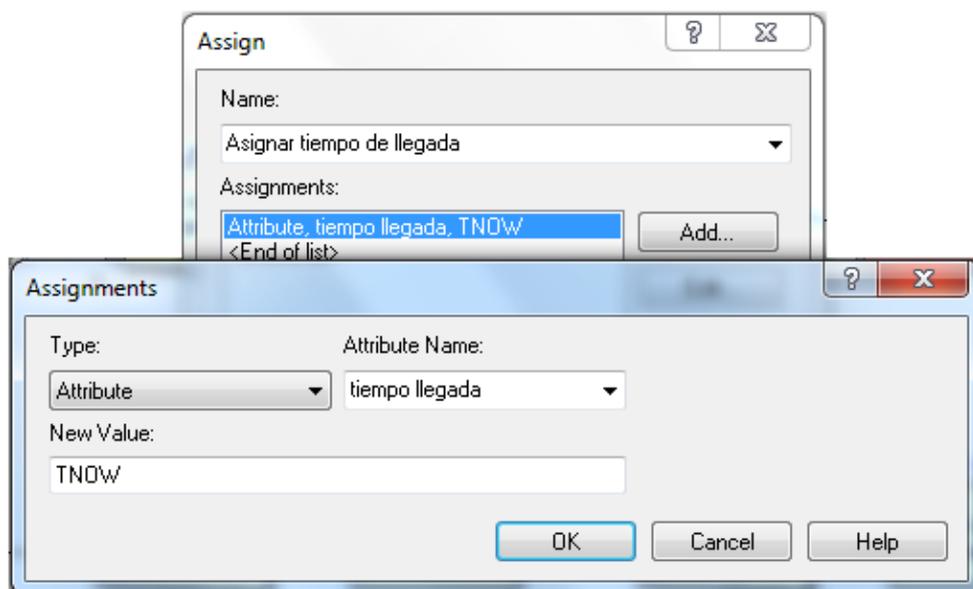


Imagen 49 - Módulo Assign. Tiempo llegada (Arena)

El siguiente paso sería definir el transporte que llevaría los palés desde el muelle de recepción de material, hasta el almacén, pero para una mejor comprensión del modelo, en cuanto a los transportes se prefiere, una vez terminado con la exposición de todas las áreas del modelo de simulación de la fábrica, detallar todos los transportes que intervienen en el modelo.

5.3.2. ALMACÉN

Para simular el área donde llegan las piezas directas del muelle de descarga, hasta que son requeridas en la primera estación de mecanizado, basta con un módulo *Hold* y los correspondientes a los transportes.

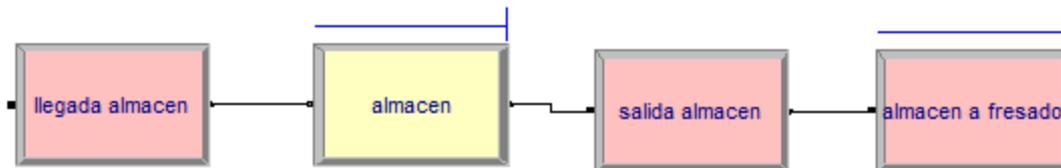


Imagen 50 - Almacén (Arena)

- Módulo Hold: Con este módulo, lo que se pretende recrear es una especie de cola, donde los palés esperan hasta que son necesitados en la célula de fresado. En la siguiente imagen se va a mostrar cómo se ha completado la ventana que aparece asociada a este módulo, y después se explicará con detalle.

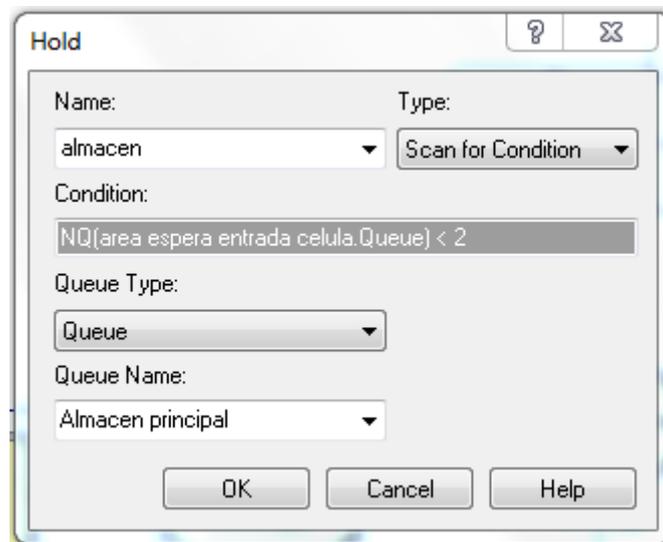


Imagen 51 - Módulo Hold. Almacén (Arena)

Se ha nombrado, como resulta evidente, con el nombre “almacén”, teniendo en cuenta de ponerle el acento, ya que Arena no reconoce estos caracteres. Posteriormente hay que decidir con que debe responder este módulo, si a una señal o a una condición. Para ello en *Type* se escoge “Scan for Condition”, porque lo que se pretende es formular una condición, para que cuando se cumpla se libere una entidad de la cola. Esta condición se define de la siguiente manera:

Cuando el número de entidades de la cola nombrada como “area espera entrada celula” sea menor a 2, el módulo debe liberar una entidad de “pales tuercas” de la cola del *Hold*. En la foto se puede ver como se cifra esa condición en Arena, $NQ(\text{area espera entrada celula.Queue}) < 2$. También es necesario nombrar la cola de este módulo, en este caso “Almacen principal”. Esto es importante porque por defecto, todas las colas vienen definidas con el orden de prioridad *FIFO*, pero en este caso el orden de que sigue la cola de este almacén es *LIFO*. Para llevar a cabo este cambio de prioridad en la cola, hay que ir al panel de *Basic Process* y acceder al módulo de datos *Queue*. Aquí aparecen todas las colas, y definidas como tipo “First In First Out”. Primero se debe localizar la cola que se acaba de definir como “Almacen principal” y pinchar en la columna correspondiente de *Type* y seleccionar la correcta para este caso, “Last In First Out”. En la imagen siguiente se muestra este proceso.

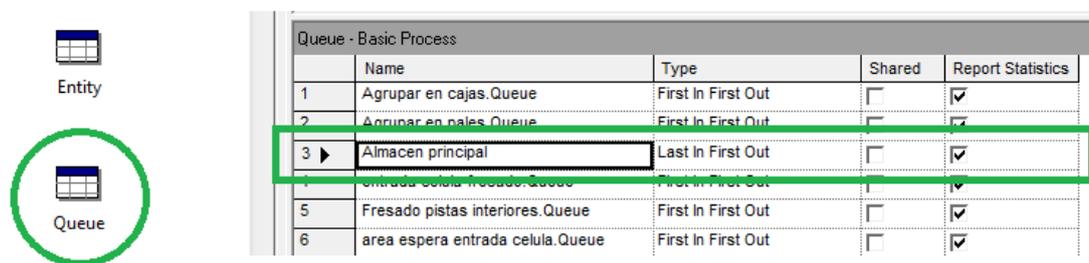


Imagen 52 - Módulo Queue. Almacén (Arena)

5.3.3. CÉLULA DE FRESADO

En este punto de la simulación, se puede decir que empieza propiamente la cadena de producción. Con la simulación de la primera estación o célula de mecanizado. Se va describir en dos fases, la primera tiene que ver con la llegada de las piezas a la célula y el mecanizado, y la segunda con los procedimientos que se realizan una vez mecanizadas las tuercas.

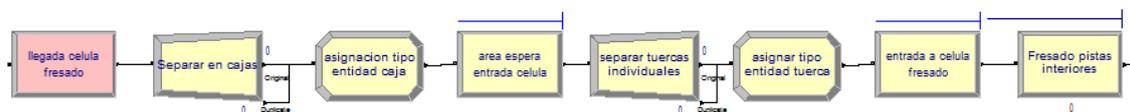


Imagen 53 - Célula fresado 1 (Arena)

En esta primera fase, se pretende simular el área de espera antes de entrar a la célula, como se simula la desmembración de los palés, primero en cajas de 30 tuercas y luego en tuercas individuales y el proceso de desgaste de las pistas interiores de los tres centros de mecanizado.

- Transformación de palés en cajas: Cada palé consta de 16 cajas, por lo que es necesario separar dichas cajas antes de que se depositen en el área de espera de la célula. Para ello se crea un módulo *Separate*, y se escoge la opción “*Duplicate Original*” por el cual el programa genera réplicas de la entidad. Como cada palé consta de 16 cajas, se programa que el programa cree 15 réplicas del original,

que sumado a la entidad entrante original, hace que sigan en el modelo 16 entidades.

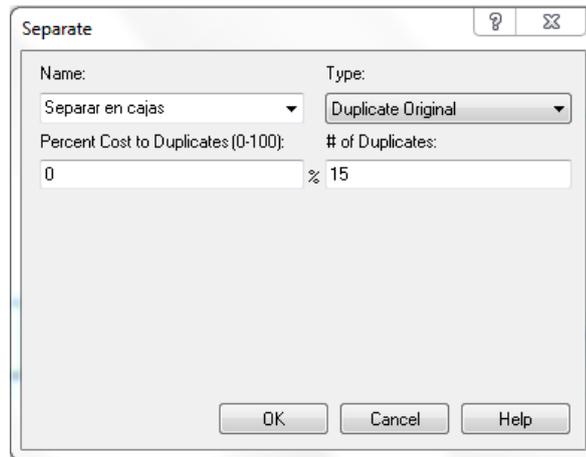


Imagen 54 - Módulo Separate 1. Célula fresado (Arena)

Además, debido a que se están creando réplicas de una entidad del tipo “pales tuercas”, se necesita crear un módulo Assign que asocie a estas nuevas entidades su nombre de referencia como entidad que representa una caja de tuercas (“Caja tuercas”).

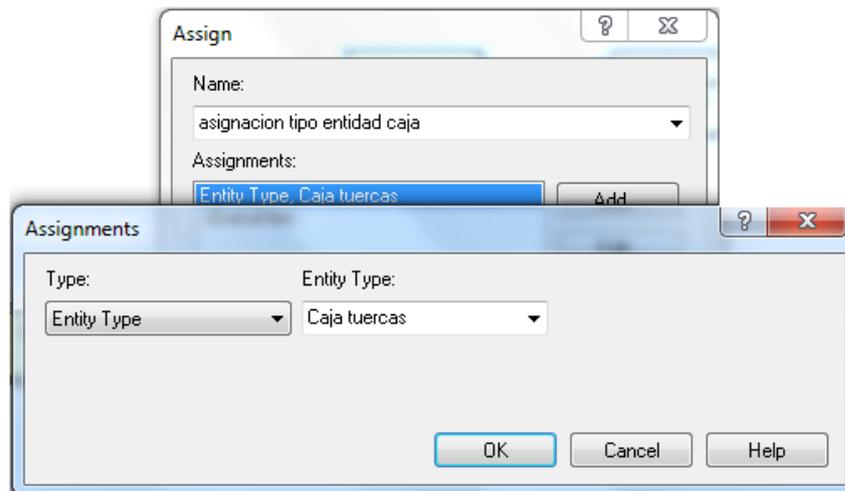


Imagen 55 - Asignación Caja Tuercas (Arena)

- Área de espera: Al igual que en el almacén se implantan dos módulos *Hold*, el primero sirve de señal, para liberar entidades en el almacén y el segundo es propiamente la cola que se forma de tuercas individuales en la entrada de la célula. Estos módulos se han completado de igual manera que el módulo “Almacén”, se define una condición, se nombra la cola y se mantiene el orden de prioridad de la cola que viene por defecto *FIFO*. En la imagen siguiente se puede ver las ventanas de estos módulos.

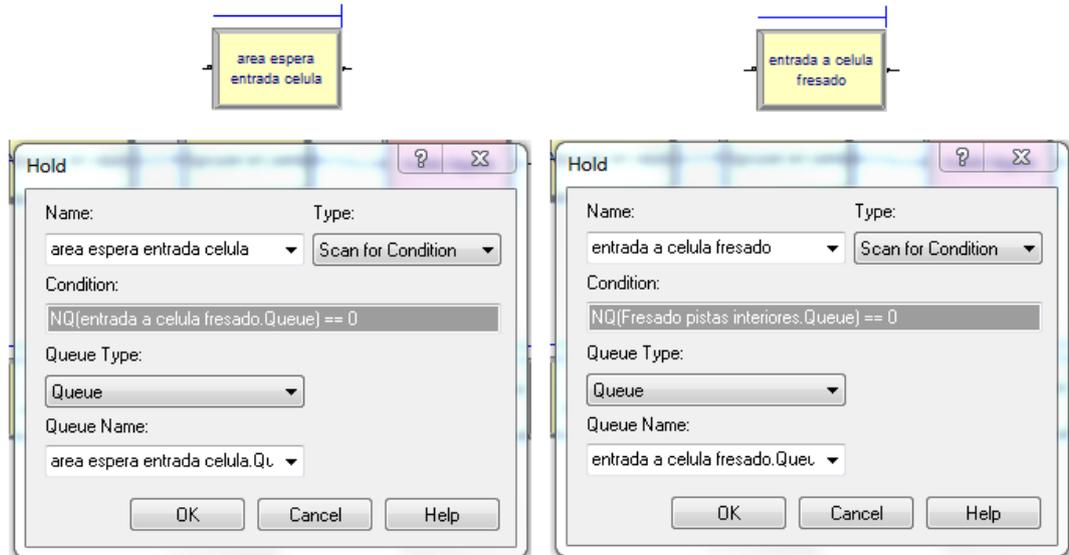


Imagen 56 - Módulos Hold. Célula fresado (Arena)

- Transformación de cajas en tuercas: Al igual que se hizo anteriormente para transformar los palés en cajas, es necesario realizar la misma operación para transformar las cajas en 30 tuercas individuales cada una. Para ello se crea un módulo *Separate* del tipo “*Duplicate Original*”, y en el que se programa para crear 29 réplicas.

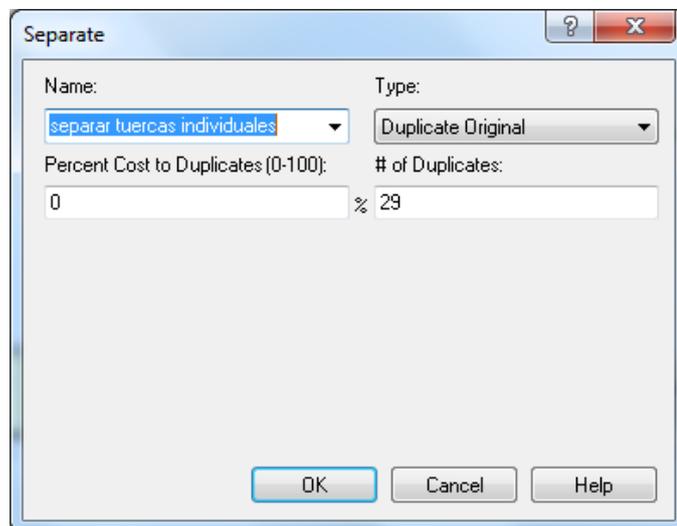


Imagen 57 - Módulos Separate 2. Célula fresado (Arena)

Y al igual que ocurría anteriormente, las entidades creadas son del tipo “caja tuercas” por lo que es necesario crear a continuación un módulo *Assign* con la misma finalidad que el anterior, asociar el nombre “tuercas” a las nuevas entidades.

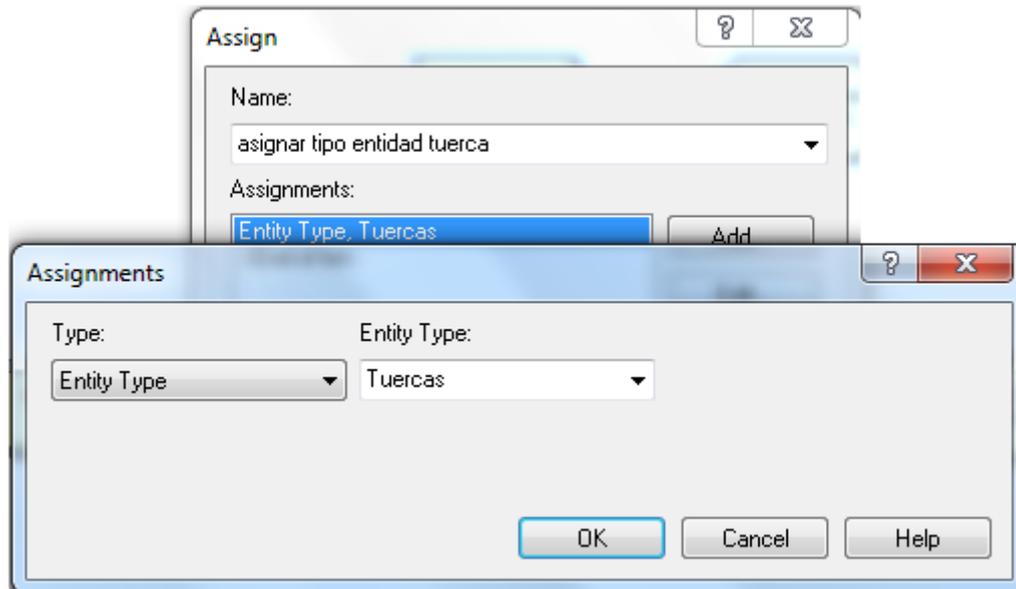


Imagen 58 - Asignación Tuercas (Arena)

- Proceso fresado pistas interiores: Los procesos en Arena se modelan con los módulos *Process*. Estos módulos tienen dos partes, la parte del nombre, que en este caso es “Fresado pistas interiores” y la parte lógica o *Logic*. Se sabe que es un proceso en el que se va a captar un recurso, se va a tener retenido el tiempo que dure el proceso y se va a liberar, por lo tanto se trata de un proceso del tipo ***Seize-Delay-Release***. Al seleccionarlo, aparecen una serie de pestañas en las que hay que destacar dos, una para añadir recursos y otra para definir el tiempo del proceso en el que está ocupado el recurso.

Tras el estudio del sistema real, se sabe que esta célula está formada por Centros de mecanizados de la marca *DRAKE*, y por lo tanto se crea el recurso ***DRAKE fresadora***. Además el tiempo de duración de esta fase es constante, por lo que se puede definir de manera simple y rápida, y como se va a poder ver a continuación en la imagen, se escoge la opción de tiempo “Constant” y expresado en segundos.

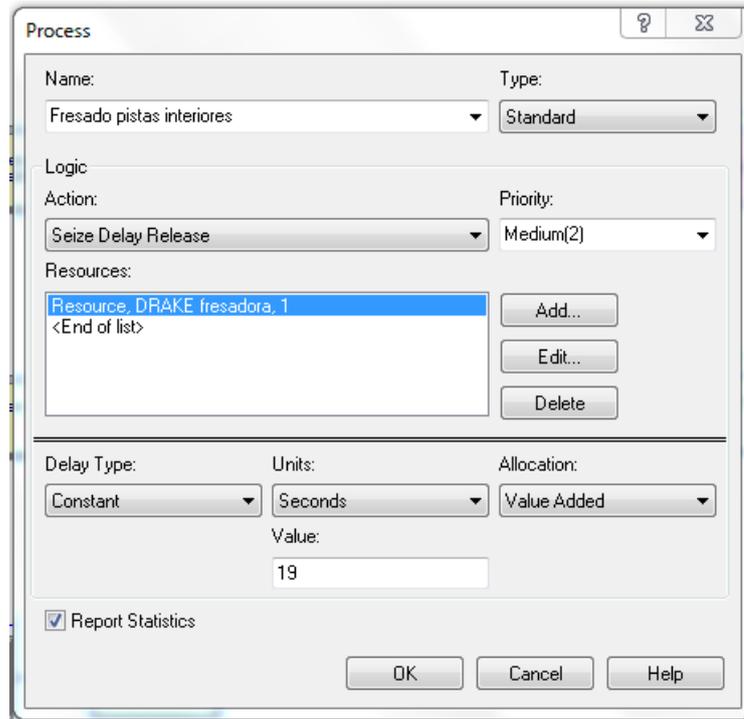


Imagen 59 - Módulo Process. Célula fresado (Arena)

Por otro lado, hay que tener en cuenta que se ha creado el recurso DRAKE fresadora, pero no se ha definido la cantidad de máquinas que hay, ni los fallos asociados a estos centros de mecanizado.

En primer lugar, hay que dirigirse al panel *Basic Process* y seleccionar el módulo de datos *Resource*, donde están recogidos todos los recursos que se crean en el modelo. Para definir el número de máquinas, en la columna *Type*, se selecciona la opción “Fixed Capacity”, ya que siempre van a estar el mismo número de máquinas trabajando al mismo tiempo. A continuación se habilitará otra columna llamada *Capacity* y donde se introduce el número de máquinas, en este caso 3. La próxima ilustración muestra este proceso.

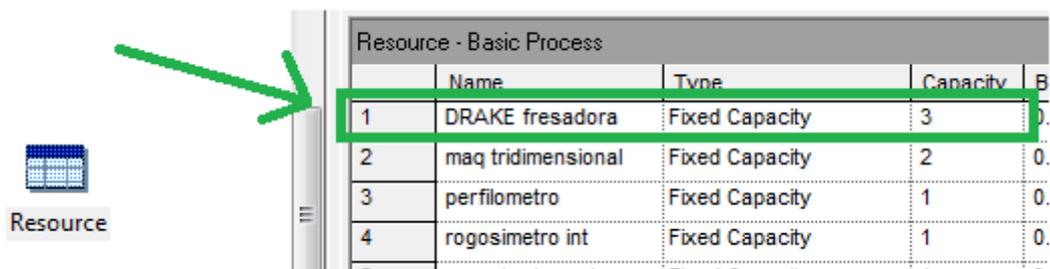


Imagen 60 - Módulo Resource. Célula fresado (Arena)

En este mismo módulo de datos habría que asociar los fallos y paradas para cambio de herramientas que se hayan creado para esta célula de fresado, pero al igual que los transportes, se ha creído oportuno, desglosar esta parte de fallos y mantenimiento en otro punto más adelante en el proyecto.

Por último, el final pretende asociar a las entidades la fase en la que se encuentran las tuercas y los tiempos de los procesos de verificación que le corresponden, la diferenciación de las piezas de control y la agrupación en cajas y carretillas para su posterior transporte a la siguiente fase. En la imagen siguiente se puede ver los módulos que forman lo anteriormente citado.

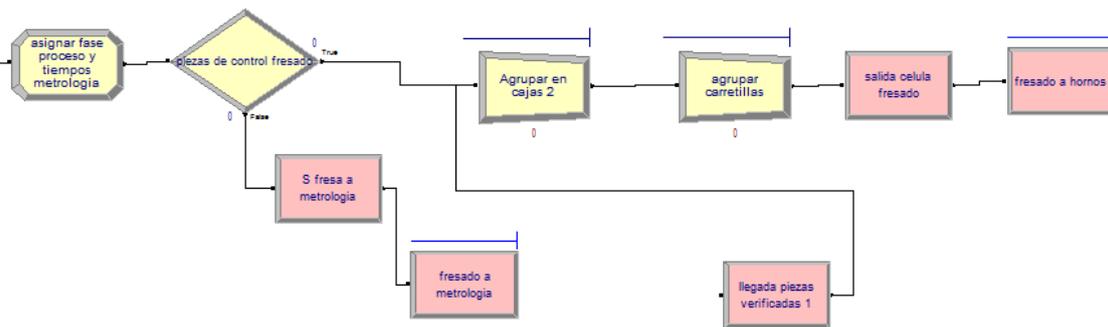


Imagen 61 - Célula fresado 2 (Arena)

- Asignación fase y tiempos de verificación: Como ya se ha visto en otra ocasión, para poder asociar un atributo de cualquier tipo, se necesita un módulo *Assign*. En este módulo denominado “asignar fase proceso y tiempos metrología” se van a asociar tres tipos de atributos, aunque uno de ellos tiene que ver con una parte de la simulación denominada Técnicas de Reducción de Varianza y se explicará más avanzado el trabajo. Los otros dos son las siguientes:
 - Atributo “fase proceso”: Con este atributo se pretende codificar la fase en la que se encuentra la tuerca, de cara a que pasados los controles de verificación en el laboratorio de metrología, y mediante un módulo *Decide*, estas entidades puedan ser devueltas al punto de producción del que provienen y sigan así el curso de la cadena de fabricación.

Para ello, en esta primera fase de desbaste interior, se va a asignar al atributo el valor **1**. Más adelante veremos como para el rectificado exterior será el 2 y el rectificado interior el 3.

En la imagen se ofrece como se ha llevado a cabo la asignación de este valor en el programa Arena.

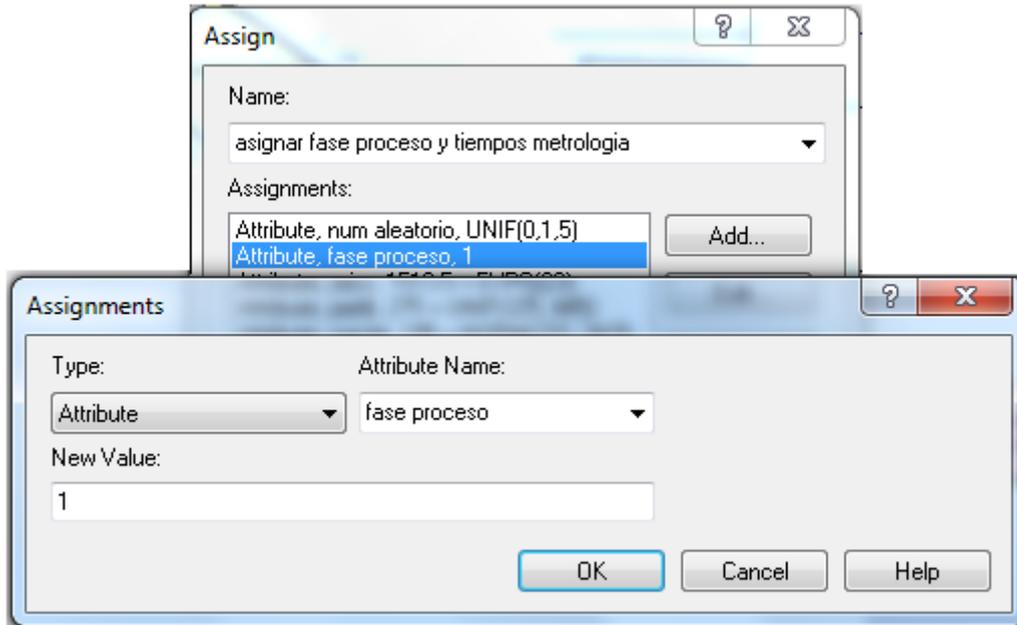


Imagen 62 - Atributo "fase proceso". Célula fresado (Arena)

- Atributos de tiempo de verificación: En el punto de descripción del sistema real se pudo saber que la verificación de las piezas se lleva a cabo mediante cuatro máquinas, dirigidas por un ingeniero encargado de manejar el laboratorio. También se dio a conocer que no todas las tuercas pasan por los mismos procesos de verificación, ni tardan el mismo tiempo, como se expuso a su vez en el apartado de análisis de datos de entrada.

La solución a este caso es muy simple, crear un atributo que controle el tiempo de proceso en cada una de las máquinas de verificación y asignarle un valor en función de la fase en la que se encuentre. Con esto se consigue, y como se verá cuando se detalle el área de metrología, que en los procesos de verificación, no se programe un cierto tiempo de proceso, ni tampoco una función de distribución, si no que se defina por el atributo, y se la entidad que llega la que marque el tiempo que necesita la propia entidad para ser procesada, o dicho de otra manera, el tiempo que está ocupando el recurso.

A continuación se van a exponer los cuatro atributos con sus respectivos valores.

- "zeiss"

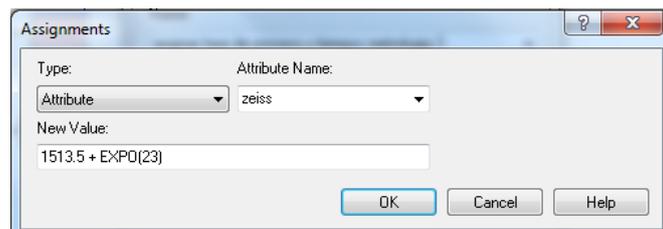


Imagen 63 - Atributo "zeiss". Célula fresado (Arena)

- “perfil”

Imagen 64 - Atributo “perfil”. Célula fresado (Arena)

- “rug int”

Imagen 65 - Atributo “rug int”. Célula fresado (Arena)

- “rug ext”

Imagen 66 - Atributo “rug ext”. Célula fresado (Arena)

- Piezas de control: La verificación que se deben hacer a las tuercas de bolas en esta fase, es de perfil, rugosidad interior y tridimensional. Pero si bien es verdad, no se realiza a todas las tuercas, si no que se realiza sobre una de cada cuatrocientas tuercas, lo que da un porcentaje del 99,75% de tuercas que siguen su camino y tan solo un 0,25% son llevadas al laboratorio de metrología. Para simular este caso en Arena, se coloca un módulo *Decide* nombrado como “piezas de control fresado”.

En este módulo, la lógica mandaría elegir la opción “2-way by chance”, pero como se ha decidido sincronizar los sorteos, mediante una de las Técnicas de Reducción de Varianza basada en números aleatorios comunes, se opta por la opción “2-way by condition”, siendo la condición un atributo creado exclusivamente para aplicar este método, y que dé como resultado de entidades que salen por la salida *True*, valores de este atributo menores que 0,9975 en el rango de 0 a 1. Siendo las restantes las entidades que son llevadas a verificación.

En la imagen se muestra la programación de este módulo *Decide*.



Imagen 67 - Módulo *Decide* piezas control. Célula fresado (Arena)

- Agrupación en cajas y carretillas: Una vez finalizado el proceso y habiendo descargado el robot al exterior de la célula las tuercas fresadas, éstas deben ser agrupadas en cajas, del mismo modo que han sido traídas hasta esta estación (30 unidades por caja), y a su vez para su transporte a la siguiente estación se agrupan en columnas de 6 cajas, que es el máximo de cajas que puede llevar las carretillas transportadoras. Esta última es la novedad, y por lo tanto en el módulo *Batch* encargado de realizar esta agrupación, se debe nombrar a la nueva entidad que se crea, que en este caso recibe el nombre de “carretilla tuercas”. Al igual que en todos los casos, en los que se agrupan las tuercas, con el fin de ser transportadas, la agrupación va a ser del tipo temporal.

La imagen que viene a continuación, expone los dos módulos consecutivos y la programación de datos que lleva cada uno de ellos.

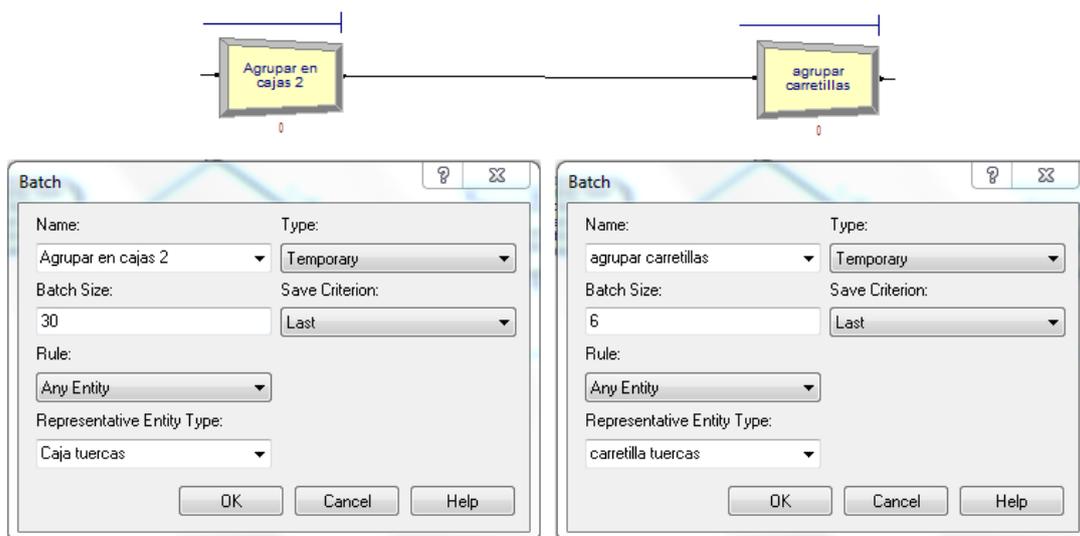


Imagen 68 - Módulos *Batch*. Célula fresado (Arena)

5.3.4. HORNOS DE T.T.

En la llegada a esta fase sorprende quizás que no haya ningún módulo para separar las entidades en cajas y luego en tuercas individuales, pero tiene una razón de ser. Esto se debe a que la capacidad de los hornos es tan grande que las piezas que llegan en las carretillas tienen cabida en cualquiera de los dos hornos de tratamiento térmico, por lo que sería una pérdida de tiempo computacional, el estar separando las entidades para posteriormente, una vez finalizado el proceso de cementación, volver a agruparlas para su posterior transporte. El esquema de esta área sería el siguiente.

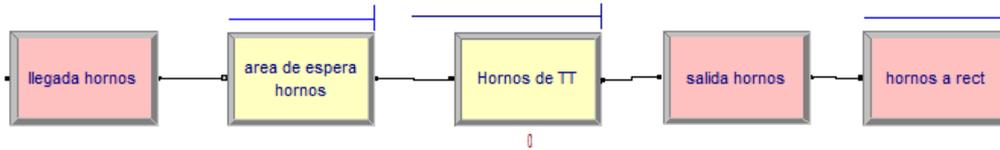


Imagen 69 - Hornos de T.T. (Arena)

Como se ve, esta fase, dejando transportes al margen, se compone de dos módulos, un *Hold* para representar el área de espera cuando llegan y un módulo *Process* para representar los procesos termoquímicos de cementación y revenido.

- “área de espera hornos”: Este módulo representa la cola del proceso, y como son almacenadas las entidades que llegan de manera unificada en 6 cajas de 30 tuercas. Está regido por una condición, la cual es similar a los otros módulos de estas características que se han diseñado con el mismo propósito. En este caso se define de la siguiente manera: $NQ(\text{Hornos de TT.Queue}) == 0$, que quiere decir que el módulo liberará una entidad de su cola, cuando la cola del proceso de Tratamiento térmico sea igual a cero.

La propia cola del *Hold*, se nombrado de la misma manera que el propio módulo, y la secuencia de la cola es del tipo FIFO.

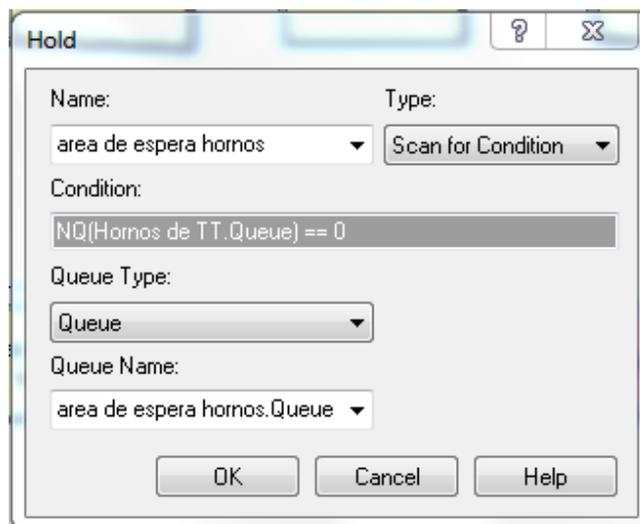


Imagen 70 - Módulo Hold. Hornos de T.T. (Arena)

- Proceso “Hornos de TT”: Como se ha descrito en el anterior proceso, estos módulos poseen dos partes, que es el nombre y el apartado lógico. En este último apartado, se trata de un proceso en el cual también se capta un recurso, que se mantiene ocupado durante el tiempo que dura el proceso, y posteriormente se libera. Esta secuencia en Arena se llama *Seize-Delay-Release*.

Al seleccionar esta opción aparece una ventana donde definir el recurso utilizado, que este caso se va a llamar “**Hornos**”.

Una vez definido el recurso, el siguiente paso es definir el tiempo que se invierte ocupando dicho recurso. En este caso y gracias al apartado de análisis de datos, se sabe que es un tiempo constante de **2 horas**.

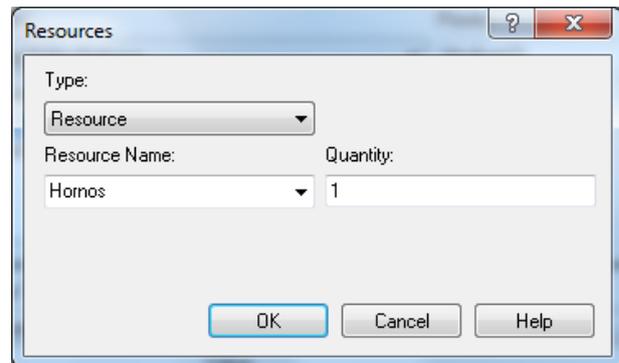


Imagen 71 - Recurso “Hornos” (Arena)

La siguiente imagen va a mostrar esta programación que se ha detallado.

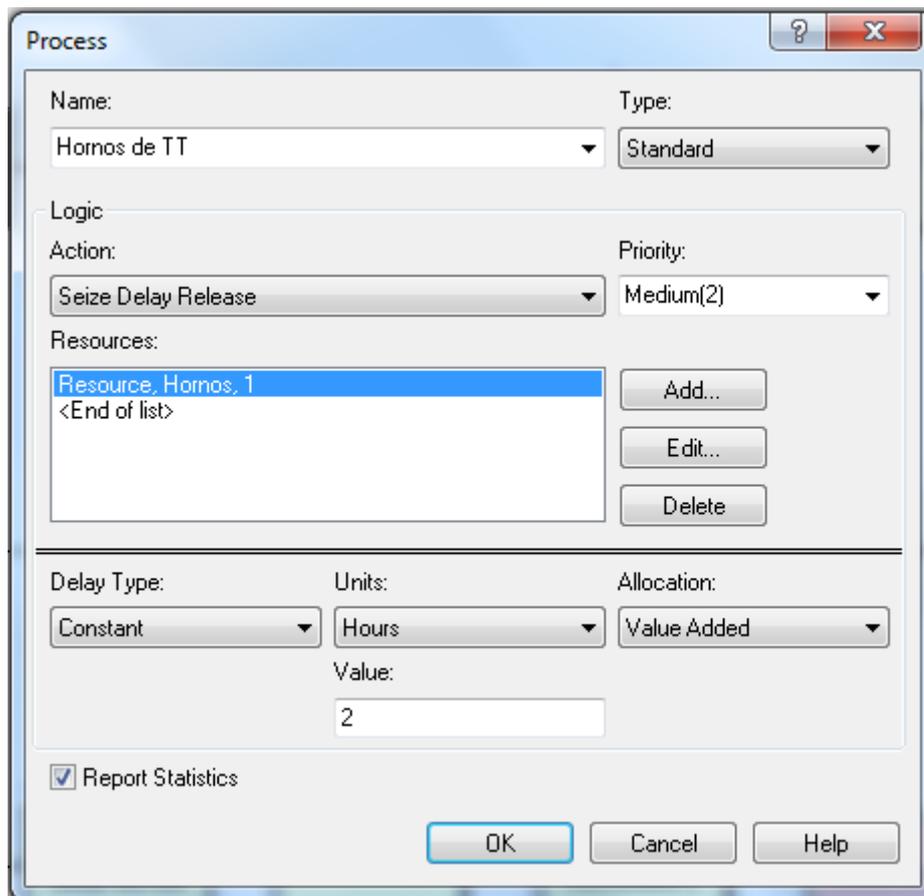


Imagen 72 - Módulo Process. Hornos de T.T. (Arena)

A continuación hay que definir los parámetros de este recurso que se ha creado, ya que esta área de tratamientos térmicos, consta de dos hornos. Al igual que en el apartado anterior, en el panel *Basic Process*, se selecciona el módulo de datos *Resource* y donde aparecen todos los recursos diseñados en el modelo. Una vez en este punto, se busca el recurso en cuestión, “Hornos” y se selecciona la opción “Fixed capacity” y se le otorga el valor de 2. En la siguiente imagen se puede ver este proceso con claridad.

| | | | | |
|---|-----------------|----------------|---|----|
| 4 | rugosimetro int | Fixed Capacity | 1 | 0. |
| 5 | rugosimetro ext | Fixed Capacity | 1 | 0. |
| 6 | Hornos | Fixed Capacity | 2 | 0. |
| 7 | Rect Danobat 1 | Fixed Capacity | 1 | 0. |

Imagen 73 - Capacidad recurso “Hornos”. Hornos de T.T. (Arena)

5.3.5. CÉLULA DE RECTIFICADO EXTERIOR

Después de recibir el tratamiento térmico, como ya se sabe, es necesario ajustar las dimensiones de las piezas a unas tolerancias dimensionales exigidas por los planos. Para ello primero se ajustan los diámetros exteriores.

En una primera fase, las piezas llegan en carretillas de 6 cajas de tuercas, y esperan un área específica, ya que en la célula se introducen de una en una.

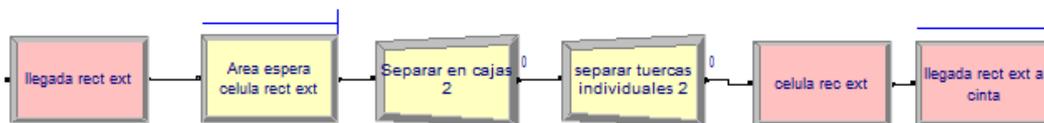


Imagen 74 - Área de espera. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

- Área de espera: Al igual que en anteriores puntos, se trata de un *Hold*, donde las cajas tienen que esperar a que el operario las cargue en la entrada de la célula. Está regida por una condición, la cual es que las colas de las dos impresoras láser, que es el inicio de todo este proceso, sean igual a cero. A continuación puede verse la programación de este módulo.

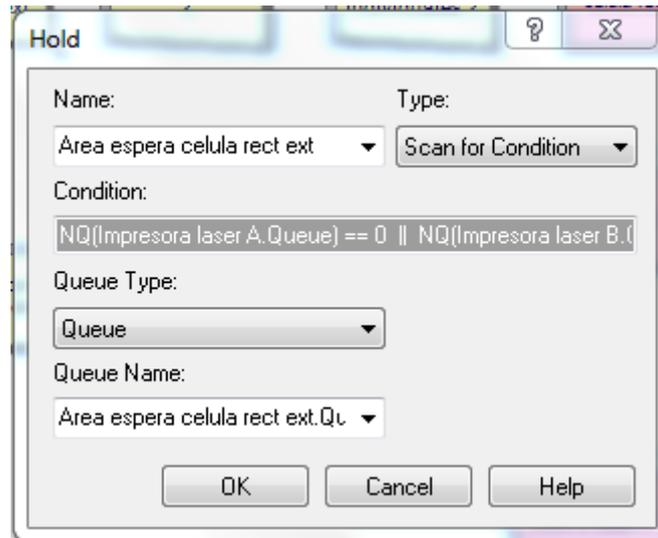


Imagen 75 - Módulo Hold. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

- Separación en tuercas individuales: Las tuercas deben ser cargadas por un operario de una en una en la cinta transportadora que guiará las piezas, desde la entrada de esta estación, hasta la finalización de la siguiente fase (rectificado interior). Para modelar este factor, se realiza de manera análoga a la que se empleó en la fase de desgaste de las pistas interiores, en la célula de fresado, mediante dos módulos *Separate* consecutivos.

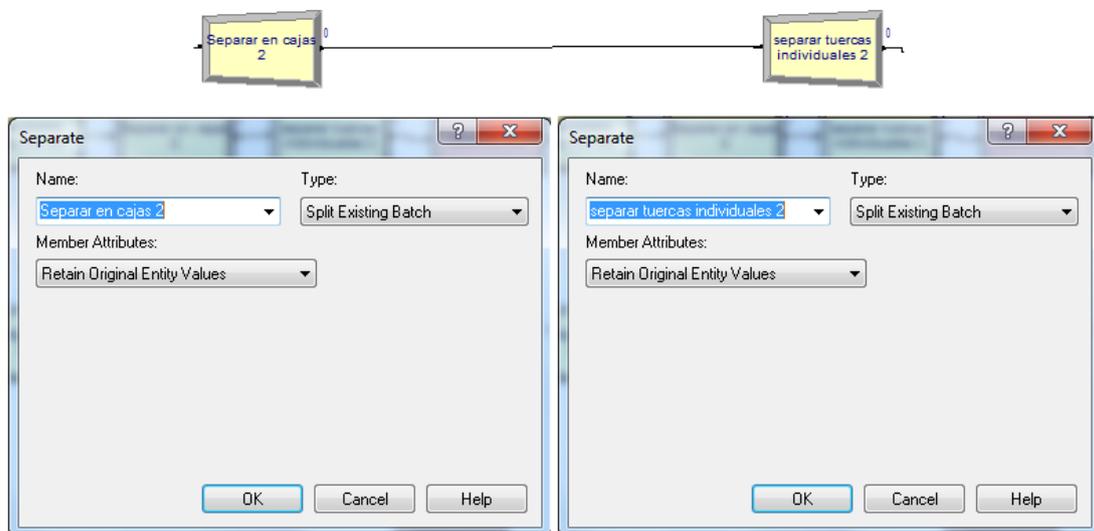


Imagen 76 - Módulos Separate. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

Tras esta fase, las tuercas son cargadas en la cinta transportadora que separa las tuercas en dos cintas transportadoras iguales, con destino a la primera estación, la impresión láser.

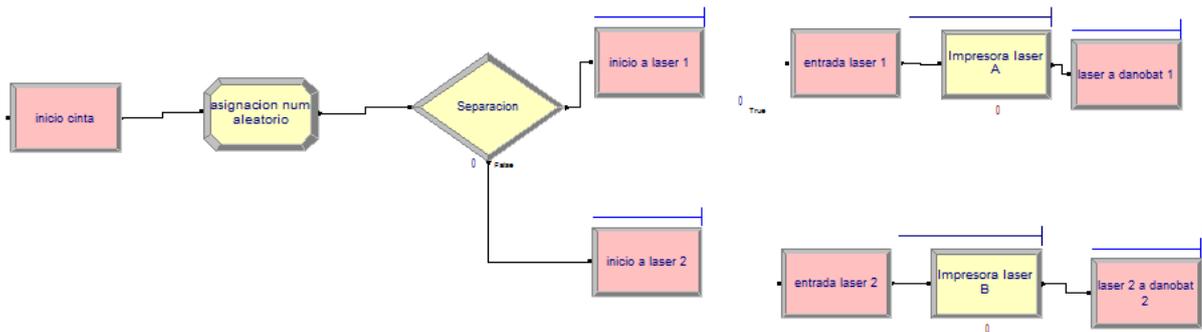


Imagen 77 - Área de Impresión láser. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

- Separación en dos cintas: Esta operación tiene asociada un módulo *Assign* y un módulo creador de sorteos, *Decide*. El módulo *Assign* se emplea para poder introducir la técnica de reducción de variable, que más adelante se detallará. A su vez el módulo *Decide*, tal y como se ha programado debe derivar el mismo número de piezas, a la cinta A y a la cinta B, por ese caso la condición para el sorteo está relacionada con el 50% de las piezas que pasan por el módulo.

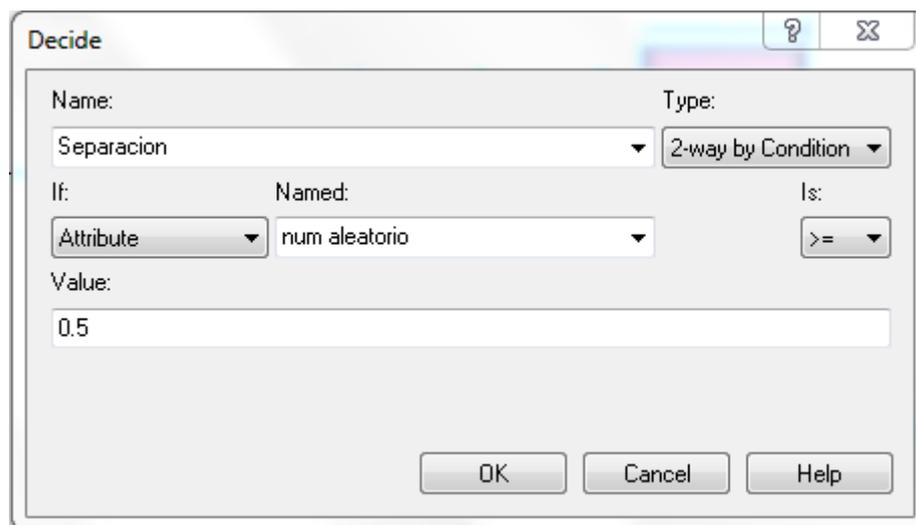


Imagen 78 - Módulo Decide. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

- Procesos de Impresión de códigos: Se trata de dos módulos *Process*, exactamente programados de igual manera, con la única salvedad del nombre, ya que una pertenece a la cinta A y otra a la cinta transportadora B.

Dentro del módulo, se crea un recurso del tipo *Seize-Delay-Release*, con el nombre “impresora laser 1” e “impresora laser 2”. A continuación se especifica el tiempo que está ocupado el recurso, que en este caso es constante y de valor 2,2 segundos. Como se puede apreciar es una operación muy rápida.

A continuación se va a mostrar únicamente, uno de los módulos, ya que el otro es similar, con la diferencia anteriormente mencionada.

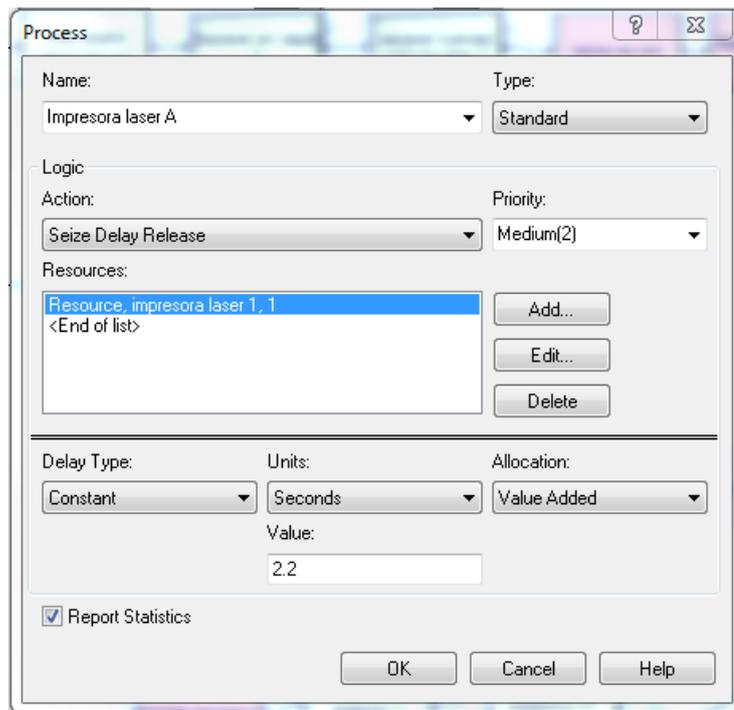


Imagen 79 - Módulo Process. Impresión láser. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

El siguiente paso, es el mecanizado de rectificación exterior y el control de diámetros que realiza en esta misma sección.

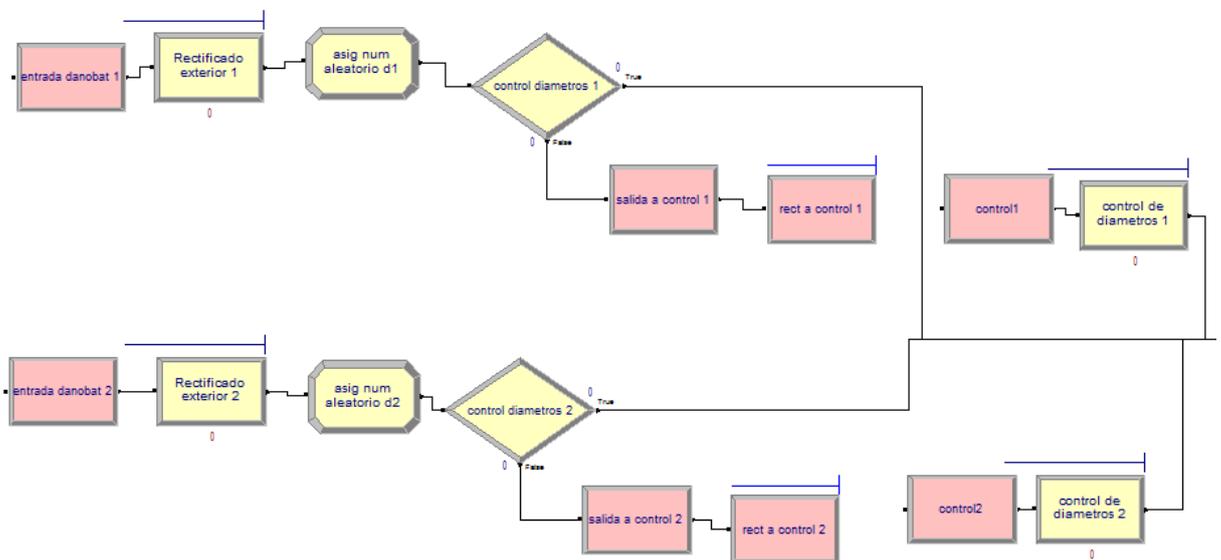


Imagen 80 - Área de rectificación y control diámetros. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

Esta fase está constituida por dos líneas de producción exactamente iguales, por lo que a continuación se detalla una de ellas, entendiendo que la otra se modela de igual manera, cambiando los nombres de los módulos.

- Proceso de rectificado exterior: Como todo proceso, se modela a partir de un módulo *Process*, como ya se ha visto. Es necesario definir un recurso que represente la máquina de rectificado DANOBAT y del tipo *Seize-Delay-Release*, que se llamará “Rect Danobat 1” y “Rect Danobat 2”. Es importante que la nomenclatura siga un cierto orden lógico, ya que se van a definir muchos recursos y muchos atributos, ya esto facilitará poder entender todo el modelo en su conjunto. Por último se define el tiempo de proceso, que al ser un proceso automatizado y controlado por la célula es un tiempo constante y en el cual el recurso está ocupado **6 segundos** antes de ser liberado y estar preparado para recibir la siguiente entidad. En la siguiente imagen se muestra la ventana de uno de los módulos *Process*.

Imagen 81 - Módulo Process. Máquina de rectificado. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

Para poder asociar las paradas por fallos y de mantenimiento por cambios de herramienta, es necesario ir al módulo de datos *Resource*, y añadir “Rows” derivados de otros módulos. Estos aspectos se mostrarán más adelante.

- Control de diámetros: Este control se realiza a una de cada diez tuercas y sigue la misma mecánica que en las anteriores operaciones en las que interviene un módulo *Decide* y se emplea la técnica de reducción de variable de números aleatorios comunes.

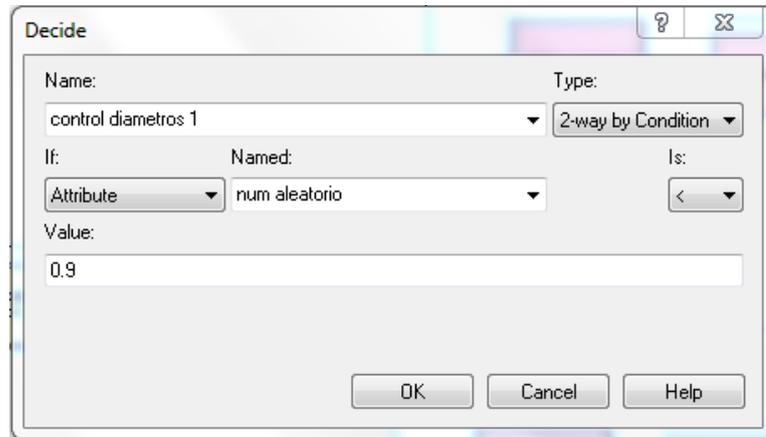


Imagen 82 - Módulo Decide. Control diámetros. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

El proceso de control, como su propio nombre indica, puede intuirse que se va a emplear un módulo Process, y se sigue las mismas pautas que se han empleado para este tipo de módulos. El recurso creado se va a nombrar como “útil medición”, y este mismo recurso se implanta en ambos procesos de control de diámetros, de ambas líneas de cintas transportadoras. El tiempo viene definido por una función de distribución, que en puntos anteriores se ha mostrado de donde viene.

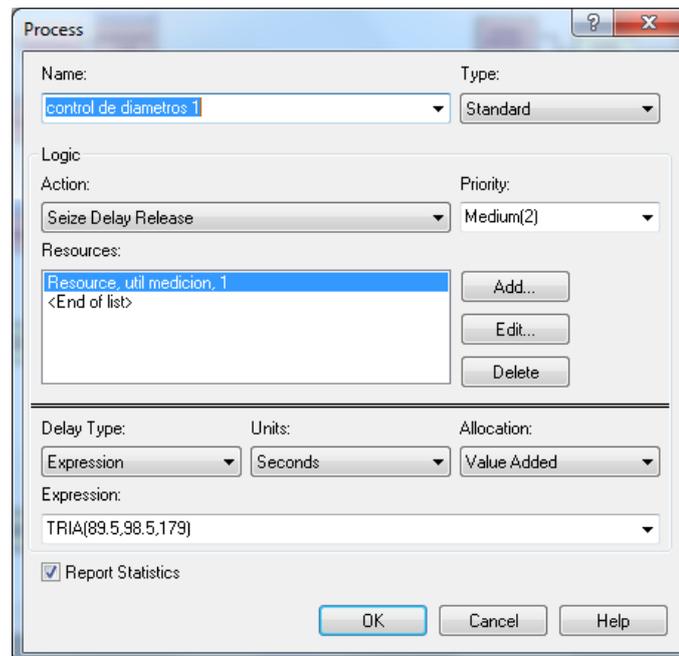


Imagen 83 - Módulo Process. Control diámetros. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

Para acabar esta fase de mecanización de las tuercas, se llega a la etapa en las que 1 de cada 400 tuercas, son enviadas a un control de verificación de rugosidad exterior en el laboratorio de metrología.

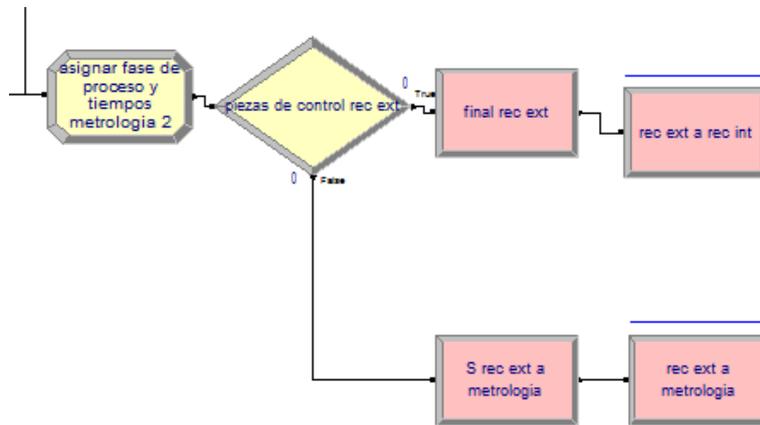


Imagen 84 - Área de separación tuercas de control. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

- Asignación tiempos de control y módulo *Decide*: Del mismo modo que en la célula de fresado, es necesario asignar los valores de los procesos de verificación a las tuercas seleccionadas para ello. En este caso al tener que pasar solo el control de rugosidad exterior, el resto de valores serán cero. Del mismo modo, se asociará un nuevo valor para el atributo “fase proceso”, se le asigna el valor **2**. Todo ello se puede ver en la siguiente imagen.

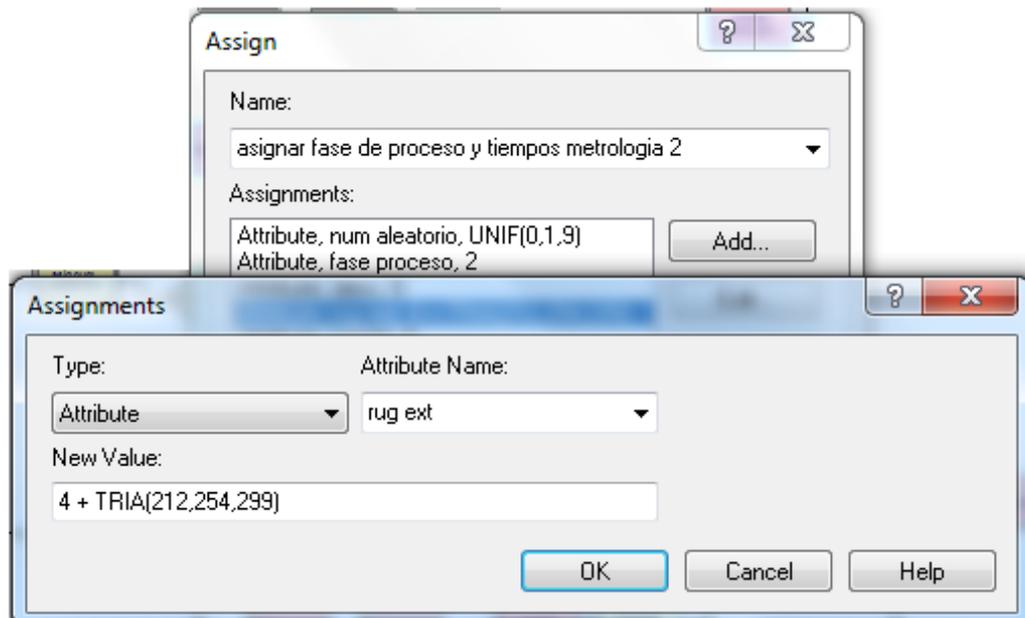


Imagen 85 - Módulo Assign de piezas de control. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

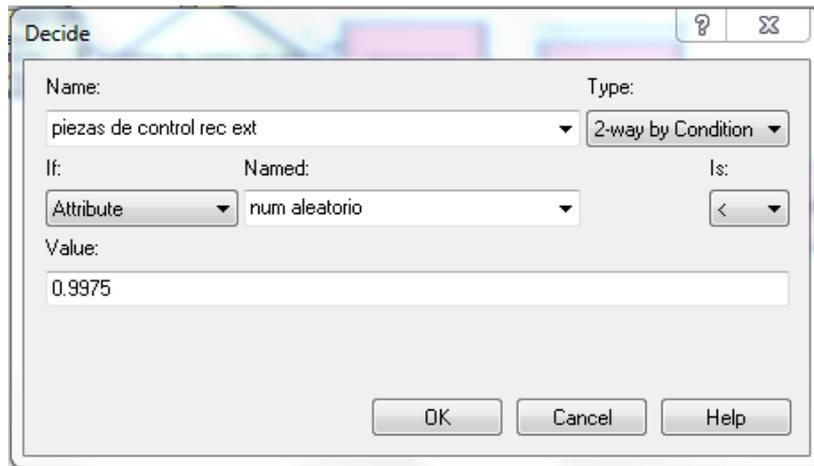


Imagen 86 - Módulo Decide de piezas de control. Célula de Rec. Exterior. (Arena)

5.3.6. CÉLULA DE RECTIFICADO INTERIOR

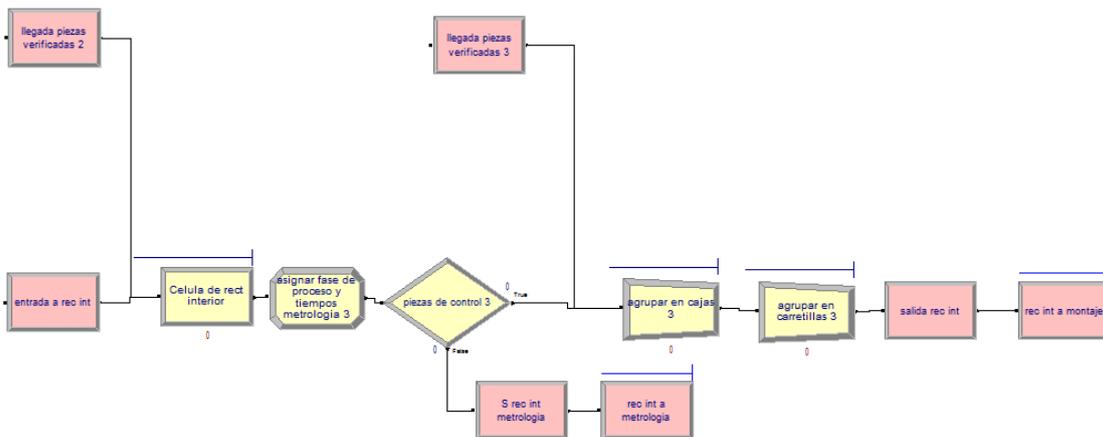


Imagen 87 - Célula de Rec. Interior. (Arena)

A esta fase, las piezas llegan desde una misma cinta transportadora, desde la célula de rectificado exterior. Las tuercas siguen el mismo protocolo que en casos anteriores de mecanizado, son procesadas en máquinas, se separan las tuercas de control y finalmente se agrupan en cajas y carretillas para ser transportadas a la siguiente estación.

- **Rectificado interior de las tuercas:** La modelización de esta fase es muy similar al proceso de desbaste o fresado, ya que se emplean el mismo modelo de centros de mecanizado, pero en vez de utilizar una herramienta de corte, se emplea muelas de abrasión específicas. El módulo Process quedaría completado de la siguiente manera con la creación de un recurso llamado “DRAKE rec int”, para poder diferenciarlo del recurso de la célula de fresado.

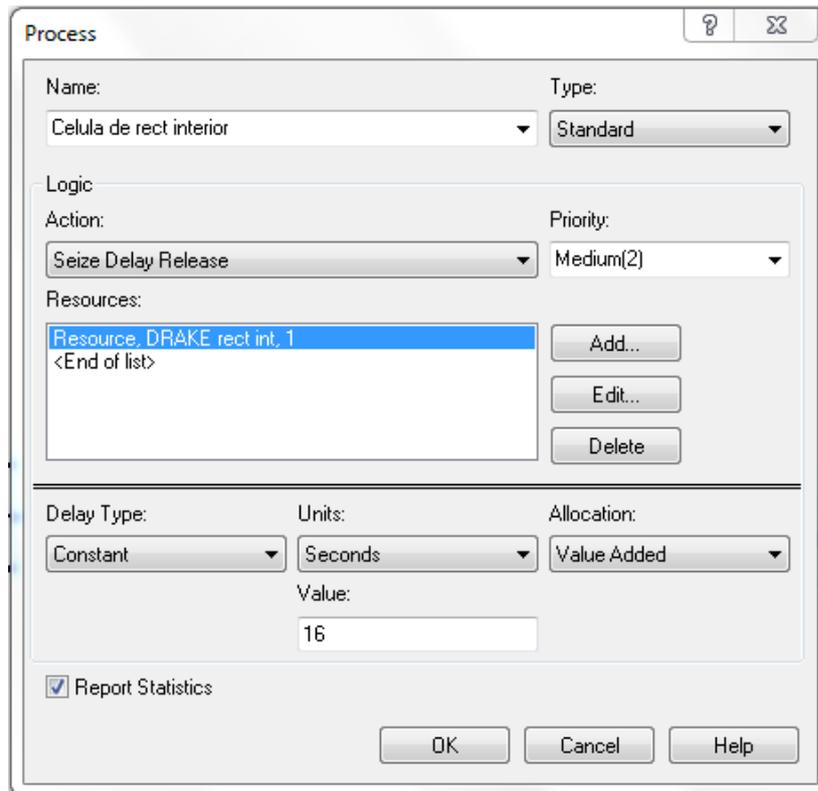


Imagen 88 - Módulo Process. Célula de Rec. Interior. (Arena)

Se puede ver que el tiempo invertido en ocupar el recurso es de **16 segundos**.

- Tuercas de control: Siguiendo el mismo *modus operandi* que en apartados previos, primero se asignan los valores de los atributos mediante un módulo *Assign*.

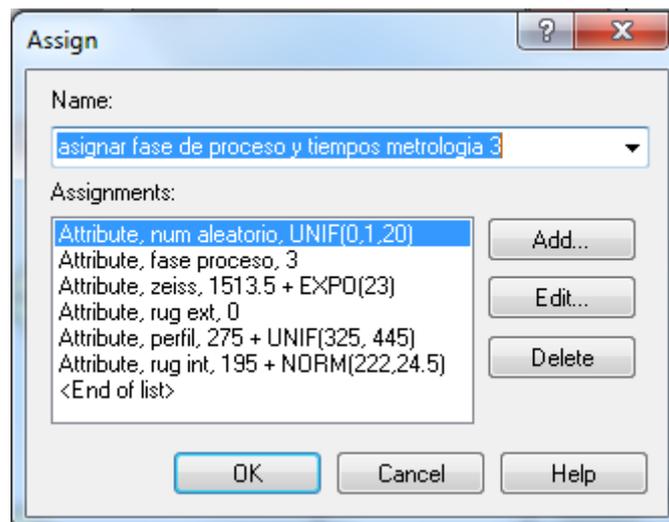


Imagen 89 - Módulo Assign. Célula de Rec. Interior. (Arena)

The dialog box 'Assignments' has a title bar with a question mark and a close button. It contains two dropdown menus: 'Type' set to 'Attribute' and 'Attribute Name' set to 'fase proceso'. Below them is a text input field for 'New Value' containing the number '3'. At the bottom are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Imagen 90 - Atributo fase proceso. Célula de Rec. Interior. (Arena)

The dialog box 'Assignments' has a title bar with a question mark and a close button. It contains two dropdown menus: 'Type' set to 'Attribute' and 'Attribute Name' set to 'zeiss'. Below them is a text input field for 'New Value' containing the formula '1513.5 + EXP0(23)'. At the bottom are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Imagen 91 - Atributo zeiss. Célula de Rec. Interior. (Arena)

The dialog box 'Assignments' has a title bar with a question mark and a close button. It contains two dropdown menus: 'Type' set to 'Attribute' and 'Attribute Name' set to 'perfil'. Below them is a text input field for 'New Value' containing the formula '275 + UNIF(325, 445)'. At the bottom are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Imagen 92 - Atributo perfil. Célula de Rec. Interior. (Arena)

The dialog box 'Assignments' has a title bar with a question mark and a close button. It contains two dropdown menus: 'Type' set to 'Attribute' and 'Attribute Name' set to 'rug int'. Below them is a text input field for 'New Value' containing the formula '195 + NORM(222,24.5)'. At the bottom are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Imagen 93 - Atributo rug int. Célula de Rec. Interior. (Arena)

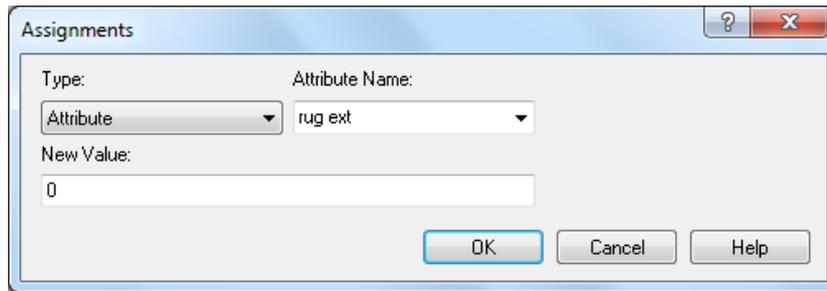


Imagen 94 - Atributo rug ext. Célula de Rec. Interior. (Arena)

- **Agrupación de tuercas para transporte:** Las tuercas que terminan todo el proceso de mecanizado, deben ser agrupadas en cajas y en carretillas para ser trasladadas al área de montaje. Dos módulos *Batch* consecutivos, son los encargados de realizar estas agrupaciones, creando de nuevo las entidades “caja tuercas” y “carretilla tuercas”.

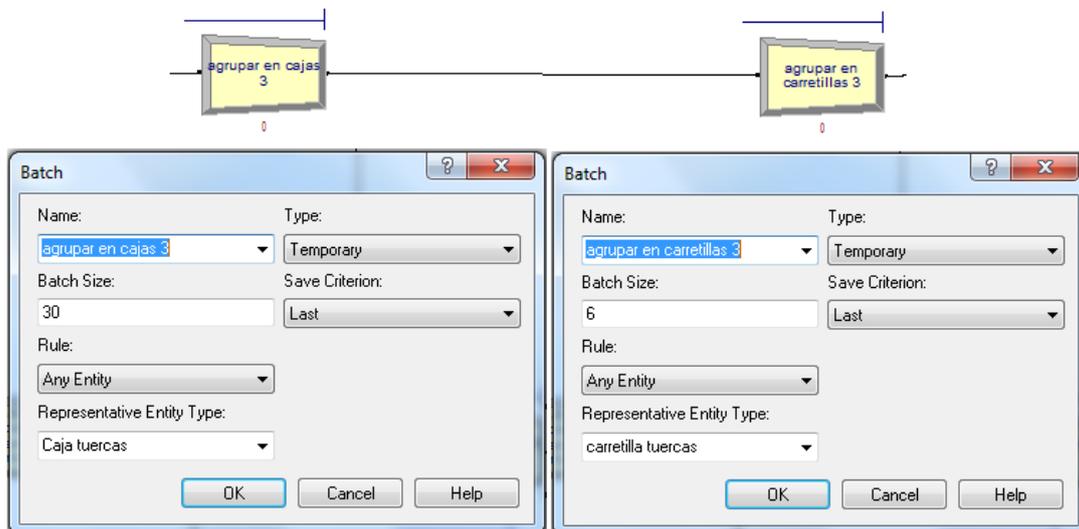


Imagen 95 - Módulos Batch. Célula de Rec. Interior. (Arena)

5.3.7. MONTAJE Y VERIFICACIÓN

En este punto de la línea, se produce la unión de todos los componentes que, en conjunto, forman la caja de dirección asistida eléctrica. Tras ser montado el conjunto, todo el sistema pasa un pequeño examen de seguridad, que verifica el buen funcionamiento del sistema.

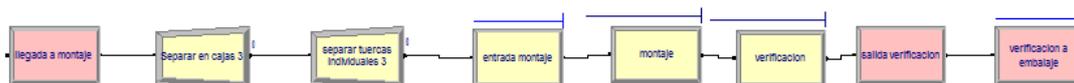


Imagen 96 - Área de montaje y Verificación (Arena)

Como se ve en la imagen, lo primero es separar las tuercas individualmente, esta parte ya no se va a exponer debido a que se realiza de la misma forma que las anteriores veces que se ha requerido de esta acción.

Posteriormente se depositan en una zona donde esperan a ser recogidas por un operario para ser montadas en el conjunto, y a continuación se verifica el correcto funcionamiento y se envía al área de embalaje.

- Área de espera: Se diseña mediante un módulo *Hold* el cual se rige por el escaneo de una condición. Dicha condición, que hace que se libere una entidad, es que la cola del proceso de montaje sea igual a cero. Se puede observar en la imagen siguiente la programación de este módulo.

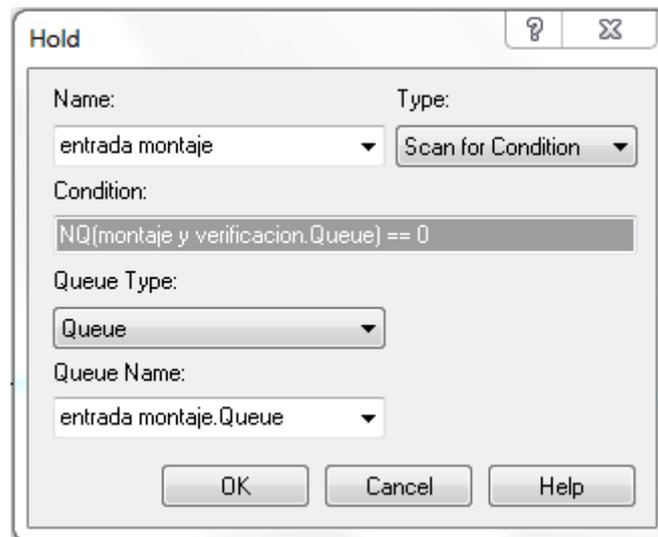


Imagen 97 - Módulo Hold. Área de montaje y Verificación (Arena)

- Proceso de montaje y verificación: Como todos los procesos, se diseñan creando un módulo *Process*. Se considera que se van a realizar dos operaciones consecutivas, que al ser contiguas y que están en el mismo área de acción se considera que no hay desplazamiento de la entidad y por tanto pueden ser conectadas de manera simple y sin transporte.

A continuación se van a mostrar las imágenes de los dos módulos *Process* creados para cada operación y que se han definido sus parámetros de la misma manera que en otros procesos, creando un recurso del tipo *Seize-Delay-release* y asociando el tiempo de proceso que le corresponda.

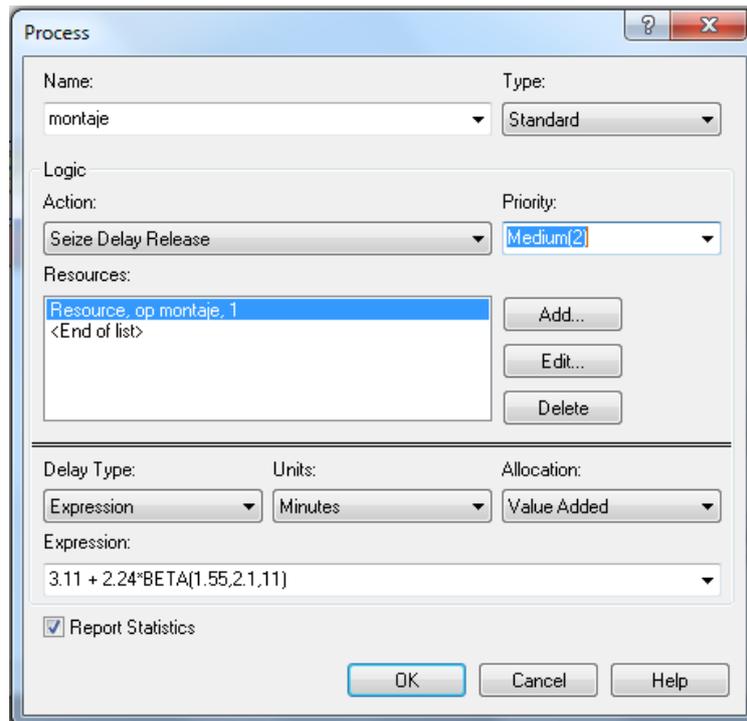


Imagen 98 - Módulo Process. Área de montaje (Arena)

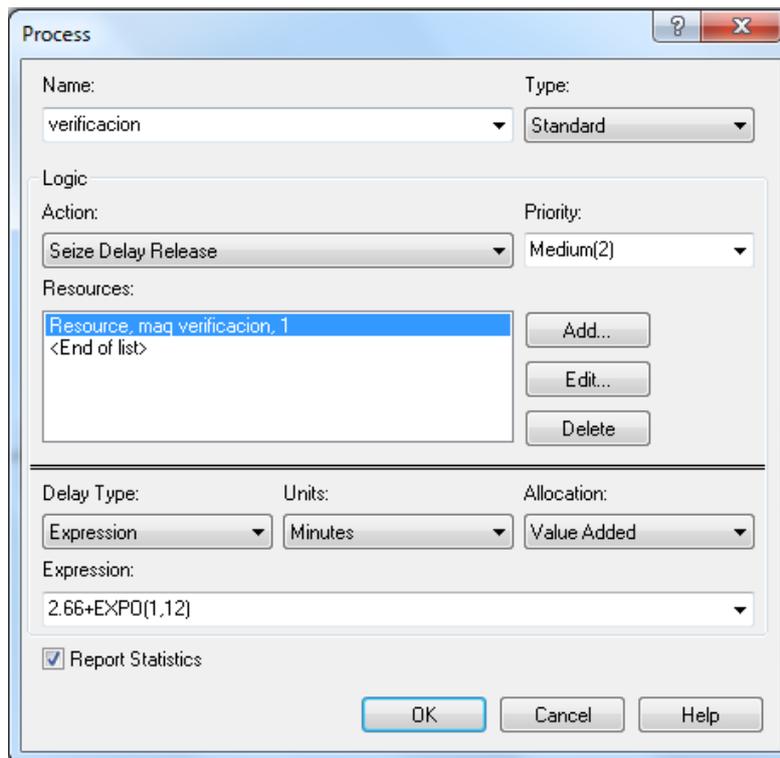


Imagen 99 - Módulo Process. Área de verificación (Arena)

En el tiempo que se estuvo recogiendo datos, no se observó ninguna respuesta negativa en la máquina de verificación, por lo que se decide que todos los conjuntos dan positivo en la prueba de funcionalidad y además en ambos casos

se aumenta su capacidad a 3 operarios de montaje y a 3 máquinas de verificación.

| Resource - Basic Process | | | |
|--------------------------|------------------|-------------------|--------------|
| | Name | Type | Capacity |
| 12 | DRAKE rect int | Based on Schedule | plan rec int |
| 13 | maq embalar | Fixed Capacity | 2 |
| 14 | maq verificacion | Fixed Capacity | 3 |
| 15 | op montaje | Fixed Capacity | 3 |

Imagen 100 - Módulo Resource. Capacidad maq verificación y op montaje (Arena)

5.3.8. ÁREA DE EMBALAJE

Esta área consta en un primer lugar de un área al que llegan los conjuntos, y posteriormente se embalan en grupos de ocho conjuntos para ser transportados en el camión.

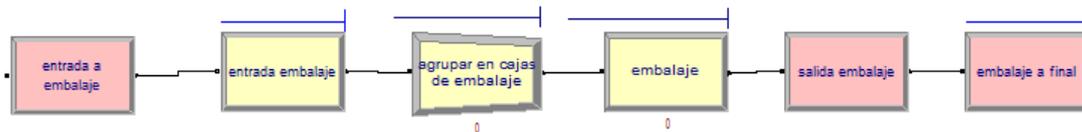


Imagen 101 - Área de embalaje (Arena)

- Zona de espera: Análogamente a todas estas zonas, se crea un módulo *Hold* el cual deja liberar entidades cuando la cola del módulo *Process* llamada “embalaje” es igual a cero. La imagen siguiente muestra la ventana del módulo “entrada embalaje”.

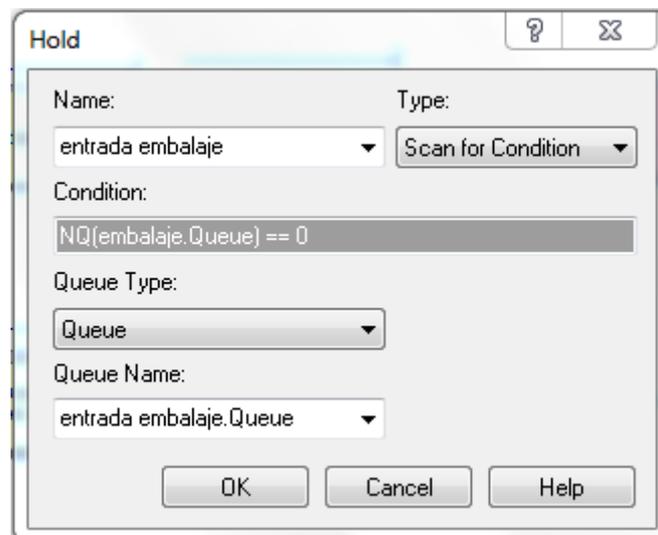


Imagen 102 - Módulo Hold. Área de embalaje (Arena)

- **Agrupación de los conjuntos:** Antes de proceder al proceso, se debe agrupar los conjuntos de direcciones asistidas en grupos de 8, tal y como se realiza en la realidad. Para ello, se crea un módulo *Batch*, y este se va a catalogar de permanente, en la opción *Type*, se elige “permanent”. Además, estas nuevas entidades van a recibir un nuevo nombre, “conjuntos finales”. La siguiente imagen refleja los pasos que han sido necesarios para la programación de este módulo.

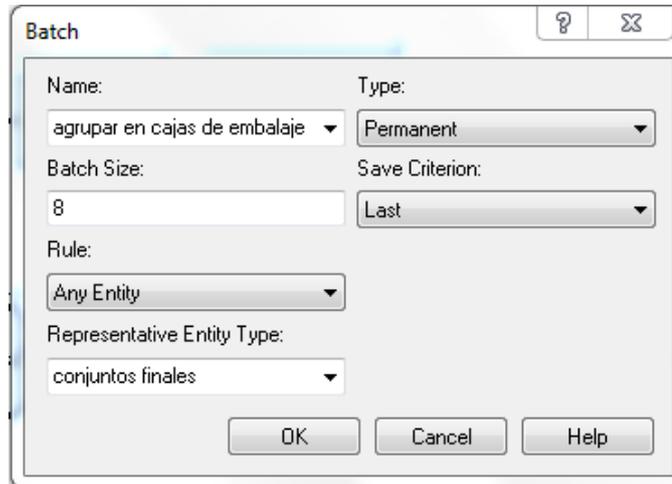


Imagen 103 - Módulo Batch. Área de embalaje (Arena)

- **Proceso de embalaje:** En este nuevo módulo *Process*, se va a crear un recurso denominado “maq embalar”, y como se ha tenido que hacer en otras ocasiones, al existir dos máquinas de este tipo, en el módulo de datos, *Resource*, se cambia en la columna, *Fixed Capacity*, de una a dos. El tiempo de proceso se rige por una expresión, que viene dada en segundos, ya que se trata de un proceso sencillo.

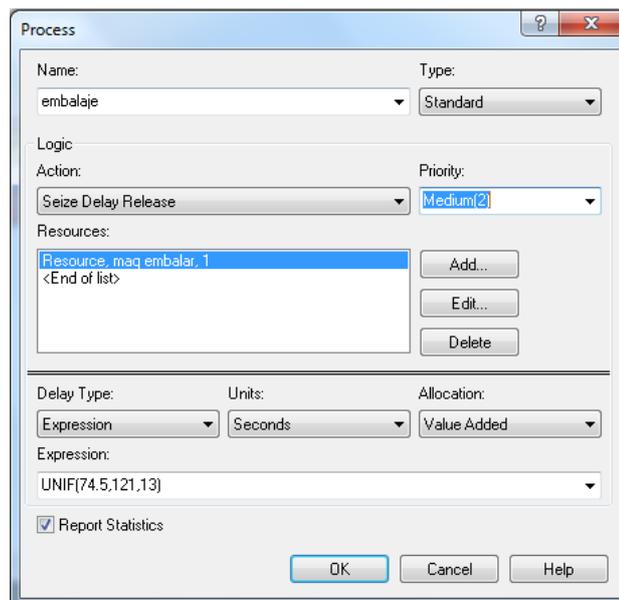


Imagen 104 - Módulo Process. Área de embalaje (Arena)

Este proceso también tiene asociado un módulo de datos de fallo, el cual se detallará en adelante.

Una vez estén las direcciones empaquetadas de la debida forma, termina en sí, la línea de fabricación y montaje, y se envían al muelle donde serán cargadas al camión.

5.3.9. FINAL DE LA SIMULACIÓN

Esta parte representa la llegada de los conjuntos empaquetados al muelle de carga a los camiones. Si se recuerda, al inicio de la simulación, se asignó a todas las entidades un atributo llamado “tiempo llegada” y el cual mediante un módulo *Record* se recogerá el tiempo que ha estado cada entidad siendo procesada en la línea.

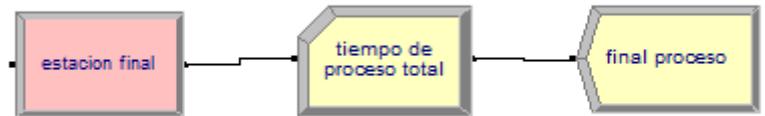


Imagen 105 - Final de la simulación (Arena)

- Módulo Record: La programación de este módulo viene condicionada por atributo anteriormente citado “tiempo llegada”. Este atributo representa un tiempo de intervalo, por lo tanto el tipo de este módulo va a ser “Time Interval”. Posteriormente se seleccionará en la ventana *Attribute Name*, el atributo “tiempo llegada” y para acabar, los datos serán recogidos en los resultados con el nombre que se proporcione en la última pestaña del módulo denominada *Tally name*. Este nombre que se ha puesto es “tiempo de proceso total”.

La siguiente imagen muestra la ventana que se abre al seleccionar hacer doble click en el módulo del modelo.

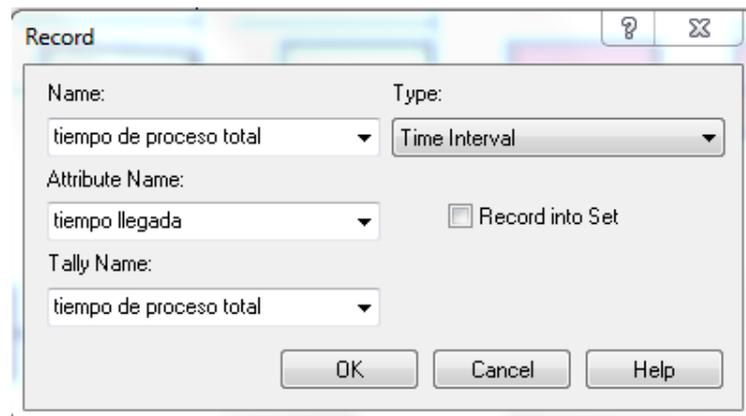


Imagen 106 - Módulo Record. Final de la simulación (Arena)

- Final de la simulación: El final de toda simulación se representa con un módulo del panel “Basic Process” denominado *Dispose*. En este módulo desaparecen de la simulación las entidades que han terminado de ser procesadas. Además en este

módulo donde se recogen todas las estadísticas de todas las entidades que llegan seleccionando la opción “**Record Entity Statistics**”.

En la imagen se puede observar que el módulo es de programación simple, pero que es imprescindible para poder obtener los resultados y posteriormente analizarlos exhaustivamente.

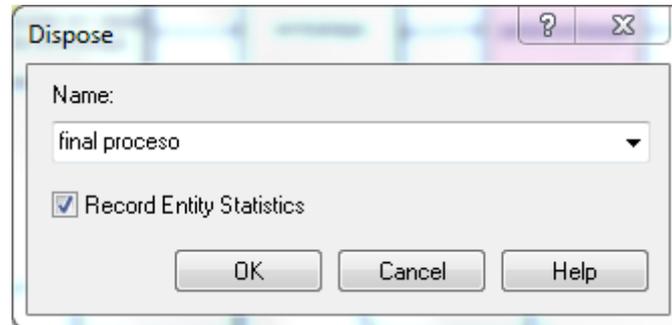


Imagen 107 - Módulo Dispose. Final de la simulación (Arena)

5.3.10. LABORATORIO DE METROLOGÍA

A este laboratorio de metrología llegan piezas de tres estados de producción, para poder diferenciar y que el programa pueda reconocer la fase en la que llega cada tuerca, anteriormente y como ya se ha comentado, en cada una de las fases se les ha asociado un atributo correspondiente a la fase en la que se encuentran y otros cuatro atributos más con el valor del tiempo de verificación en cada una de las máquinas a las que van a ser sometidas. Si una de las tuercas no necesita ser controlada por alguna de las máquinas, se le habrá asignado el valor cero.

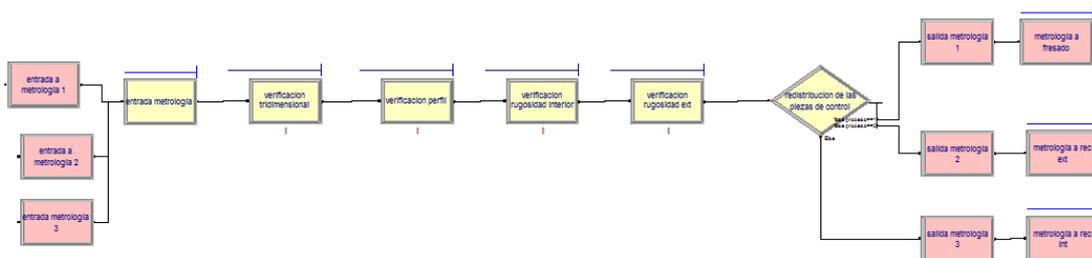


Imagen 108 - Laboratorio de Metrología (Arena)

El modelaje de esta área, como se puede ver en la imagen anterior, comienza con tres llegadas y una zona donde las tuercas esperan a ser recogidas y colocadas en la primera máquina de revisión (máquina tridimensional). A partir de ahí siguen una serie de procesos de verificación, hasta que son devueltas, y gracias al atributo “fase proceso” cada tuerca a la estación de mecanizado de la que provenía cada tuerca de bolas.

- Zona de espera: En la realidad se trata de una mesa dentro del laboratorio, en la cual, los operarios que traen las piezas las depositan debidamente etiquetadas con la fase del proceso proveniente y el tipo de verificación que necesitan.

Para simular este hecho, se crea un módulo *Hold* en el cual las entidades van a esperar hasta que la cola de la primera máquina de verificación por la que deben pasar es igual a cero.

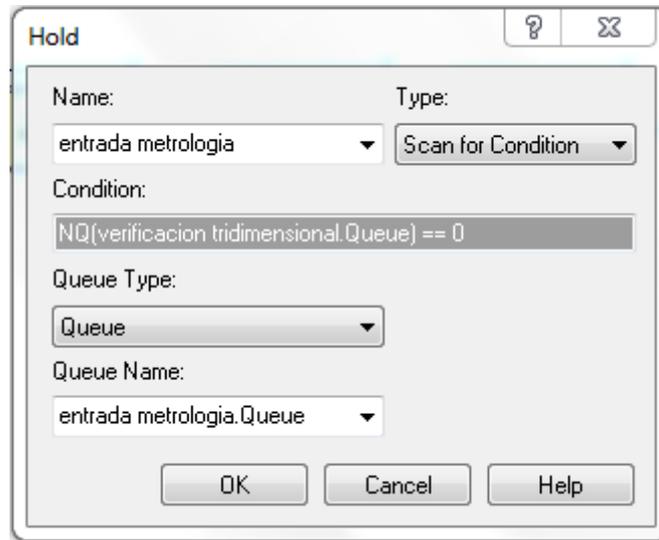


Imagen 109 - Módulo Hold. Laboratorio de Metrología (Arena)

- **Procesos de verificación:** Como ya se explicó, este laboratorio consta de **dos** máquinas tridimensionales ZEISS, **un** perfilómetro, **un** rugosímetro interior y **un** rugosímetro exterior. En total son cuatro procesos, y por lo tanto, se crea un módulo *Process* para cada uno de ellos, en el mismo orden indicado anteriormente. Al igual que en anteriores procesos, se trata de procesos del tipo *Seize-Delay-Release* y el tiempo invertido en ocupar cada uno de los recursos, viene expresado por el atributo que se asoció a cada entidad en la respectiva fase del proceso de mecanizado del que provienen.

- Máquina Tridimensional:

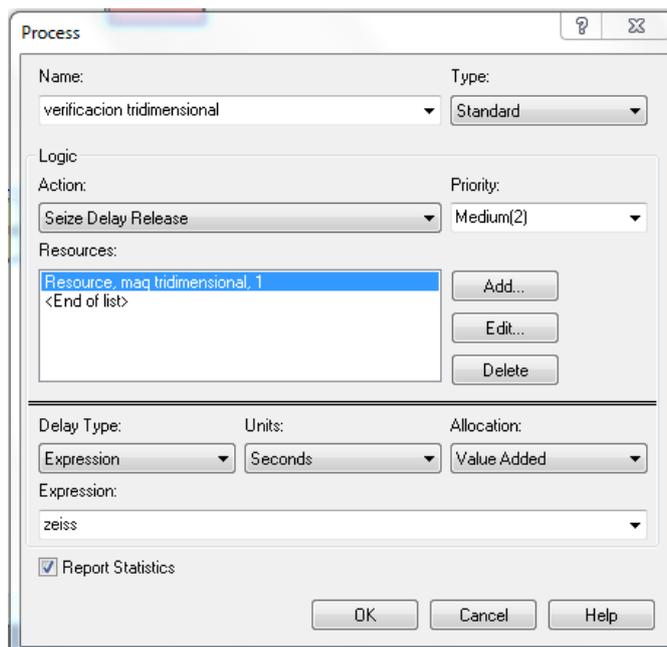


Imagen 110 - Módulo Process Zeiss. Laboratorio de Metrología (Arena)

En este caso, además hay que configurar la cantidad de máquinas que existen, ya que en la realidad se dispone de dos de ellas. Para ello, igual que en otros casos, en el módulo de datos *Resource*, se configura la columna *Capacity* con el número 2.

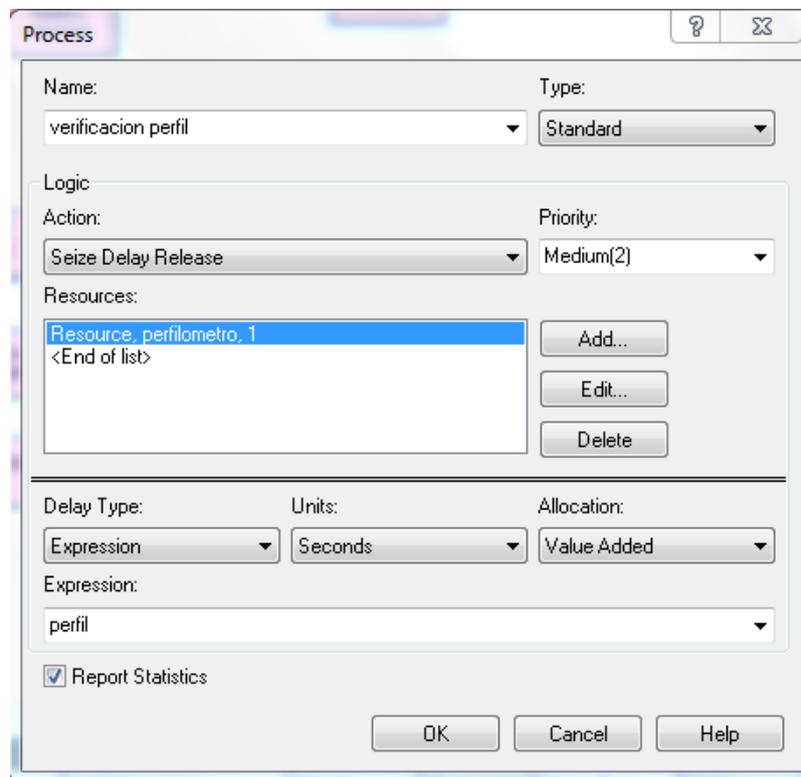


Resource

| | Name | Type | Capacity | Bl |
|---|--------------------|----------------|----------|----|
| 1 | DRAKE fresadora | Fixed Capacity | 3 | 0. |
| 2 | maq tridimensional | Fixed Capacity | 2 | 0. |
| 3 | perfilometro | Fixed Capacity | 1 | 0. |
| 4 | reconstruccion int | Fixed Capacity | 1 | 0. |

Imagen 111 - Módulo Resource. Laboratorio de Metrología (Arena)

- Perfilómetro:



The screenshot shows the 'Process' configuration dialog box. The 'Name' field is set to 'verificacion perfil' and the 'Type' is 'Standard'. The 'Logic' section shows 'Action' as 'Seize Delay Release' and 'Priority' as 'Medium(2)'. Under 'Resources', 'Resource_perfilometro_1' is selected. The 'Delay Type' is 'Expression', 'Units' is 'Seconds', and 'Allocation' is 'Value Added'. The 'Expression' field contains 'perfil'. The 'Report Statistics' checkbox is checked. Buttons for 'Add...', 'Edit...', 'Delete', 'OK', 'Cancel', and 'Help' are visible.

Imagen 112 - Módulo Process Perfil. Laboratorio de Metrología (Arena)

- Rugosímetro Interior:

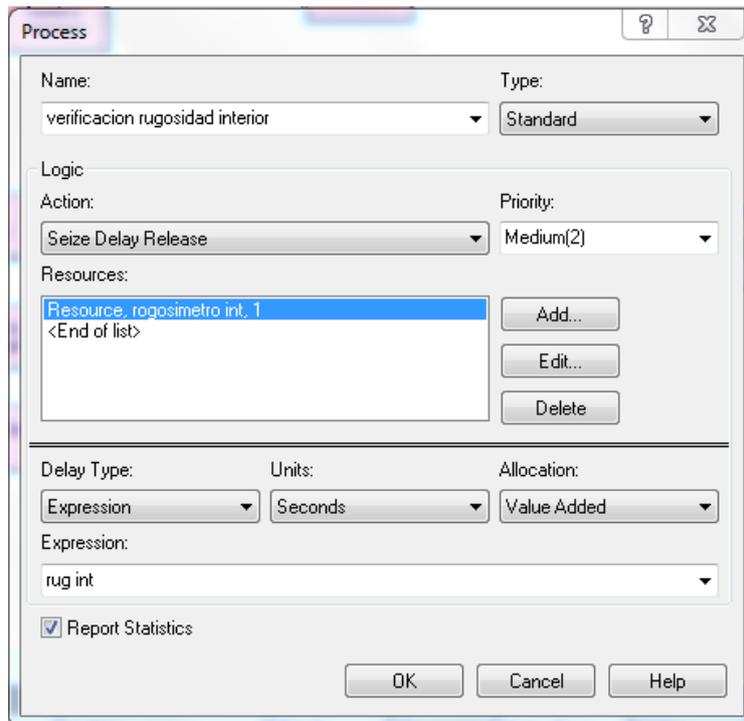


Imagen 113 - Módulo Process Rugosímetro Interior. Laboratorio de Metrología (Arena)

- Rugosímetro Exterior:

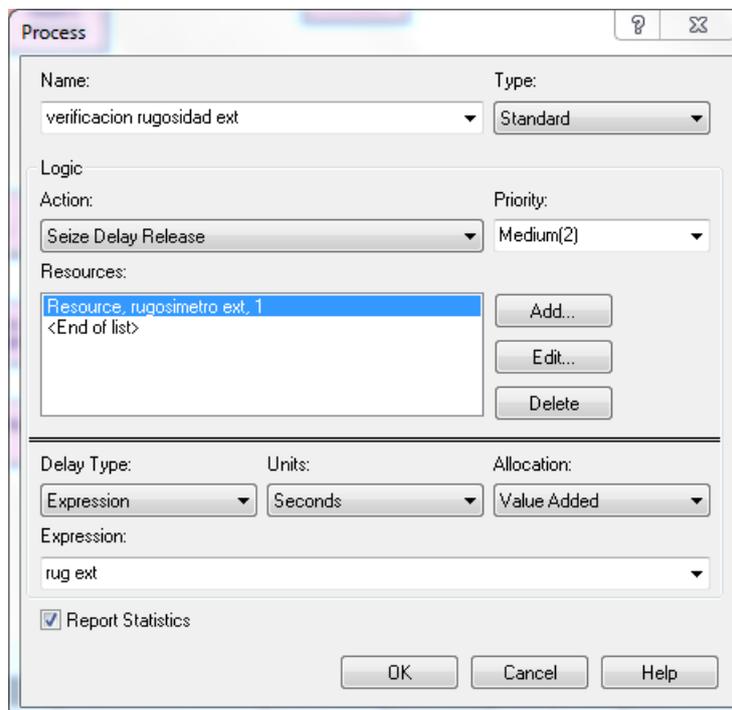


Imagen 114 - Módulo Process Rugosímetro Exterior. Laboratorio de Metrología (Arena)

- Salida de las tuercas: Como ya se ha dicho, cada pieza debe ser llevada a la fase de mecanizado de la que provenía. Para ello se creó un atributo denominado “fase proceso” de tal manera que se codificaron las fases de fresado, rectificado exterior y rectificado interior con números de la siguiente manera.
 - Fase de Fresado → fase proceso==1
 - Fase de Rectificado Exterior → fase proceso==2
 - Fase de rectificado Interior → fase proceso==3

Gracias a esta codificación se puede emplear un módulo *Decide* del tipo *N-way by Condition*. De esta manera se consiguen crear tantas salidas como condiciones se implanten en el módulo. En este caso, con crear dos condiciones va a ser suficiente, ya que la tercera será la propia salida de *False* que todo módulo de este tipo posee.

Las condiciones son simples e intuitivas y son las siguientes:

- El atributo “fase proceso” posee el valor 1
- El atributo “fase proceso” posee el valor 2

Por la salida *False*, saldrán las tuercas con destino a la fase de rectificado interior, ya que el valor del atributo es 3, y no cumple ninguna de las condiciones del valor 1 y 2 del atributo.

Esta programación se puede ver en la siguiente imagen, que especifica tanto el módulo *Decide*, como las dos condiciones que se han creado.

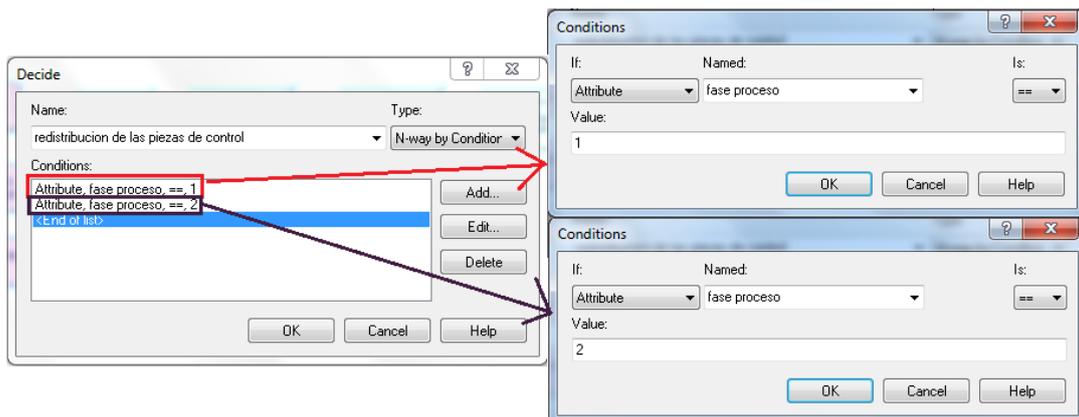


Imagen 115 - Módulo *Decide*. Laboratorio de Metrología (Arena)

A partir de aquí, cada entidad es trasladada a su destino mediante transportes que se expondrán más adelante.

5.3.11. FALLOS Y MANTENIMIENTO

Como se explicó en el punto de descripción del sistema real, hay dos tipos de paradas, las programadas por mantenimiento o cambios de herramienta o los fallos que se pueden producir de manera aleatoria. En Arena, ambos fallos se programan con el mismo módulo.

Lo primero es crear los fallos, para luego poder asociarlo a los recursos. Para ello hay que ir al panel de *Advanced Process* y seleccionar el módulo de datos *Failure*. En la parte inferior de la pantalla del software aparecen una serie de columnas en las que ir completando con datos para crear los fallos.

Se pueden programar dos tipos de fallos, que son, los que se producen cada cierto tiempo (“Time”) y los que se producen cada cierto número de entidades (“Count”). Esta diferenciación sirve para programar los fallos como “Time” y las paradas para cambio de herramienta como “Count”.

En el caso de los fallos tipo “Count”, se necesita conocer cada cuantas entidades se realiza la parada, y el *Down Time*, que es el tiempo que la máquina permanece parada.

Por otro lado en los fallos tipo “Time”, se necesita conocer dos tiempos, el *Up Time* y al igual que en el otro tipo el *Down Time*. El *Up Time* es el tiempo entre roturas, puede estar expresado con un tiempo constante o mediante una expresión. En este caso, se programan expresiones basadas en datos recogidos en la planta de producción.

En la siguiente imagen se pueden observar todos los fallos creados para este modelo.

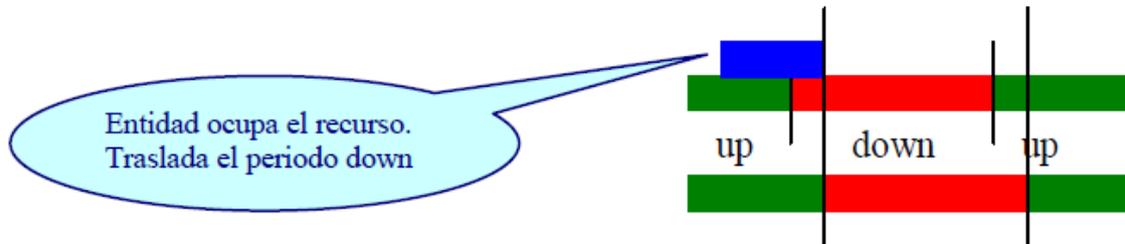
| Name | Type | Up Time | Up Time Units | Count | Down Time | Down Time Units |
|---------------------------|-------|--|---------------|---------------------------|--|-----------------|
| 1 Cambio herramienta | Count | 3.0 | Hours | 400 | 99.5 + 61*BETA(0.773,0.891) | Seconds |
| 2 rotura fresa | Time | CONT(0.001, 4.500, 0.500, 11.500, 0.750, 18.500, 0.750, 25.500, 0.750, 32.500, 1, 41.500) | Days | DaysT eBase Time(C) | CONT(0.001, 152.500, 0.250, 153.500, 0.250, 154.500, 0.250, 155.500, 0.250, 156.500, 1, 187.500) | Seconds |
| 3 Cambio muela | Count | 1.0 | Hours | 1600 | 380+TRIA(422,452,788) | Seconds |
| 4 Rotura muela | Time | CONT(0.001, 27.500, 0.500, 32.500, 0.500, 37.500, 0.500, 42.500, 0.500, 47.500, 1, 54.500) | Days | DaysT eBase Time(C) | CONT(0.001, 643.999, 0.500, 688.199, 0.500, 752.400, 0.500, 806.600, 0.500, 860.801, 1, 915.001) | Seconds |
| 5 Rotura herramienta rect | Time | CONT(0.001, 2.500, 0.500, 17.500, 0.500, 32.500, 0.500, 47.500, 0.500, 62.500, 1, 78.500) | Days | DaysT eBase Time(C) | CONT(0.001, 97.500, 0.500, 105.500, 0.500, 113.500, 0.500, 121.500, 0.500, 129.500, 1, 135.500) | Seconds |
| 6 Cambio herramienta rect | Count | 1.0 | Hours | 60 | 8 | Seconds |
| 7 fallo horno | Time | CONT(0.001, 2.500, 0.333, 3.500, 0.333, 4.500, 0.333, 5.500, 1, 46.500) | Days | DaysT eBase Time(C) | CONT(0.001, 165.999, 0.333, 228.999, 0.667, 291.200, 0.667, 353.800, 0.667, 416.401, 1, 479.001) | Seconds |
| 8 fallo montaje | Time | CONT(0.001, 0.500, 0.273, 3.500, 0.273, 6.500, 0.636, 9.500, 0.818, 12.500, 1, 15.500) | Days | DaysT eBase Time(C) | CONT(0.001, 143.999, 0.333, 384.999, 0.583, 626.000, 0.750, 867.000, 0.917, 1108.001, 1, 1349.001) | Seconds |
| 9 fallo embalaje | Time | CONT(0.001, 14.500, 0.333, 15.500, 0.333, 16.500, 1, 37.500) | Days | DaysT eBase Time(C) | CONT(0.001, 121.500, 0.333, 122.500, 0.333, 123.500, 1, 158.500) | Seconds |

Imagen 116 - Módulo Failure (Arena)

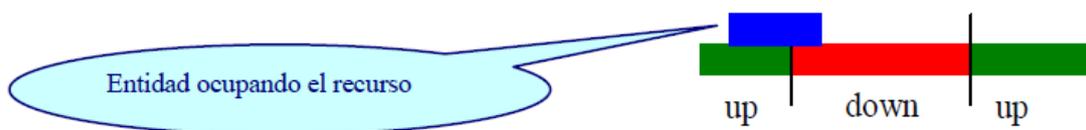
A continuación y una vez creados todos los “rows” de fallos y cambios de herramienta, es necesario asignar a cada recurso, su fallo correspondiente.

Este paso es muy sencillo y basta con ir al módulo de datos donde se crean y modifican los recursos, *Resource*. Una vez en este módulo, aparecen todos los recursos que existen en el modelo y en cada uno hay una columna denominada “Failures”. En esta columna haciendo click en la casilla correspondiente a cada recurso se abre una ventana donde crear “rows”. Para cargar un fallo que se previamente se ha creado solo se necesita hacer doble click y automáticamente aparecen dos columnas, una indicando que fallo se quiere asociar y otra denominada *Failure Rule*. Esta última especifica cual es la regla por la que se rige el fallo en concreto. Arena aporta tres opciones que son las siguientes:

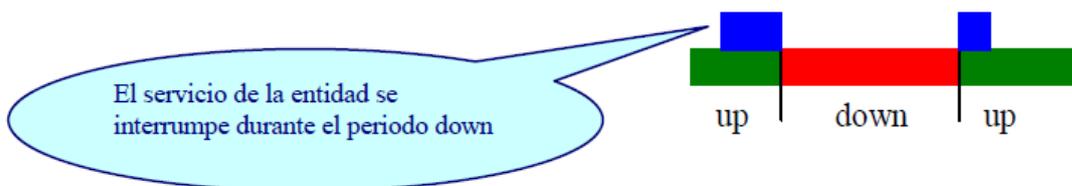
- **Wait:** Si en el momento de la reducción de la capacidad el recurso está siendo utilizado por una entidad, entonces ese inicio se pospone hasta que el recurso es liberado por la entidad. Como consecuencia el tiempo que permanece el recurso ocupado, es decir, en periodo “Down” es el previsto pero con una posible traslación en el tiempo.



- **Ignore:** En este caso la reducción de la capacidad se inicia y finaliza en los instantes previstos, sin embargo si en el momento del inicio una entidad ocupa el recurso, ésta finalizará su proceso en él, por lo que el recurso realmente reduce su capacidad cuando es liberado por la entidad.



- **Preemp:** Aunque el recurso esté siendo ocupado por una entidad, éste se pone en situación de Down inmediatamente para cumplir con el período establecido. Cuando finalice este periodo y el recurso vuelva a estar disponible automáticamente retoma a la unidad que había abandonado y finaliza su servicio.



Para el modelo del estudio se cree conveniente que por las circunstancias que suceden en el sistema real, la opción adecuada para las paradas por mantenimiento es la de “**Ignore**” y para los fallos la opción “**Preemp**”.

Esta imagen muestra la columna “Failures”

Como se puede ver algunos recursos tienen asociados dos fallos, que corresponden al propio fallo de la máquina y a la parada para que se produzca el cambio de herramienta.

| Failures |
|----------|
| 2 rows |
| 0 rows |
| 0 rows |
| 0 rows |
| 0 rows |
| 1 rows |
| 2 rows |
| 0 rows |
| 2 rows |
| 0 rows |
| 0 rows |
| 2 rows |
| 1 rows |
| 1 rows |
| 1 rows |

Imagen 117 - Columna Failures (Arena)

A continuación se va a mostrar un ejemplo de una de estas ventanas, en la cual existen dos tipos de fallos, tanto de parada por cambio de herramienta, como un fallo en la producción de la máquina.

| Failures | | |
|----------|--------------------|--------------|
| | Failure Name | Failure Rule |
| 1 | Cambio herramienta | Ignore |
| 2 | rotura fresa | Preempt |

Double-click here to add a new row.

Imagen 118 - Fallos asociados al recurso “DRAKE fresadora” (Arena)

5.3.12. TRANSPORTES

Los transportes en Arena merecen ser tratados aparte, ya que es el mecanismo de simulación que entraña más dificultades, por los muchos parámetros que entran en juego.

En este modelo, se consideran tres tipos de transportes: Carretillas motorizadas, carretillas manuales y cintas transportadoras.

Los tres tipos de transportes se van a simular utilizando los mismos módulos, los cuales van a ser *Station*, *Leave* y *Enter*.

Para poder diferenciar y caracterizar cada transporter hay que seguir dos pasos.

1º- En el módulo Leave, seleccionar el tipo “Transporter”, si se trata de carretillas o “Convey”, si es una cinta transportadora.

2º- En el módulo de datos *Transporter*, las velocidades serán diferentes dependiendo si es una carretilla manual o motorizada.

A continuación se va a detallar un transporte de cada tipo únicamente, ya que son muchas las estaciones y el procedimiento es el mismo el que se sigue, con la diferenciación de que los recursos, atributos y los nombres varían.

- Del muelle de llegadas al almacén (Carretilla motorizada)

Lo primero es asociar una estación (módulo *Station*) de la cual partirá el transporte. Lo más importante es definir un único nombre que sea fácil de identificar.

Imagen 119 - Módulo Station. Muelle de llegadas (Arena)

A continuación se crea un módulo Leave, donde las entidades al llegar solicitarán un transporte. En este módulo hay que definir casi todo lo que concierne al transporte. En este caso se trata de un operario que conduce una carretilla motorizada. Los parámetros de este módulo son los siguientes:

- Delay: Tiempo que se invierte en la carga de entidades. **1,3 minutos**.
- Transfer Out: Que tipo de transporte se solicita. En este caso **Request Transporter**.
- Transporter Name: Nombre del transporte. **Operario muelle**.

- Selection Rule: Cuando hay más de un transporte, este apartado sirve para definir cuál de ellos acudirá primero a recoger la entidad. En este modelo, al solo haber un operario que se encargue del transporte se deja la que viene por defecto. **Smallest Distance**.
- Save Attribute: Es el nombre de referencia del atributo de transporte que se emplea para su uso posterior en un módulo *Enter*. **Operariomuelle**.
- Connect Type: Tipo de conexión. Mediante **Transport**.
- Station Type: Tipo de estación al que está asociada. **Station**.
- Station Name: Nombre de la estación de destino (el módulo *Enter* es un módulo Station pero con parte lógica). **Llegada almacén**

The image shows a software configuration window titled "Leave". It contains the following fields and values:

- Name: muelle a almacen
- Allocation: Value Added
- Delay: 1.3
- Units: Minutes
- Transfer Out: Request Transporter
- Priority: High (1)
- Queue Type: Queue
- Queue Name: muelle a almacen.Queue
- Transporter Name: operario muelle
- Selection Rule: Smallest Distance
- Save Attribute: operariomuelle
- Connect Type: Transport
- Station Type: Station
- Station Name: llegada almacen.Station

Buttons: OK, Cancel, Help

Imagen 120 - Módulo Leave. Muelle de llegadas (Arena)

Y para completar el proceso de transporte se crea un módulo *Enter* al que llegan las entidades y que realiza tres actividades que son, definir una estación, esperar el tiempo de descarga y liberar el transporte. Los parámetros a definir son los siguientes:

- Delay: Tiempo de descarga de las entidades. **2,2 minutos**.
- Transfer In: Qué transporte se libera. **Free Transporter** al tratarse de este tipo de vehículo.
- Transporter Name: Nombre del transporte que se libera. De todos los transporters que hay, cuál de ellos llega y tiene que ser liberado. **Operario muelle**.
- Unit Number: Es el nombre de referencia del atributo de transporte. **Operariomueller**.

Imagen 121 - Módulo Enter. Almacén (Arena)

Las carretillas manuales, se diseñan del mismo modo, pero con velocidad inferior. Este hecho se explica un poco más adelante.

Además de crear esta cadena de módulos en el modelo, es necesario definir las distancias que separan los viajes que tiene que realizar cada transporte y la velocidad.

- o Distancias: Cada operario de cada zona, tiene que realizar recorridos transportando las entidades. Algunos solo realizarán un recorrido y habrá otro que tengan de desplazarse a varias zonas de la fábrica. En Arena es necesario definir cada posible recorrido que pueda realizar cada transporte y definir la longitud de esa distancia.

En este punto, del que se está detallando los transportes del tipo “Transporter”, hay que ir al panel de módulos *Advanced Transfer* y seleccionar el módulo de datos *Distance*. En el aparecen todos los transporter de este tipo que se han creado en el modelo y donde a cada uno hay que ir creando tantas “Rows” como recorridos pueda llegar a realizar.

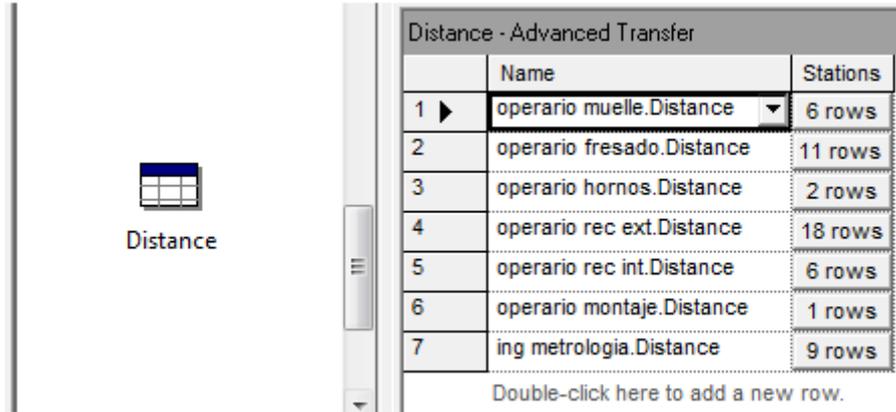


Imagen 122 - Módulo Distance (Arena)

Para definir los recorridos se necesita definir la estación de origen y la estación de destino, y definir la distancia en unidades de longitud del programa.

| | Beginning Station | Ending Station | Distance |
|---|------------------------|-------------------------|----------|
| 1 | muellelegada | llegada almacen.Station | 2300 |
| 2 | salidaembalaje | estacion final.Station | 700 |
| 3 | salidaembalaje | muellelegada | 1400 |
| 4 | estacion final.Station | muellelegada | 500 |
| 5 | salidaembalaje | llegada almacen.Station | 2800 |
| 6 | estacion final.Station | llegada almacen.Station | 3300 |

Double-click here to add a new row.

Imagen 123 - Ejemplo de distancias. Operario muelle (Arena)

- Velocidades: En el mismo panel de módulos, se selecciona el módulo de datos *Transporter*. En el aparecen al igual que en el anterior, todos los transportes de este tipo que se hayan creado.

Una vez seleccionado este módulo, se puede ver que es similar a otros módulos de datos, aparecen los transportes y una serie de columnas donde definir ciertos parámetros. En esta ocasión se prestará atención al parámetro “Velocity”, el cual hay que definirlo en función de las unidades de longitud de las distancias y las unidades de tiempo que se definan. Como anteriormente las distancias se han definido en centímetros, se hace más cómodo trabajar en **centímetros por**

segundo. De esta forma el módulo de datos queda registrado de la siguiente manera.

| | Name | Number of Units | Type | Distance Set | Velocity | Units | Initial Position Status | Report Statistics |
|---|------------------|-----------------|-----------|---------------------------|----------|------------|-------------------------|-------------------|
| 1 | operario muele | 1 | Free Path | operario muele.Distance | 277.8 | Per Second | 1 rows | ✓ |
| 2 | operario fresado | 1 | Free Path | operario fresado.Distance | 138.89 | Per Second | 1 rows | ✓ |
| 3 | operario hornos | 1 | Free Path | operario hornos.Distance | 138.89 | Per Second | 1 rows | ✓ |
| 4 | operario rec ext | 1 | Free Path | operario rec ext.Distance | 138.89 | Per Second | 1 rows | ✓ |
| 5 | operario rec int | 1 | Free Path | operario rec int.Distance | 138.89 | Per Second | 1 rows | ✓ |
| 6 | operario montaje | 3 | Free Path | operario montaje.Distance | 138.89 | Per Second | 1 rows | ✓ |
| 7 | ing metrologia | 1 | Free Path | ing metrologia.Distance | 138.89 | Per Second | 1 rows | ✓ |

Imagen 124 - Módulo Transporter (Arena)

- Del inicio de la cinta transportadora a la impresora láser 1 (Conveyor)

La secuencia es la misma, *Station* → *Leave* → *Enter*, pero al venir directamente de otro transporte, se puede emplear el último módulo *Enter*, como el primer módulo *Station* de este desplazamiento. Esto se puede realizar, ya que de la primera estación lo único que se necesita es un nombre y que esté conectada con el módulo *Leave* que va a estar asociada. Este proceso se puede llevar a cabo con un módulo *Enter* igualmente.

Enter

Name: inicio cinta Station Type: Station

Station Name: inicio cinta.Station Station Properties...

Logic

Delay: 5 Allocation: Value Added

Units: Seconds

Transfer In: Free Transporter

Transporter Name: operario rec ext Unit Number: operariorecext

OK Cancel Help

Imagen 125 - Módulo Enter. Inicio cinta. Área de Rec. Ext. (Arena)

Posteriormente se crea el módulo *Leave*, y donde los parámetros van a ser diferentes en comparación con los transportes de otro tipo.

- Delay: Tiempo que se invierte en la carga de entidades. **2 segundos**.
- Transfer Out: Que tipo de transporte se solicita. En este caso **Access Conveyor**.
- Conveyor Name: Nombre de la cinta. **Cinta 1 A**. De esta manera se diferencia de la cinta que recorre paralelamente por todo el proceso de rectificado exterior, pero en la otra máquina y el tramo de cinta en la que se encuentra.
- # of Cells: Número de celdas que ocupa la entidad. **1**.
- Connect Type: Tipo de conexión. Mediante **Convey**.
- Station Type: Tipo de estación al que está asociada. **Station**.
- Station Name: Nombre de la estación de destino. **Entrada laser 1**.

Imagen 126 - Módulo Leave. Inicio cinta. Área de Rec. Ext. (Arena)

Para finalizar el transporte se necesita crear el módulo *Enter* final. Los parámetros que diferencian un *Enter* del tipo *Conveyor*, con otro del tipo *Transporter* son los siguientes:

- Transfer In: Qué transporte se libera. **Exit Conveyor** al tratarse de este tipo de vehículo.
- Conveyor Name: Nombre de la cinta que termina. De todas las cintas que hay, cuál de ellas llega a su fin. **Cinta 1 A**.

Imagen 127 - Módulo Enter: Llegada a láser 1. Área de Rec. Ext. (Arena)

Al igual que ocurría anteriormente, es necesario definir la longitud de las distancias y la velocidad a la que se mueven las cintas transportadoras.

- o Distancias: Las distancias se gestionan de igual manera, pero en el módulo de datos denominado Segment.

| | Name | Beginning Station | Next Stations |
|---|------------------|-------------------------|---------------|
| 1 | Cinta 1A.Segment | inicio cinta.Station | 1 rows |
| 2 | Cinta 1B.Segment | entrada laser 1.Station | 1 rows |
| 3 | Cinta.Segment | finalreext | 1 rows |
| 4 | Cinta 2A.Segment | inicio cinta.Station | 1 rows |
| 5 | Cinta 2B.Segment | entrada laser 2.Station | 1 rows |

Double-click here to add a new row.

Imagen 128 - Módulo Segment (Arena)

En este módulo se define la estación en la que comienza, y en el “Row” la estación donde acaba, y la distancia.

| | Next Station | Length |
|---|-------------------------|--------|
| 1 | entrada laser 1.Station | 200 |

Double-click here to add a new row.

Imagen 129 - Ejemplo Row. Módulo Segment. (Arena)

- o Velocidades: Las velocidades se programan en el módulo de datos *Conveyor*. De igual manera en este módulo se define el tipo de cinta (**Non-Acumulating**), el número de celdas que posee la cinta (**10**), el máximo número de celdas que puede ocupar una entidad (**1**) y por supuesto la velocidad expresada en centímetros por segundos (**83,33**).

| Name | Segment Name | Type | Velocity | Units | Cell Size | Max Cells Occupied | Initial Status | Report Statistics |
|---------------|------------------|------------------|----------|------------|-----------|--------------------|----------------|-------------------|
| 1 ▶ cinta 1 A | Cinta 1A.Segment | Non-Accumulating | 83.33 | Per Second | 10 | 1 | Active | ✓ |
| 2 cinta 1 B | Cinta 1B.Segment | Non-Accumulating | 83.33 | Per Second | 10 | 1 | Active | ✓ |
| 3 cinta | Cinta.Segment | Non-Accumulating | 83.33 | Per Second | 10 | 1 | Active | ✓ |
| 4 cinta 2A | Cinta 2A.Segment | Non-Accumulating | 83.33 | Per Second | 10 | 1 | Active | ✓ |
| 5 cinta 2B | Cinta 2B.Segment | Non-Accumulating | 83.33 | Per Second | 10 | 1 | Active | ✓ |

Double-click here to add a new row

Imagen 130 - Módulo Conveyor (Arena)

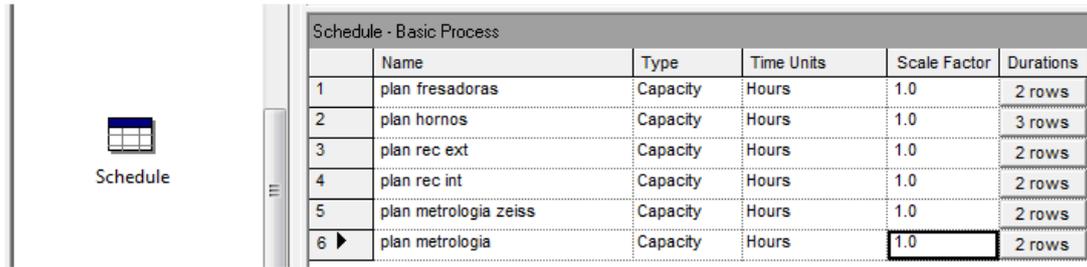
5.3.13. TURNOS DE TRABAJO

Anteriormente se han definido las capacidades de los recursos, como capacidades fijas, pero en la descripción del sistema real se vio que no es así en algunos casos, y por lo tanto en algunas de las fases, se debe modelar en función a ciertos horarios.

Para llevar este hecho al programa, hay que dirigirse al panel de procesos básicos y seleccionar el módulo de datos *Schedule*. Este módulo ofrece diferentes variantes, y como en este caso se trata de definir la capacidad de recursos en *Type* se escoge la opción “Capacity”. Por defecto, las unidades de tiempo vienen expresadas en horas y la escala de tiempo es de una hora.

Este módulo funciona de manera similar a otros módulos de datos que se han mostrado, haciendo doble click aparece una fila donde ir definiendo los parámetros anteriores y en la última columna denominada Row, al seleccionarla aparece en pantalla un histograma en el cual, el eje horizontal expresa los intervalos de tiempo y en el eje vertical se debe seleccionar la capacidad del recurso en cada intervalo de tiempo.

A continuación se mostrará una imagen donde se pueden ver todos los planes de trabajo creados y un par de ejemplos, para mostrar cómo se han rellenado los histogramas.



| | Name | Type | Time Units | Scale Factor | Durations |
|---|-----------------------|----------|------------|--------------|-----------|
| 1 | plan fresadoras | Capacity | Hours | 1.0 | 2 rows |
| 2 | plan hornos | Capacity | Hours | 1.0 | 3 rows |
| 3 | plan rec ext | Capacity | Hours | 1.0 | 2 rows |
| 4 | plan rec int | Capacity | Hours | 1.0 | 2 rows |
| 5 | plan metrologia zeiss | Capacity | Hours | 1.0 | 2 rows |
| 6 | plan metrologia | Capacity | Hours | 1.0 | 2 rows |

Imagen 131 - Módulo Schedule (Arena)

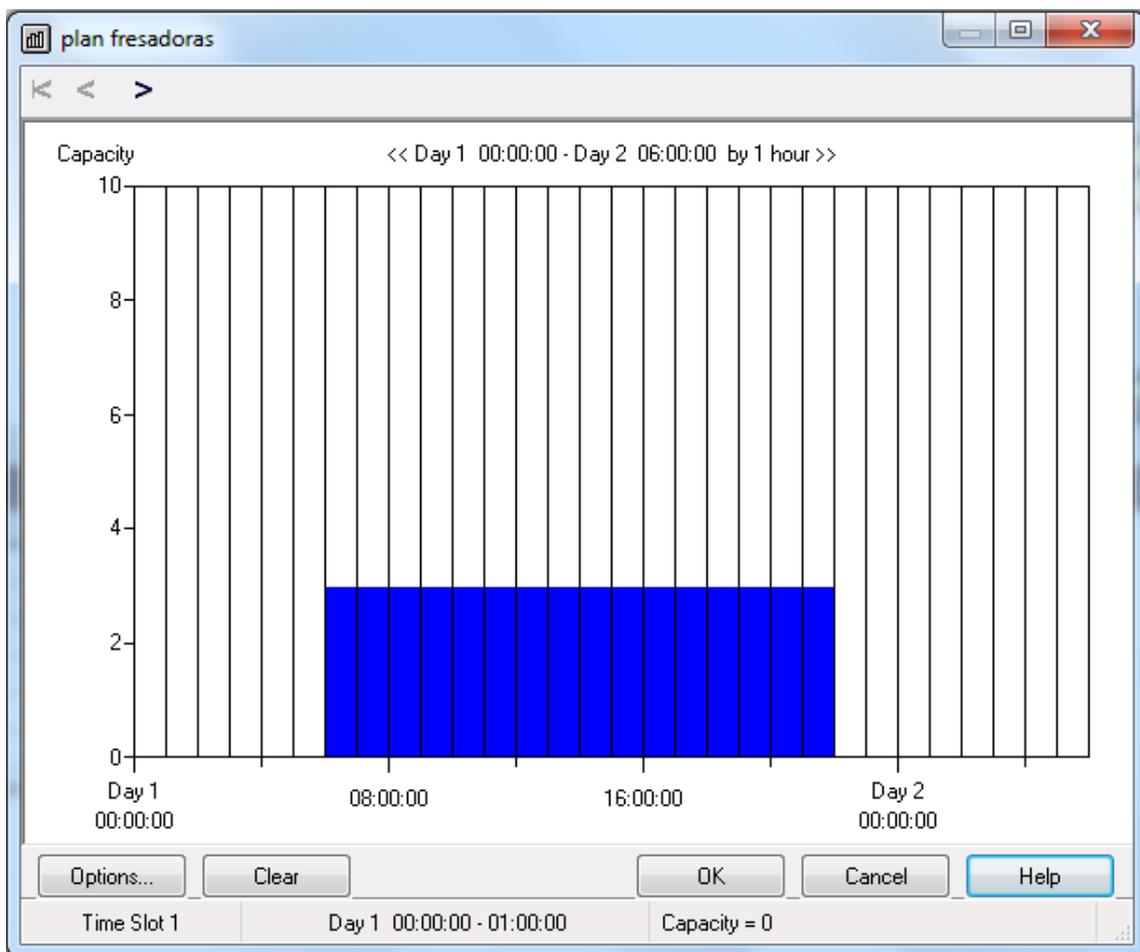


Imagen 132 - Plan de trabajo fresadoras (Arena)

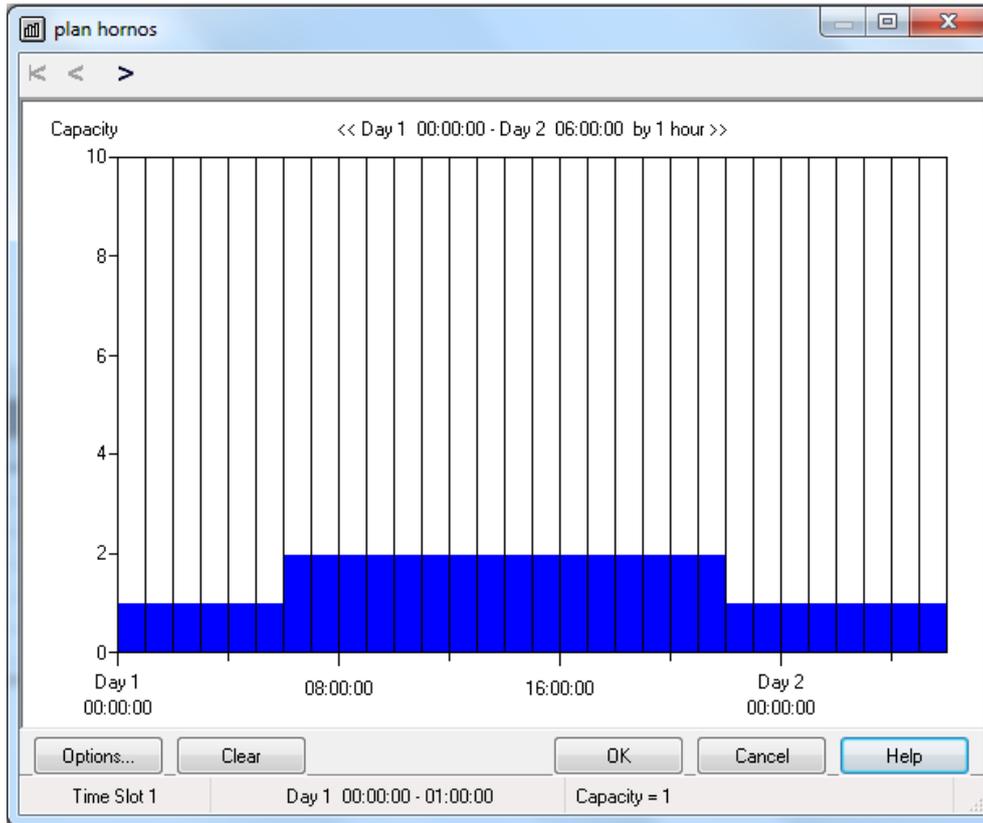


Imagen 133 - Plan de trabajo hornos (Arena)

Después de crear los planes de trabajo de cada sección, es necesario asociarlos a dichos recursos. Para realizar esta asociación hay que ir al módulo de datos que recoge los recursos y en la columna Type, se selecciona la opción “Based on Schedule”, y automáticamente se anulará la columna Capacity y dejará modificar la columna de Schedule Name, y es ahí donde se debe asociar cada plan de trabajo con su correspondiente recurso. De esta manera el módulo de datos Resource quedará definido de la siguiente manera.

| Resource - Basic Process | | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Name | Type | Capacity | Schedule Name |
| 1 | DRAKE fresadora | Based on Schedule | plan fresadoras | plan fresadoras |
| 2 | maq tridimensional | Based on Schedule | plan metrologia zeiss | plan metrologia zeiss |
| 3 | perfilometro | Based on Schedule | plan metrologia | plan metrologia |
| 4 | rogosimetro int | Based on Schedule | plan metrologia | plan metrologia |
| 5 | rugosimetro ext | Based on Schedule | plan metrologia | plan metrologia |
| 6 | Hornos | Based on Schedule | plan hornos | plan hornos |
| 7 | Rect Danobat 1 | Based on Schedule | plan rec ext | plan rec ext |
| 8 | impresora laser 2 | Based on Schedule | plan rec ext | plan rec ext |
| 9 | Rect Danobat 2 | Based on Schedule | plan rec ext | plan rec ext |
| 10 | impresora laser 1 | Based on Schedule | plan rec ext | plan rec ext |
| 11 | util medicion | Based on Schedule | plan rec ext | plan rec ext |
| 12 | DRAKE rect int | Based on Schedule | plan rec int | plan rec int |
| 13 | celula montaje | Fixed Capacity | 3 | 3 |
| 14 | maq embalar | Fixed Capacity | 2 | 2 |
| 15 | maq verificacion | Fixed Capacity | 3 | 3 |

Imagen 134 - Módulo Resource con planes de trabajo (Arena)

5.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)

La simulación se ha convertido en una herramienta universal, de hecho muchos sistemas reales se ven afectados por entradas aleatorias que no estaban contempladas y por lo que se consideran no controladas. Esto exige el uso de modelos de simulación estocásticos.

Teniendo en cuenta el párrafo anterior, se debe tomar especial precaución en el diseño y el análisis del experimento de simulación, para que se puedan considerar los resultados como válidos.

Las características y objetivos que se persiguen en el estudio del sistema, imponen ciertas restricciones y reglas en el diseño del modelo. En este punto es donde entra en juego el Diseño Estadístico de Experimentos. Gracias a esta parte de la simulación, se puede conducir o guiar, en cierta manera, el paso del tiempo, es decir, si la simulación va a tener punto de finalización o no, si se quiere que tenga un periodo de ajuste al inicio (warm-up period), o si se quiere poner una condición de parada (simular hasta que se cumpla una determinada condición), etc.

Para poder realizar un correcto diseño en este modelo, en primer lugar hay que tener muy claro, que se trata de una simulación **sin punto de finalización**, ya que la fábrica trabaja 24 horas al día y durante los siete días de la semana, no existe un momento en el que paré la producción y se vuelva a reiniciar desde un punto cero. Aunque hay procesos que no trabajan durante los tres turnos de trabajo, se sigue considerando sin punto de finalización ya que al retomar la actividad se sigue de donde se dejó cuando se paró, por lo tanto existe una continuidad interrumpida, pero no se reinicia el proceso desde el inicio.

Otro aspecto muy importante es que al tratarse de un modelo sin punto de finalización, va a requerir la entrada de un **periodo de calentamiento o warm-up**. Este es el tiempo que necesita modelo hasta alcanzar el estado estable. Alcanzar este estado de estabilidad es primordial para poder analizar el comportamiento del modelo, ya que muchos especialistas en el tema afirman que en este estado, las variables de respuesta del sistema muestran “regularidad estadística”. Gracias a este periodo de calentamiento se observan dos ventajas fundamentales.

- Se elimina el sesgo generado por las observaciones tempranas consideradas en el tiempo de transición, lo que da valores anormales, en comparación con los datos recogidos una vez alcanza el estado estable la simulación.
- Este tiempo de calentamiento, indica cuando se deben a empezar a recoger datos de la información estadística, o en otras palabras, en que momento de la simulación se debe considerar el tiempo 0 o inicio de la simulación real.

En el programa de simulación escogido para realizar este trabajo, se puede modelar este diseño de experimentos, en la ventana *Setup*. Para ello se debe ir a la barra de tareas principal en la parte superior de la pantalla, pinchar en **Run**, y a continuación en el desplegable, hacer click en **Setup...**

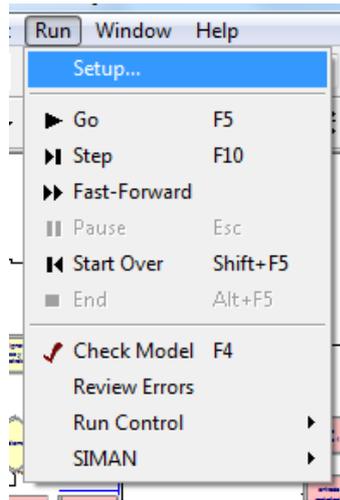


Imagen 135 - Desplegable Run (Arena)

A continuación aparecerá en pantalla una ventana, con varias pestañas. Para realizar propiamente el DOE, se centrará la atención en la pestaña principal, *Replication parameters*.

En la imagen siguiente se va a ofrecer esta ventana ya rellena con los datos específicos para este modelo de simulación y posteriormente se procederá a explicar cada uno de los apartados y a dar a conocer el por qué se ha relleno con esos datos.

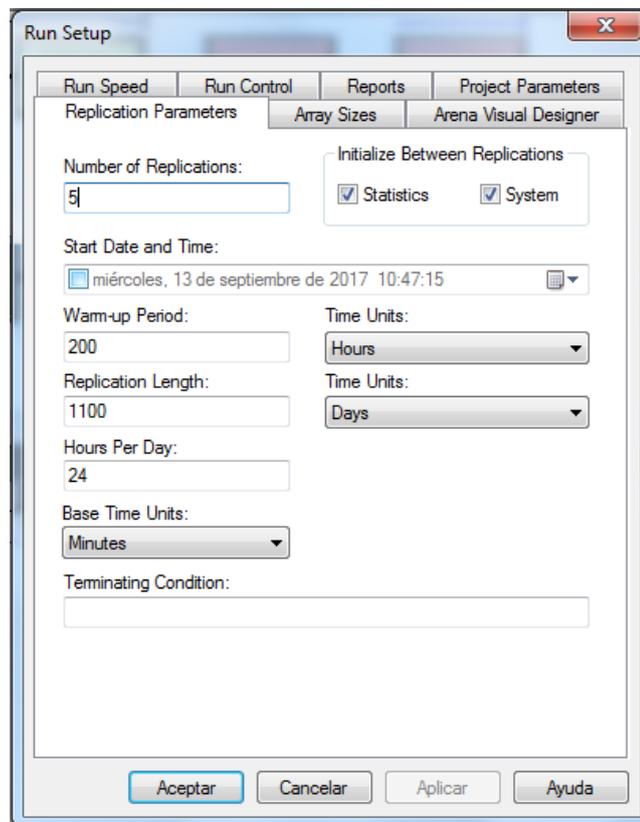


Imagen 136 - Ventana Run Setup 1 (Arena)

- Warm-up Period: Hay modelos que pueden estabilizarse en pocas horas y otros que necesitan un periodo de tiempo amplio para que la recolección de datos sea concluyente. En la actualidad no existe un método claro para determinar exactamente este periodo de calentamiento, únicamente existen métodos de aproximación.

Uno de ellos, que es el método aplicado a este trabajo, habla de correr una simulación preliminar de tres a cinco réplicas y observar en que momento alcanza la estabilidad estadística. Hay que tener en cuenta que la longitud de las réplicas sea lo suficientemente amplia como para que aparezcan los llamados “eventos atípicos o raros”, que en este caso se pueden considerar como roturas de herramientas, fallos de las máquinas, paros para mantenimiento... y que lleguen a ocurrir con cierta frecuencia o al menos dos o tres veces.

Para llevarlo a cabo, se centraron los resultados en la tasa de piezas que salen del modelo entre el tiempo del sistema. La metodología que se llevó a cabo para registrar estos datos, fue aprovechar la ventaja que ofrece el programa *ARENA* de poder ir guardando los datos en una hoja de cálculo *EXCEL*. El procedimiento fue el siguiente:

- Colocar en el modelo dos módulos del tipo *ReadWrite* en que uno va a registrar el tiempo del sistema, para poder observar cuando los datos son estables en el modelo y el otro registrará la tasa de piezas entre el propio tiempo, que es el indicador que se va a tener para ver cuando el modelo es estable.

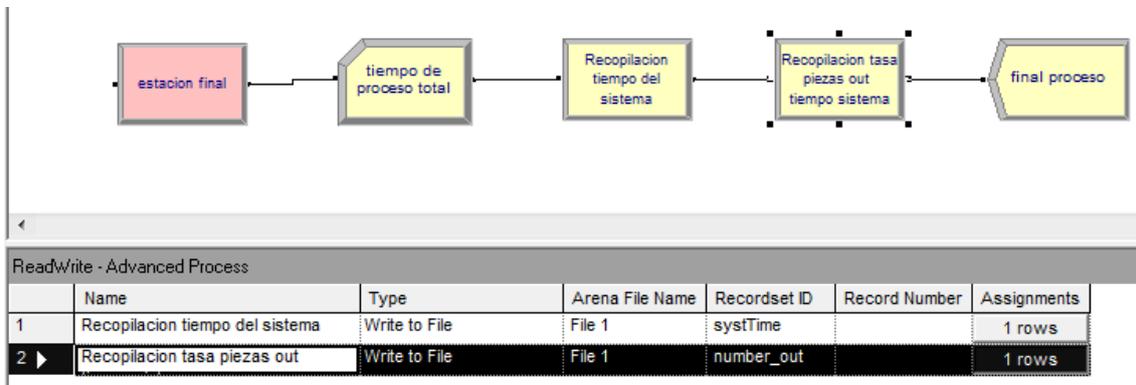


Imagen 136 - Módulo ReadWrite (Arena)

Como se puede ver, los dos módulos son del tipo “*Write to File*” que quiere decir que son módulos utilizados para escribir datos en un archivo.

- Se selecciona el nombre con el que se van a nombrar las columnas en el archivo de datos *EXCEL*, mediante la columna “*Recordset ID*” y en la columna de “*Assignments*” se asignan los datos que se quiere registrar con cada módulo.

- Después hay que rellenar el módulo de datos File, que es el encargado de enviar los datos al fichero de datos.

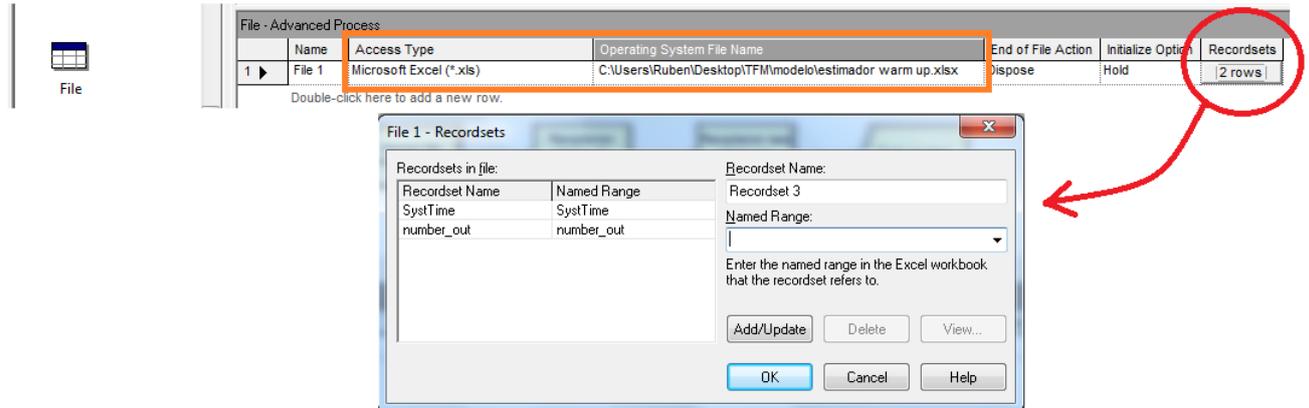


Imagen 137 - Módulo File (Arena)

El recuadro naranja hace referencia a la parte que se relaciona con el archivo *EXCEL*, haciendo referencia al propio programa y a la ruta del archivo en el ordenador, y el círculo rojo registra los nombres con los que van a estar relacionados los datos registrados en *ARENA* y los datos guardados en el archivo de datos.

- A continuación, en el fichero *EXCEL*, se nombra cada columna con la denominación que se le ha atribuido a cada registro de datos.
- Por último y tras tener la relación entre los dos programas diseñada, se programa el *Set-Up* de la simulación con una replicación lo suficientemente larga para obtener datos concluyentes y poder estimar el periodo de calentamiento, para en el modelo final poder evitar sesgos en los resultados. Importante definir el “*Warm-Up Time*” a cero.

Tras realizar estos pasos, se obtiene una tabla de datos inmensa en la cual se va a exponer a continuación, el tramo donde se ha decidido establecer el tiempo que necesita el modelo para alcanzar la estabilidad estadística.

| Tiempo sistema (Horas) | Piezas Out/Tiempo sistema |
|------------------------|---------------------------|
| 198,114332325142 | 5,27977954812136 |
| 198,320251467192 | 5,27933981655526 |
| 198,488607972315 | 5,27989999378793 |
| 198,635225186096 | 5,28103713234761 |
| 198,860816518457 | 5,28007487036816 |
| 199,045460605186 | 5,28020079837287 |
| 199,202817263166 | 5,28104980869928 |
| 199,390779818256 | 5,28108672306617 |
| 199,5473587244 | 5,28195415232584 |
| 199,725472963997 | 5,28225060300735 |
| 199,909589540267 | 5,28238791559969 |
| 200,083781004771 | 5,28278701397988 |
| 200,255650630049 | 5,28324667329634 |
| 200,405591072074 | 5,28428370852757 |
| 200,633499014769 | 5,28326528324153 |
| 200,788174074658 | 5,28417574834609 |
| 200,980696117951 | 5,28408956936211 |
| 201,161102885035 | 5,28432179359999 |
| 201,323964268302 | 5,2850141505361 |
| 201,518326371308 | 5,284879143139 |
| 201,677783479833 | 5,28565904288904 |
| 201,88937204275 | 5,28507265738617 |

Tabla 11 - estimación del Warm-Up (Excel)

El periodo de calentamiento de este modelo se va a considerar de duración **200 horas**, que es cuando se puede asegurar que el modelo alcanza gran estabilidad y además resulta coherente con la longitud de cada réplica.

- **Replication Length:** Traducido del inglés significa longitud de la replicación y se define como el tiempo que transcurre desde el inicio de la simulación hasta su punto final. En consonancia con el parámetro anterior, este debe ser lo suficientemente largo para alcanzar la estabilidad estadística y poder recoger un gran número de datos estadísticos con los que poder obtener resultados válidos.

En este modelo se ha querido simular la producción de la fábrica durante tres años, un tiempo que se cree más que suficiente para analizar el comportamiento actual de la fábrica, y además poder tener suficiente información para poder evaluar cómo cambia el comportamiento del modelo con el segundo escenario que se quiere proponer.

Para implementar este dato en el programa Arena, se ha procedido a introducirlo en días, por lo que se ha multiplicado el número de días de un año, por los tres años que se pretende simular, y al que se ha decidido redondear a **1100 días**.

- Hours Per Day: Este parámetro hace referencia a las horas que está en funcionamiento el modelo por cada día. Se trata de definir el tiempo en el que el programa está simulando y recogiendo estadísticas sobre el comportamiento del modelo.

En este trabajo, se está simulando el proceso productivo de una fábrica, que se trabaja de lunes a viernes en los tres turnos de trabajo rotativos, y además existe un cuarto turno que trabaja también los fines de semana y días festivos, también durante los turnos de mañana, tarde y noche. Por lo tanto, esto quiere decir que se trabaja durante las 24 horas del día, sin excepción, y ese es el motivo por el que se ha introducido en el número de horas al día, **24**.

- Base Time Units: Este término indica en que unidades de tiempo, el usuario necesita que el programa le muestre los resultados de la simulación.

Para este modelo de simulación se ha decidido que el programa Arena, ofrezca los resultados en **minutos**, ya que tanto los tiempos de cola, de procesos, de transportes, y demás tiempos de interés, van a tener una mayor facilidad de comprensión visual en estas unidades de tiempo, lo que va a facilitar el análisis de los propios resultados de la simulación.

- Terminating Condition: Este modelo pretende simular tres años de funcionamiento de la fábrica de manera ininterrumpida, por lo que **no se programara ninguna condición de parada**, ya que la condición para terminar la simulación es la propia longitud de la replicación.
- Number of Replications: Hoy en día existen ordenadores con una gran capacidad de cálculo, que permiten solucionar problemas estadísticos que hace un tiempo parecían irresolubles, tanto por vía manual, como por vía computacional.

Al iniciar un problema concreto de simulación, el analista siempre se enfrenta a la misma decisión de cuantas replicaciones se ha de realizar, para tener unos datos concluyentes. La respuesta óptima a esa pregunta, resultaría imposible de calcular, ya que la manera de asegurar el error mínimo es repetir la simulación infinitas veces, pero de momento ese problema computacional es irresoluble para un ordenador convencional. Por lo tanto, queda evidenciado que en la práctica es imposible trabajar con series de datos de infinitas observaciones.

Para saber cuál es número ideal de replicaciones para cada trabajo, no existe una fórmula concreta. La mayoría de escenarios se resuelven de manera intuitiva y arbitraria.

En el modelo que ocupa este Trabajo Fin de Máster, se ha tomado la decisión de realizar **5** replicaciones. Este número de replicaciones hace que la resolución de del problema de simulación por parte del programa se demore durante varios minutos, pero a su vez se consigue evidenciar la ventaja que ofrece en cuanto al efecto de la disminución del error estadístico.

Una vez que se ha rellenado todos los datos en relación al diseño de experimentos, hay que ponerle título al proyecto y nombre al analista que lo ha llevado a cabo. Para ello,

en la misma ventana de *Run Setup* se selecciona la pestaña *Project Parameters*. Tras rellenar por completo, el título del proyecto, el nombre del proyectista y una breve descripción del propio proyecto, la ventana queda de la siguiente manera.

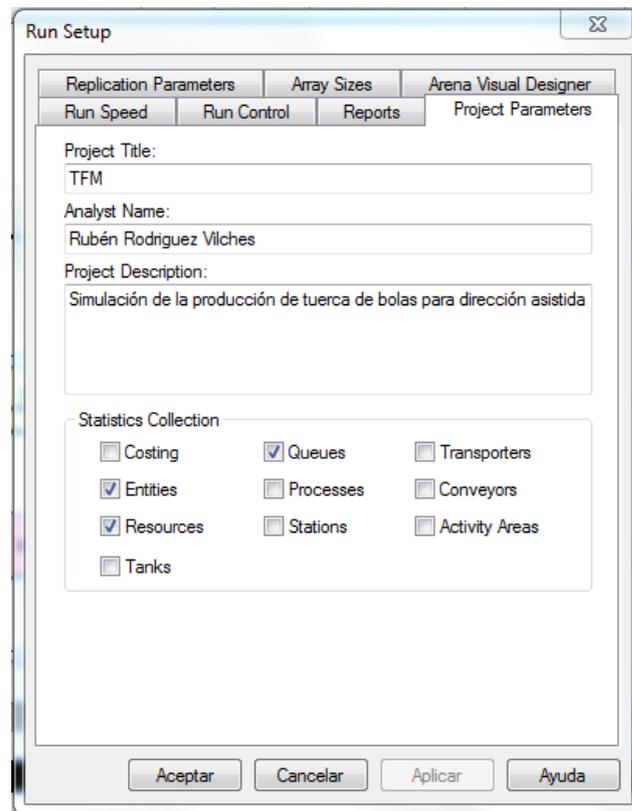


Imagen 138 - Ventana Run Setup 2 (Arena)

5.5. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE VARIANZA (TRV)

En un estudio de simulación, la eficiencia del mismo depende de dos vertientes, la **eficiencia computacional** y **eficiencia estadística**.

- La eficiencia computacional, es ajena al analista programador del modelo de simulación, ya que depende del lenguaje con el que se ha programado el programa y el código que éste utiliza.
- La eficiencia estadística la mide la varianza de los estimadores utilizados para el análisis de los resultados. Mejorar esta eficacia si está en manos del creador del modelo de simulación, para ello, es necesario reducir la varianza de un estimador sin llegar a distorsionar su esperanza, con lo que se obtiene una mayor precisión. Esto se traduce en intervalos de confianza con menor amplitud y que requieren del mismo grado de esfuerzo computacional.

Estas definiciones se traducen en que para mejorar la eficiencia de un modelo de simulación, el creador del propio modelo, debe centrarse en mejorar la eficiencia estadística, intentando reducir la varianza de los estimadores.

Los procedimientos cuyo objetivo es mejorar la eficiencia estadística, y por lo tanto, obtener una reducción de la varianza, se denominan *Técnicas de Reducción de varianza*, o también son conocidas por sus siglas *TRV*.

Es verdad, que al implementar una de las técnicas de reducción de varianza, aumenta el coste computacional, ya que para el programa a nivel cálculo le requiere un mayor esfuerzo al programarse un procedimiento adicional. Podría entenderse como que la eficiencia del sistema, queda equilibrada al mejorar una y empeorar otra, pero si bien es verdad, mejorando la eficiencia estadística, se mejora la calidad de los resultados, por lo tanto el modelo llega a ser más fiel al sistema real. De esta manera, queda en manos del analista la decisión de tener un trabajo de más calidad en perjuicio del tiempo de programación y cálculo, o tener un trabajo que pueda ser aceptable, en un menor tiempo, en cuanto a programación y tiempo de espera de resultados.

Hay varias técnicas de TRV, para este trabajo se van a poner en práctica dos de ellas.

- La primera, que ya ha aparecido en el apartado anterior, es del número de replicaciones. Este método trata de realizar n corridas independientes, es decir, se ejecuta la simulación tantas veces como replicaciones se programen. De esta manera se estima el valor de la respuesta media, reduciendo el error de los resultados que pueda dar el desarrollo de una sola corrida con algún valor anormal. Si surgiera un valor atípico, éste se vería corregido en las siguientes corridas que harían mediar dicho valor, con las $n-1$ corridas siguientes.

La realización de infinitas replicaciones reportaría un error 0, si bien es verdad y como se comentó, es inviable, y por lo tanto se trata de ajustar el número de replicaciones a las exigencias del modelo y la capacidad del ordenador que gestiona el programa.

Para este trabajo, se decide realizar 5 corridas o replicaciones, que aunque aumenta el coste computacional en cuanto al tiempo de espera de resultados, se obtienen datos con una mejor varianza estadística.

- La segunda de las técnicas que se va a aplicar, consiste en la introducción de los llamados *números aleatorios comunes*. Este método es uno de los más comunes, y se emplea generalmente cuando se quiere comparar escenarios, como es el caso de este trabajo. La base de esta técnica es la de recrear la simulación, siempre bajo las mismas condiciones experimentales, o lo que es lo mismo, preservando siempre el mismo entorno de aleatoriedad. De este modo, las diferencias observadas en los datos obtenidos, no se deben a las condiciones experimentales, sino que son producidas por la configuración del sistema. En un estudio de simulación, dicho entorno de aleatoriedad es creado de modo artificial mediante la simulación de valores o números aleatorios que se emplean en la obtención de las variables aleatorias incluidas en el modelo de simulación.

Se puede definir entonces, el uso de números aleatorios comunes, como una técnica de reducción de varianza que trata de inducir una correlación positiva entre las variables utilizando los mismos números aleatorios para simular el mismo elemento estocástico en ambas configuraciones. Este hecho se hace

posible gracias a que los generadores de números aleatorios que se emplean poseen la propiedad de la reproducibilidad.

Para poder implementar este método se necesita sincronizar el uso de los números aleatorios de todas las distintas configuraciones del sistema. Esto quiere decir que, si un número aleatorio es utilizado con un propósito en un escenario, este mismo número aleatorio ha de ser empleado con el mismo propósito en el resto de escenarios que se quieran comparar. Por ejemplo, en el caso de que el modelo tenga diferentes configuraciones, el número aleatorio que se utiliza para generar un tiempo entre llegadas, en las diferentes configuraciones se debe emplear ese mismo número aleatorio para generar también el mismo tiempo entre llegadas.

En general no suele ser suficiente con iniciar la generación de la secuencia de números aleatorios con la misma semilla en la ejecución i -ésima cada vez que se inicia la simulación. La manera de favorecer la sincronización, y por lo tanto la conseguir reducir la variabilidad, es emplear una secuencia distinta de números aleatorios para cada elemento estocástico que conforman el modelo de simulación, y que deben ser simulados.

En ciertas ocasiones, si el modelo de simulación es muy complejo, ya que tiene una gran cantidad de procesos que dependen de la aleatoriedad de la simulación, puede originar un elevado coste computacional que no compensa la reducción de varianza que entraña, ya sea porque el procesador del ordenador se ve desbordado y la simulación falla, o porque el tiempo que invierte el programa en resolver el problema es infinitamente superior al beneficio obtenido. En tal caso, se puede considerar la posibilidad de realizar sincronizaciones parciales, es decir, sincronizar únicamente ciertos elementos aleatorios del modelo. Por ejemplo, puede ser interesante sincronizar los tiempos entre llegadas de piezas, clientes, etc. Pero no así los tiempos de servicio, o tiempos de fallos.

Para llevar esta técnica al programa Arena, es necesario entender dónde se origina la aleatoriedad y por eso es bueno recordar que la generación de números aleatorios que tiene programado el software es el siguiente:

Combined multiple recursive generator (CMRG)

$$A_n = (1403580 A_{n-2} - 810728 A_{n-3}) \bmod 4294967087$$

$$B_n = (527612 B_{n-1} - 1370589 B_{n-3}) \bmod 4294944443$$

$$Z_n = (A_n - B_n) \bmod 4294967087$$

$$U_n \left\{ \begin{array}{ll} Z_n / 4294967088 & \text{si } Z_n > 0 \\ 4294967087 / 4294967088 & \text{si } Z_n = 0 \end{array} \right\}$$

Introduciendo la semilla adecuada, Arena es capaz de generar una cantidad muy elevada de números aleatorios que, son almacenados en secuencias más pequeñas llamados **streams**. El programa puede almacenar $1,8 \times 10^{19}$ streams de longitud $1,7 \times 10^{38}$ cada uno de ellos. Y a su vez, cada uno de estos streams se puede dividir en $2,3 \times 10^{15}$ secuencias más pequeñas denominadas substreams de $7,6 \times 10^{22}$ de longitud.

Arena, al inicio de cada simulación, utiliza, por razones históricas, siempre el stream 10 y es por eso que al programar la utilización de estos streams en el modelo, es imprescindible evitar la implantación de este stream 10.

La manera de implementar la técnica de números aleatorios comunes, es añadir el número de stream que se quiere utilizar, después de los parámetros de la distribución. Por ejemplo, si se está usando para generar las llegadas una distribución triangular, y se quiere sincronizar este módulo de llegadas con el stream 5, se tiene que definir de la siguiente manera: TRIA(1,3,6,**5**). El programa al leer esta indicación, siempre que arranque la simulación de un escenario, empezará a utilizar los números aleatorios que se encuentren en el stream número cinco.

A continuación se va a desgranar uno por uno, dónde se ha hecho efectivo el método de reducción de varianza, para poder conseguir una comparación de escenarios en las que la aleatoriedad esté en cierta manera controlada.

Para empezar, se ha considerado muy interesante sincronizar los módulos Decide, es decir, aquellos módulos que representan cuales son las piezas que se someten a control y cuales siguen el cauce normal del proceso, e incluso el módulo que se encarga de separar las piezas a partes iguales al entrar en la célula de rectificado exterior.

Esta sincronización entraña algo más de dificultad, ya que lo normal sería seleccionar dentro del módulo la opción, *2-way by chance* y seleccionar el porcentaje requerido en cada ocasión. Al emplear la técnica de los números aleatorios comunes, el escenario cambia radicalmente, y la programación de los sorteos se desglosa en dos partes, mediante la generación de un módulo Assign. En este módulo, se generará un atributo de nombre **num aleatorio**, el cual se definirá como una observación de la distribución UNIF(0,1) y en la cual se puede controlar la secuencia de números aleatorios para generar los valores de esta distribución uniforme entre 0 y 1. A continuación en el módulo Decide correspondiente, se elige la opción *2-way by condition*, he aquí la principal diferencia. Posteriormente se selecciona el atributo que se ha creado con este propósito de sincronizar los sorteos, y se inserta el valor que debe tener la observación para que el módulo decida si continua por la salida *True* o *False*.

En las siguientes imágenes, se va mostrar cómo se ha llevado a cabo este proceso en cada uno de los sorteos que dependen de un porcentaje y como se ha introducido el valor de un stream propio, en cada uno de los sorteos.

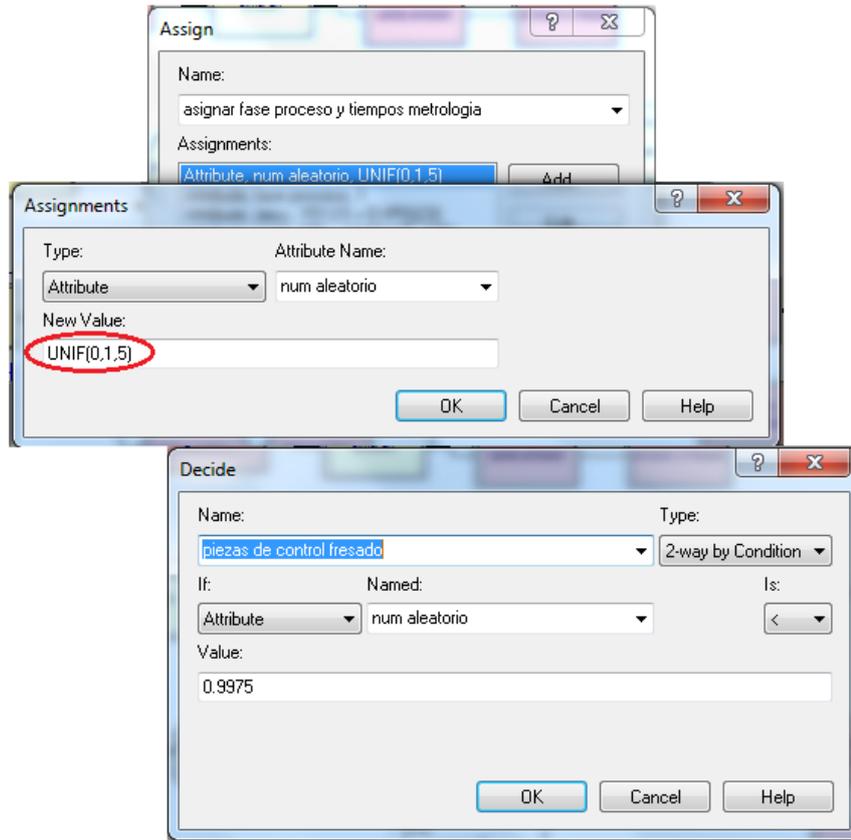


Imagen 139 - N° Aleatorios Comunes: Stream 5 (Arena)

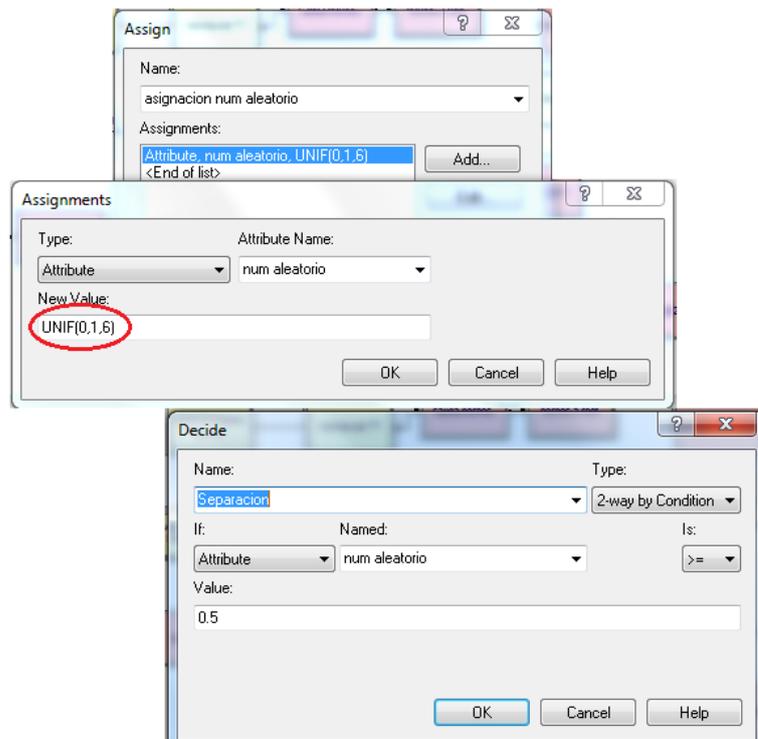


Imagen 140 - N° Aleatorios Comunes: Stream 6 (Arena)

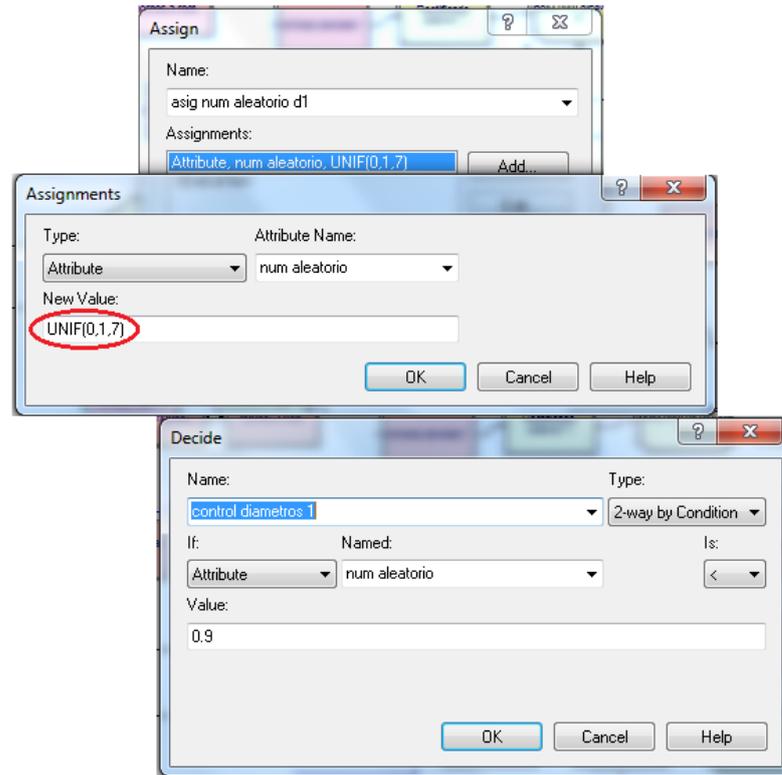


Imagen 141 - N° Aleatorios Comunes: Stream 7 (Arena)

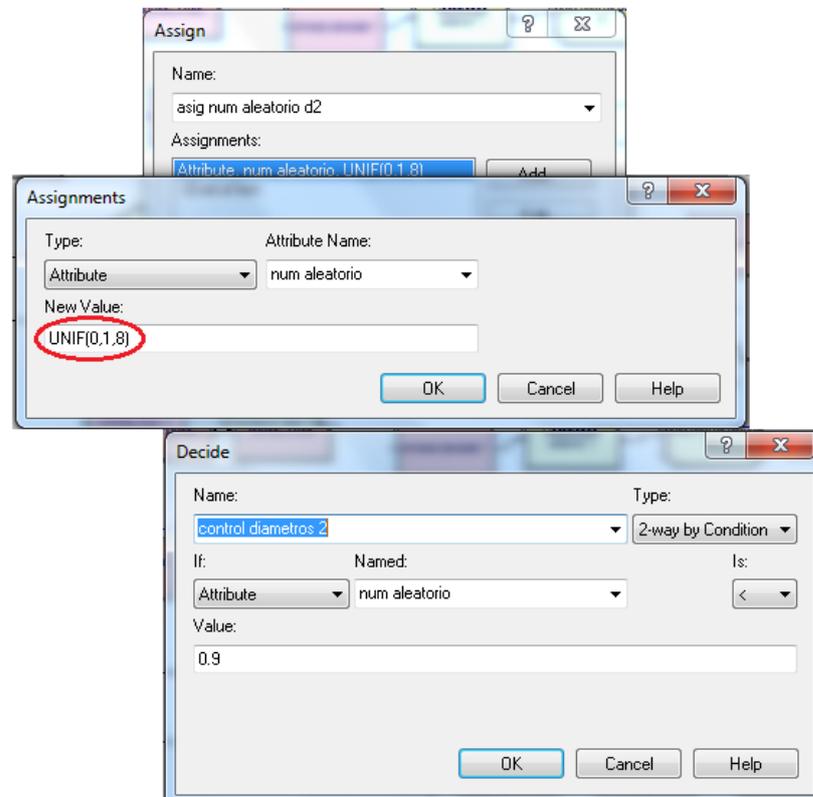


Imagen 142 - N° Aleatorios Comunes: Stream 8 (Arena)

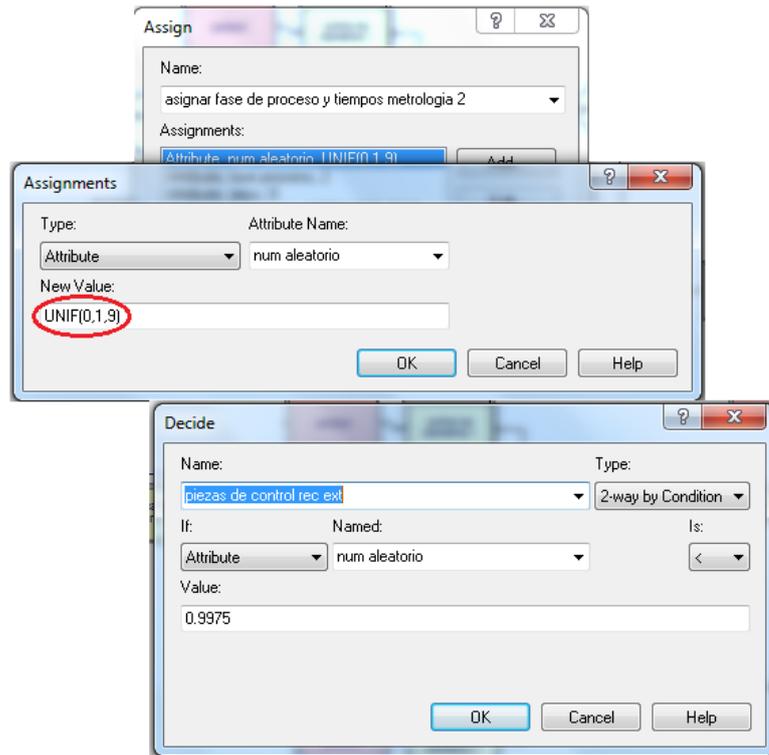


Imagen 143 - N° Aleatorios Comunes: Stream 9 (Arena)

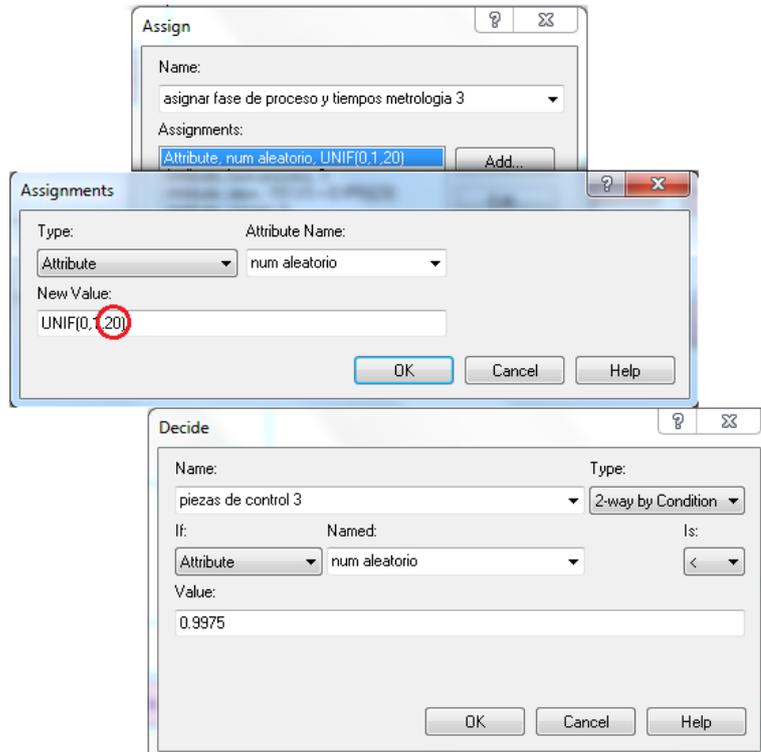


Imagen 144 - N° Aleatorios Comunes: Stream 20 (Arena)

Para el proceso de montaje, verificación y el embalaje final de los conjuntos agrupados, también se ha llevado a cabo la técnica de los números aleatorios comunes.

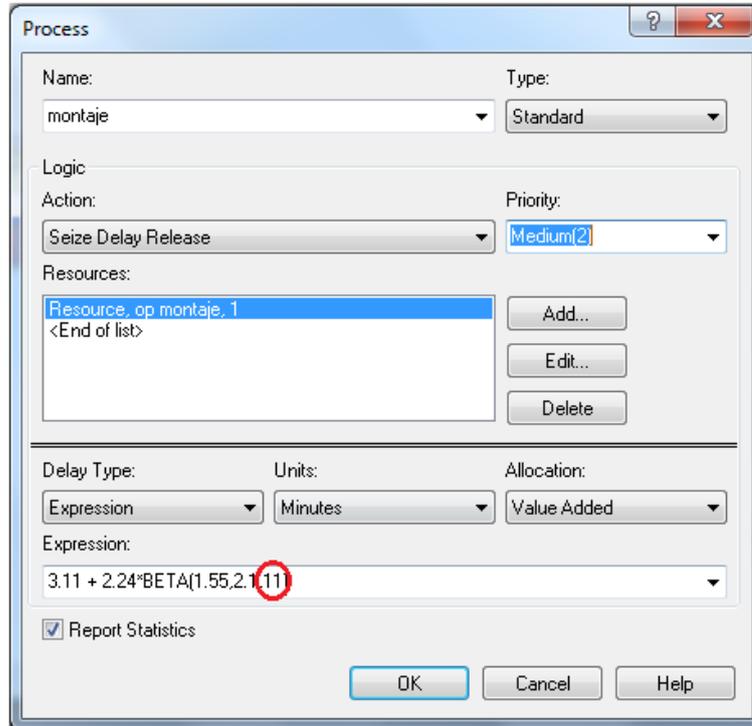


Imagen 145 - N° Aleatorios Comunes: Streams 11 (Arena)

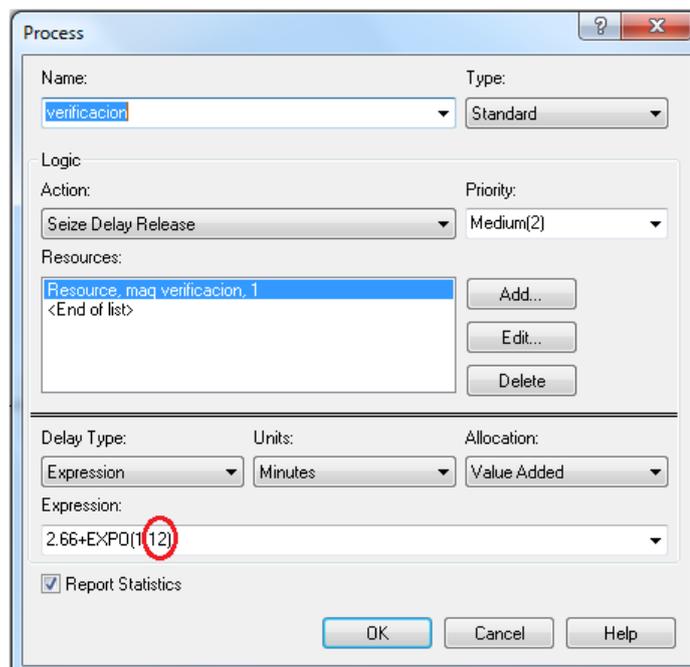


Imagen 146 - N° Aleatorios Comunes: Streams 12 (Arena)

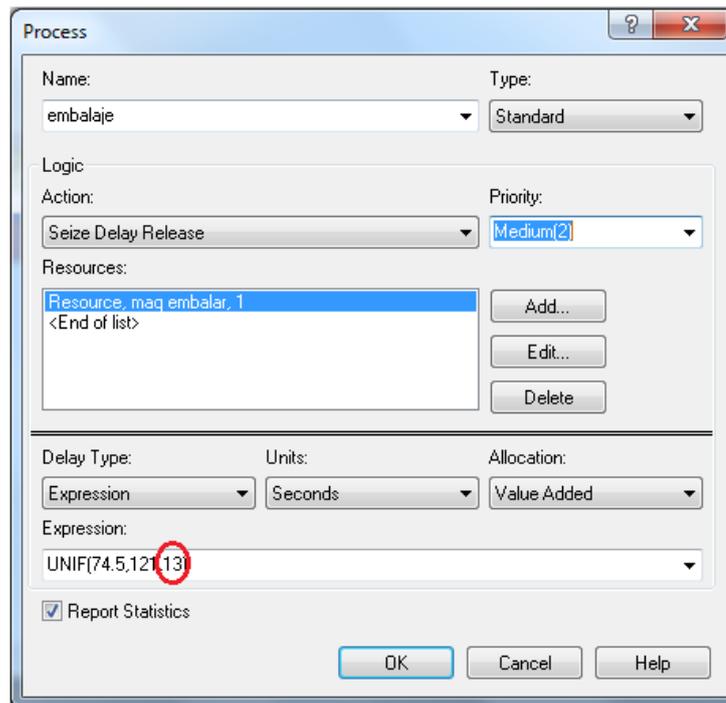


Imagen 147 - N° Aleatorios Comunes: Stream 13 (Arena)

5.6. VALIDACIÓN DEL MODELO

Con el modelo creado y enteramente definido, ahora se trata de validar este modelo. Validar un modelo de simulación significa, para el modelo de este trabajo que como se sabe está basado en un sistema real, comprobar y verificar que el comportamiento del modelo refleja fielmente el comportamiento del sistema real.

Para poder validar el modelo, existen diferentes vías o caminos. La manera más fiable es consultar con expertos en simulación y personas al cargo de la línea de producción que conozcan a la perfección cómo se comporta el sistema de la fábrica, y que ellos, gracias a su amplia experiencia y gran conocimiento de ambas áreas puedan comparar los resultados de salida y ver si son coherentes y que se ajustan los resultados del modelo con los resultados que se obtienen en la cadena de producción en la empresa.

Debido a que este trabajo, no es oficial y no se ha podido contar con la aprobación y supervisión de expertos, se va a optar por otra vía para poder validar el diseño de este modelo de simulación. Esta vía está encaminada a observar los resultados de salida de la tasa de producción anual del modelo y comparar este resultado con la tasa de producción anual que tiene la fábrica y que es un dato conocido y que se aportó al inicio del trabajo. La producción de la línea de fabricación real es de unas 345.000 piezas al año aproximadamente, contando que se fabrican más direcciones asistidas eléctricas de las que estrictamente demanda el cliente. Sabiendo este dato, se procederá a arrancar la simulación para poder obtener este dato del modelo de simulación y compararlo para poder validar el modelo y a partir de ahí, empezar a trabajar en los diferentes escenarios que se quieran proponer.

Para a arrancar la simulación existen dos maneras de hacerlo en *ARENA*, una es con animaciones, en el cual aparecen imágenes que se mueven por el modelo y que

representan las entidades, y la otra variante es sin animaciones. Teniendo en cuenta que es un modelo complejo, y de duración relativamente alta (se quiere simular 3 años), es recomendable la opción de sin animaciones, ya que con esta opción el ordenador tarda en realizar las cinco corridas alrededor de 10 minutos.

Para empezar con ello y asegurarse de que se simula sin animación, se debe ir a la barra de herramientas y seleccionar la opción “Run”, aparecerá un desplegable, en este desplegable se recorre hasta la opción “Run Control” y se verificará que el modo de no animación está seleccionado. La siguiente imagen muestra las dos opciones y se indica que opción es la que se utiliza en este trabajo.

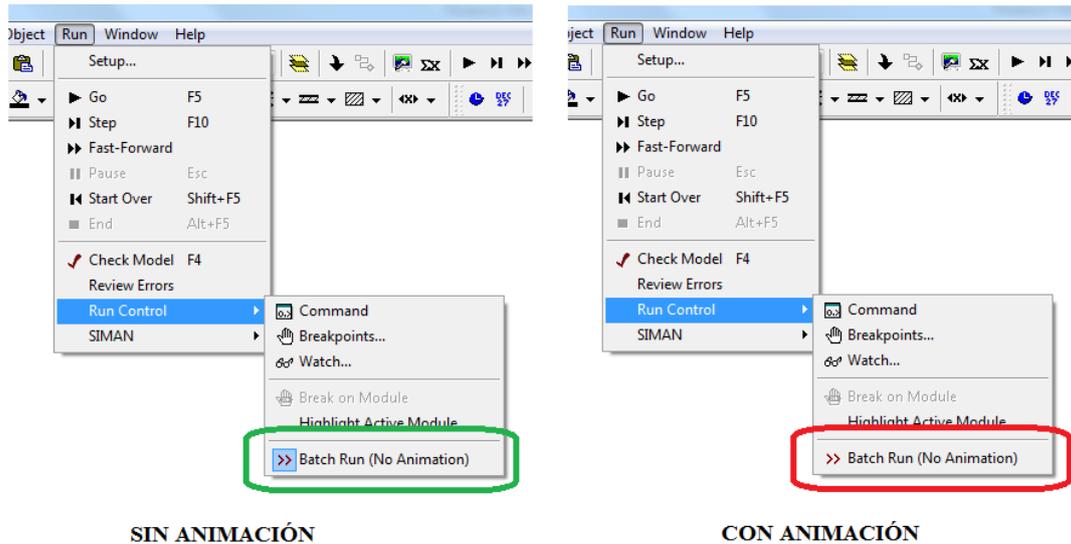


Imagen 148 - Run. Run Control (Arena)

Una vez que se está seguro de que la simulación tendrá lugar sin animaciones, se puede iniciar de dos maneras también, en este mismo panel de “Run”, pinchar donde pone “Go” o directamente en los menús de herramientas que se ven en la pantalla pulsar el botón icónico  de Play

Tras esperar el tiempo pertinente que necesita el programa realizar los cálculos de las cinco réplicas, aparece en pantalla una ventana donde te hace saber que la simulación ha terminado y además te pregunta si desea ver los resultados. Seleccionando la opción “Sí” aparece una nueva ventana con los resultados.

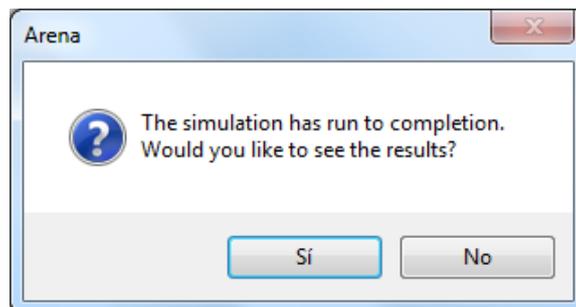


Imagen 149 - Ventana para acceder a los resultados (Arena)

Tras este paso, aparecen en pantalla los resultados de la simulación y en primera página aparece el dato que es interesante en este momento, el *Number Out* que indica el número de entidades que han salido del modelo y con el que se apoya esta técnica para poder compararlo con la tasa de producción y validar el modelo.

Este resultado de salida que aporta la simulación hay que entender que se trata del número de piezas que salen de la fábrica en lo que dura la simulación, que si se recuerda es de 3 años, por lo que si se quiere comparar la producción anual, se debe dividir este número entre 3. Realizando la operación se obtiene que el modelo tiene una producción de 130.994 conjuntos finales, que multiplicados por las 8 direcciones asistidas que componen cada conjunto y dividido entre 3, que como se ha comentado, se quiere estudiar la tasa de producción anual, se obtiene un resultado de producción anual igual a **349.317 ejes de dirección asistida al año**. Si comparamos este dato, con el que ya se tenía del sistema real se puede observar que tras la realización de 5 réplicas del modelo, la producción obtenida en la simulación varía en tan solo 4.000 unidades, por lo que se puede dictaminar que este modelo es válido y que refleja fielmente el comportamiento del sistema real.

Es conveniente volver a reiterar que para la total validación de este modelo, es conveniente la consulta y aprobación de expertos, tanto del área de la simulación, como del área de producción de la planta de fabricación de la empresa ZF-TRW situada en la comarca de Pamplona.

6. RESULTADOS ESCENARIO ACTUAL

En este punto se va a evaluar el comportamiento actual del sistema, y comprobar que el problema del estancamiento en la entrada de a fase de montaje que se comentaba en el inicio, también se evidencia en la simulación. Además también se destacarán resultados que puedan tener un cierto interés para estudiar nuevos escenarios de mejora.

Para ello se arranca la simulación con el fin de obtener los resultados que ofrece el programa. En esta nueva ventana, el programa ofrece a la izquierda un menú formado por varios despegables, los cuales hacen más cómoda la navegación y búsqueda de datos concretos. En este caso, para tener más accesibilidad a los resultados lo mejor es guardar estos resultados, bien en un archivo Word o en un archivo en formato PDF. Para llevar a cabo este procedimiento, en la parte superior de los resultados existe un símbolo con el cual se puede exportar los resultados.  Seleccionando este símbolo se abrirá una nueva ventana de diálogo en el cual  pregunta donde quiere usted guardar los resultados y el formato.

(En los anexos se aportará el informe completo en formato PDF, tanto de esta simulación, como de los siguientes escenarios que se lleguen a evaluar).

El primer dato que aporta la simulación es el número total de entidades que han llegado a completar la línea de producción y han conseguido terminar en el módulo *Dispose*. El programa ofrece una media, que corresponde, a la media de las cinco replicaciones que se han realizado del modelo.

Este dato, ya se ha dado a conocer antes y corresponde al número total de paquetes que salen del almacén, pero cabe recordar, que cada paquete está formado por 8 conjuntos de dirección asistida, lo que hace un total de **130.994** direcciones asistidas eléctricas en tres años, unas **349.320 al año**.

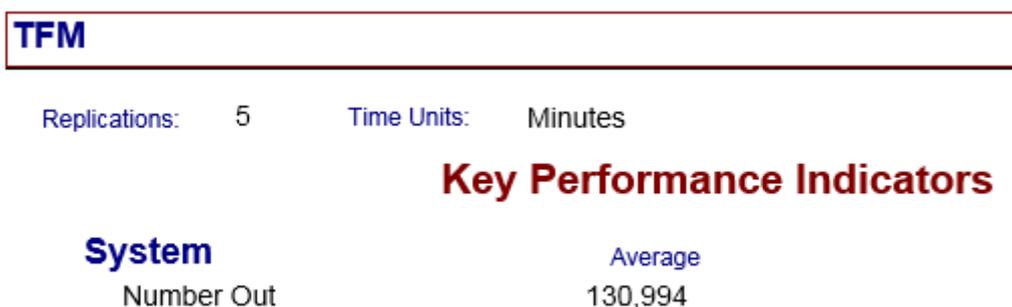


Imagen 150 - Resultados. Number Out (Arena)

Se puede ver en esta imagen, que todos los tiempos que se van a mostrar a continuación están expresados en minutos, que si se recuerda en el *Set-Up* ya se modificó este dato para que sucediera de esta manera. Asimismo, las salidas incluyen una estimación del valor medio con un nivel de confianza al 95% y los valores mínimos y máximos. Para calcular los intervalos de confianza, el programa divide la ejecución en grupos calculando en cada uno de ellos un dato. En ocasiones, el programa no puede ofrecer este intervalo, por dos motivos, o porque no hay suficientes datos (“Insufficient”) o porque los datos, de haber suficientes, muestran correlación (“Correlated”).

Como se ha comentado, los resultados vienen desgranados en apartados, por lo que a continuación se detallarán también por grupos.

- **ENTIDADES (ENTITIES):** Respecto a las entidades hay dos datos que llaman la atención o son importantes de analizar. El primero de ellos es el “Wait Time”, que es el tiempo que las entidades están en el sistema esperando para ser atendidos por un recurso libre.

| Wait Time | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|-------------------|----------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| conjuntos finales | 19217.86 | 26,44 | 19200.57 | 19252.79 | 547.79 | 57660.53 |

Imagen 151 - Resultados. Wait Time (Arena)

Como se puede ver en la imagen las entidades están esperando por un recurso una media de 19.217 minutos con intervalo de 26,44 minutos. Es decir la media de horas de espera de una entidad para ser atendida por un recurso es de **320±0,43 horas**.

El otro dato, es el de piezas en proceso en el sistema, que ARENA lo denomina como “WIP”.

| WIP | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|--------------------|---------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| Caja tuercas | 21.2654 | 0,03 | 21.2325 | 21.2946 | 0.00 | 144.00 |
| carretilla tuercas | 2.3635 | 0,01 | 2.3578 | 2.3695 | 0.00 | 18.0000 |
| conjuntos finales | 0.3968 | 0,00 | 0.3966 | 0.3969 | 0.00 | 4.0000 |
| pales tuercas | 0.1503 | 0,00 | 0.1499 | 0.1505 | 0.00 | 22.0000 |
| Tuercas | 1692.46 | 2,20 | 1691.03 | 1695.38 | 0.00 | 3864.00 |

Imagen 152 - Resultados. WIP (Arena)

En la imagen se pueden ver la cantidad de cada entidad que existe en el modelo de simulación en un mismo instante, expresada en una media y con sus intervalos máximos y mínimos. Este dato, y todos los que se destacan en este apartado, servirán para realizar la comparación de los diferentes escenarios que se creen.

- **COLAS (QUEUE):** Este punto se va a dedicar a desgranar con más detalle la información del apartado anterior del tiempo en espera. Ofrece un detalle con todas las colas que existen programadas en el modelo y aporta los tiempos medios de espera en cada una de las colas y el número de piezas medio que hay esperando en cada una también. Las imágenes que vienen a continuación destacan los puntos de interés que se han observado de estos apartados.

“Waiting Time”

| Queue | | | | | | |
|----------------------------------|---------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| Time | | | | | | |
| Waiting Time | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
| entrada montaje.Queue | 1632.17 | 1,73 | 1630.82 | 1634.24 | 0.00 | 3928.38 |
| area de espera hornos.Queue | 401.10 | 1,40 | 399.93 | 402.46 | 0.00 | 1085.43 |
| area espera entrada celula.Queue | 181.54 | 0,32 | 181.33 | 181.86 | 0.00 | 678.45 |

Imagen 153 - Resultados. Waiting Time (Arena)

“Number waiting”

| Queue | | | | | | |
|----------------------------------|---------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| Other | | | | | | |
| Number Waiting | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
| entrada montaje.Queue | 1087.74 | 1,12 | 1086.88 | 1089.15 | 0.00 | 2900.00 |
| area de espera hornos.Queue | 1.4863 | 0,01 | 1.4817 | 1.4912 | 0.00 | 15.0000 |
| area espera entrada celula.Queue | 4.0354 | 0,01 | 4.0307 | 4.0427 | 0.00 | 95.0000 |

Imagen 154 - Resultados. Number waiting (Arena)

Puede observarse, que en la relación de los dos resultados, se observa que el tiempo de espera en montaje si es preocupante, ya que es muy elevado y además el número de tuercas en espera también lo es, por lo que se confirma el comportamiento que tiene el sistema real, en el que se tiene un cuello de botella en la producción.

Por otro lado, los otros procesos, sí que destacan sus tiempos de espera, pero a su vez, e número de cajas que están en espera, no es tan significativo, y por lo tanto, no se genera una gran cola en cuanto a número de piezas en espera.

- RECURSOS (RESOURCES): Esta parte de os resultados analiza los recursos de las máquinas y operarios que trabajan la fábrica.
- *Number Busy (B(t))*: Reporta las unidades de recurso ocupadas. El promedio se calcula como un promedio ponderado, considerando el valor como una función del tiempo.

| Number Busy | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|--------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| DRAKE fresadora | 0.2112 | 0,00 | 0.2112 | 0.2112 | 0.00 | 3.0000 |
| DRAKE rect int | 0.1777 | 0,00 | 0.1776 | 0.1778 | 0.00 | 5.0000 |
| Hornos | 0.4444 | 0,00 | 0.4442 | 0.4445 | 0.00 | 2.0000 |
| impresora laser 1 | 0.01221685 | 0,00 | 0.01220361 | 0.01223314 | 0.00 | 1.0000 |
| impresora laser 2 | 0.01221910 | 0,00 | 0.01220487 | 0.01223570 | 0.00 | 1.0000 |
| maq embalar | 0.1357 | 0,00 | 0.1356 | 0.1358 | 0.00 | 1.0000 |
| maq tridimensional | 0.08574272 | 0,00 | 0.08452490 | 0.08666557 | 0.00 | 2.0000 |
| maq verificacion | 2.4393 | 0,00 | 2.4390 | 2.4399 | 0.00 | 3.0000 |
| op montaje | 2.7079 | 0,00 | 2.7074 | 2.7085 | 0.00 | 3.0000 |
| perfilometro | 0.03683697 | 0,00 | 0.03629259 | 0.03722162 | 0.00 | 1.0000 |
| Rect Danobat 1 | 0.03331869 | 0,00 | 0.03328257 | 0.03336310 | 0.00 | 1.0000 |
| Rect Danobat 2 | 0.03332482 | 0,00 | 0.03328601 | 0.03337010 | 0.00 | 1.0000 |
| rogosimetro int | 0.02328137 | 0,00 | 0.02297055 | 0.02350247 | 0.00 | 1.0000 |
| rugosimetro ext | 0.00708256 | 0,00 | 0.00693252 | 0.00730679 | 0.00 | 1.0000 |
| util medicion | 0.1360 | 0,00 | 0.1351 | 0.1367 | 0.00 | 1.0000 |

Imagen 155 - Resultados. Number Busy (Arena)

- *Number Scheduled (M(t))*: Reporta el número de unidades de recursos programados. Este promedio se pondera considerando el valor de unidades programadas como una función del tiempo ($M(t)$). Si la capacidad es fija, como lo es en los casos de la fase de montaje, verificación y embalaje, el valor es constante.

| Number Scheduled | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|--------------------|---------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| DRAKE fresadora | 2.1820 | 0,00 | 2.1820 | 2.1820 | 0.00 | 3.0000 |
| DRAKE rect int | 3.6366 | 0,00 | 3.6366 | 3.6366 | 0.00 | 5.0000 |
| Hornos | 1.5314 | 0,00 | 1.5314 | 1.5315 | 1.0000 | 2.0000 |
| impresora laser 1 | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |
| impresora laser 2 | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |
| maq embalar | 2.0000 | 0,00 | 2.0000 | 2.0000 | 2.0000 | 2.0000 |
| maq tridimensional | 1.4546 | 0,00 | 1.4546 | 1.4546 | 0.00 | 2.0000 |
| maq verificacion | 3.0000 | 0,00 | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 |
| op montaje | 3.0000 | 0,00 | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 |
| perfilometro | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |
| Rect Danobat 1 | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |
| Rect Danobat 2 | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |
| rogosimetro int | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |
| rugosimetro ext | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |
| util medicion | 0.7273 | 0,00 | 0.7273 | 0.7273 | 0.00 | 1.0000 |

Imagen 156 - Resultados. Number Scheduled (Arena)

- *Instantaneous Utilization (U(t))*: Es la utilización en un instante particular. Se calcula dividiendo el número de unidades de recurso ocupadas entre el número de unidades de recurso programadas ($Number\ Busy / Number\ Scheduled$). Siendo $U(t) = B(t) / M(t)$ siempre y cuando $M(t) > 0$, y $U(t)$ será 0 cuando $M(t) = 0$.

| Instantaneous Utilization | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|---------------------------|-----------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| | DRAKE fresadora | 0.07039229 | 0,00 | 0.07039213 | 0.07039253 | 0.00 |
| DRAKE rect int | 0.03554570 | 0,00 | 0.03553283 | 0.03555708 | 0.00 | 1.0000 |
| Hornos | 0.2846 | 0,00 | 0.2843 | 0.2849 | 0.00 | 1.0000 |
| impresora laser 1 | 0.01221685 | 0,00 | 0.01220361 | 0.01223314 | 0.00 | 1.0000 |
| impresora laser 2 | 0.01221910 | 0,00 | 0.01220487 | 0.01223570 | 0.00 | 1.0000 |
| maq embalar | 0.06785194 | 0,00 | 0.06780414 | 0.06788793 | 0.00 | 0.5000 |
| maq tridimensional | 0.04288488 | 0,00 | 0.04227506 | 0.04334765 | 0.00 | 1.0000 |
| maq verificacion | 0.8131 | 0,00 | 0.8130 | 0.8133 | 0.00 | 1.0000 |
| op montaje | 0.9026 | 0,00 | 0.9025 | 0.9028 | 0.00 | 1.0000 |
| perfilometro | 0.03683697 | 0,00 | 0.03629259 | 0.03722162 | 0.00 | 1.0000 |
| Rect Danobat 1 | 0.03331869 | 0,00 | 0.03328257 | 0.03336310 | 0.00 | 1.0000 |
| Rect Danobat 2 | 0.03332482 | 0,00 | 0.03328601 | 0.03337010 | 0.00 | 1.0000 |
| rogosimetro int | 0.02328137 | 0,00 | 0.02297055 | 0.02350247 | 0.00 | 1.0000 |
| rugosimetro ext | 0.00708256 | 0,00 | 0.00693252 | 0.00730679 | 0.00 | 1.0000 |
| util medicion | 0.1360 | 0,00 | 0.1351 | 0.1367 | 0.00 | 1.0000 |

Imagen 157 - Resultados. Instantaneous Utilization (Arena)

A parte de estos tres resultados, en lo que concierne a los recursos también aporta el *Scheduled Utilization*, muy similar al anterior pero que reporta la utilización promedio acumulativa sobre el periodo de tiempo que el recurso estuvo programado. Es decir, indica el tiempo que el recurso estuvo ocupado mientras estaba programado. Este valor será igual a *Instantaneous utilization*, si la capacidad del recurso se mantiene constante. Estos datos vienen acompañados de una gráfica explicativa, que lo hace más visual.

| Scheduled Utilization | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average |
|-----------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| DRAKE fresadora | 0.0968 | 0,00 | 0.0968 | 0.0968 |
| DRAKE rect int | 0.04886827 | 0,00 | 0.04884996 | 0.04888355 |
| Hornos | 0.2902 | 0,00 | 0.2901 | 0.2902 |
| impresora laser 1 | 0.01679689 | 0,00 | 0.01677868 | 0.01681928 |
| impresora laser 2 | 0.01679998 | 0,00 | 0.01678041 | 0.01682281 |
| maq embalar | 0.06785194 | 0,00 | 0.06780414 | 0.06788793 |
| maq tridimensional | 0.05894622 | 0,00 | 0.05810870 | 0.05958047 |
| maq verificacion | 0.8131 | 0,00 | 0.8130 | 0.8133 |
| op montaje | 0.9026 | 0,00 | 0.9025 | 0.9028 |
| perfilometro | 0.05064956 | 0,00 | 0.04990074 | 0.05117842 |
| Rect Danobat 1 | 0.04580970 | 0,00 | 0.04576004 | 0.04587077 |
| Rect Danobat 2 | 0.04581813 | 0,00 | 0.04576476 | 0.04588039 |
| rogosimetro int | 0.03201114 | 0,00 | 0.03158371 | 0.03231508 |
| rugosimetro ext | 0.00973787 | 0,00 | 0.00953161 | 0.01004615 |
| util medicion | 0.1870 | 0,00 | 0.1857 | 0.1879 |

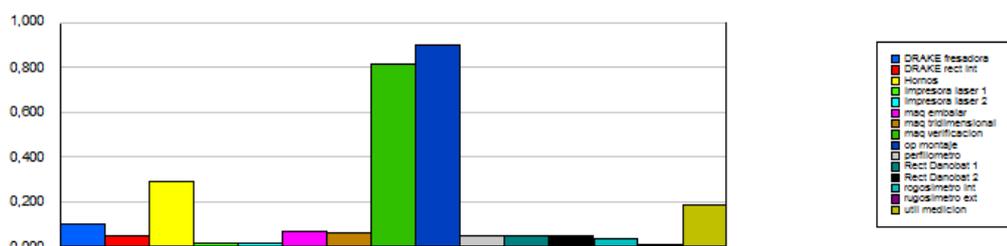


Imagen 158 - Resultados. Scheduled Utilization (Arena)

- **INTERVALO DE TIEMPO (INTERVAL):** Por último y para acabar con este análisis de los resultados obtenidos en esta simulación, que recrea el sistema real actual en la empresa, se debe recordar que al inicio del modelo se programó un

módulo *Assign* para asignar a las entidades un atributo con el que medir el tiempo que permanecían dentro de la fábrica. El valor de ese atributo se recoge en el módulo *Record* que se colocó al final del modelo y el resultado lo ofrece Arena al final del fichero de resultados con el nombre de “User Specified” – “Tally” – “Interval”.

En él, puede verse que el tiempo medio que pasa una tuerca de bolas, desde que llega al muelle de llegadas y es descargada del camión, hasta que finaliza todo el proceso de mecanizado, montaje, verificación, embalaje y es llevada al área de carga de camiones de salida es de **2.825,22 ± 3,23 minutos**, que equivalen a unas **47 horas**.

| User Specified | | | | | | |
|-------------------------|---------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| Tally | | | | | | |
| Interval | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
| tiempo de proceso total | 2825.22 | 3.29 | 2823.00 | 2829.71 | 217.36 | 8517.76 |

Imagen 159 - Resultados. Interval (Arena)

7. EVALUACIÓN NUEVO ESCENARIO

Uno de los objetivos clave de la simulación de procesos industriales, como bien se citó en el primer apartado de este trabajo, es el conocimiento del comportamiento del sistema, para poder proponer nuevos escenarios de mejora. Llevando este objetivo al trabajo que ocupa este TFM, se quiere proponer un escenario en el que se consiga aliviar el cuello de botella que se produce en la producción en la fase de entrada al proceso de montaje, así como alcanzar la nueva meta de producción anual de 400.000 entidades anuales.

El escenario que se propone, es aumentar la capacidad de operarios de la fase de montaje, de 3 a **4 operarios**, así como aumentar en una máquina de verificación más, para evitar que se genere una nueva congestión en esta área. Este nuevo trabajador y la máquina, se proponer con el fin de trabajar durante lunes a domingo en los tres turnos, es decir, se valoraría la contratación de 3 operarios más de lunes a viernes, y otros 3 los fines de semana, en total, 6 trabajadores más. En lo que se refiere a implantar esta nueva mejora en el modelo, se entenderá que únicamente se aumenta la capacidad en un operario de montaje más.

Llevando estos datos al modelo en el panel de “*BASIC PROCESS*”, se selecciona el módulo de datos que tiene que ver con los recursos, “*Resource*” y se aumenta la capacidad de ambos recursos, “*maq verificación*” y “*op montaje*”.

| | | | |
|----|------------------|----------------|---|
| 13 | maq embalar | Fixed Capacity | 2 |
| 14 | maq verificacion | Fixed Capacity | 4 |
| 15 | op montaje | Fixed Capacity | 4 |

Imagen 160 - Módulo Resource. Aumento capacidad (Arena)

Además de esta modificación también es necesaria la contratación de más materia prima, es decir, aumentar la cantidad de palés por llegada. Esta modificación responde a poder tener en almacén piezas suficientes como para satisfacer la nueva demanda del cliente. Si se recuerda, con la actual cuota de palés por llegada, se conseguía un índice de tuercas llegadas a la fábrica por año de unas 356.000, que eran suficientes para el objetivo anterior. Con esta nueva meta de producción se necesita aumentar esta cantidad, y por lo que se decide aumentar en el modelo la cantidad de entidades de palés por llegada de 7 a **9**, las llegadas de los lunes, y de 7 a **8** las llegadas de los jueves. De esta manera la suma total anual de las tuercas que llegan es de **432.480 tuercas anuales llegan al almacén**.

Esta programación en el modelo de simulación es muy sencillo, basta con abrir los módulos *Create* y aumentar las entidades por llegada en cada caso.

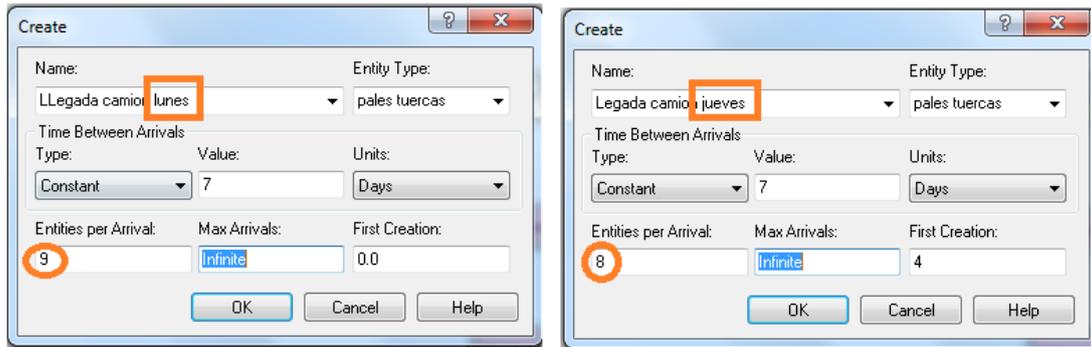


Imagen 161 - Módulos Create. Cambio llegadas (Arena)

Tras realizar las modificaciones, se arranca la simulación y se obtienen los resultados de este nuevo escenario. Estos resultados pueden ser consultados en su totalidad en los anexos a la memoria y a continuación se efectuará la comparación de los resultados más significativos de este nuevo escenario, con el comportamiento que tiene el modelo de simulación que representa el sistema real actual.

En primer lugar, lo primero que se puede observar cuando aparecen los resultados es el número de piezas que salen del modelo.

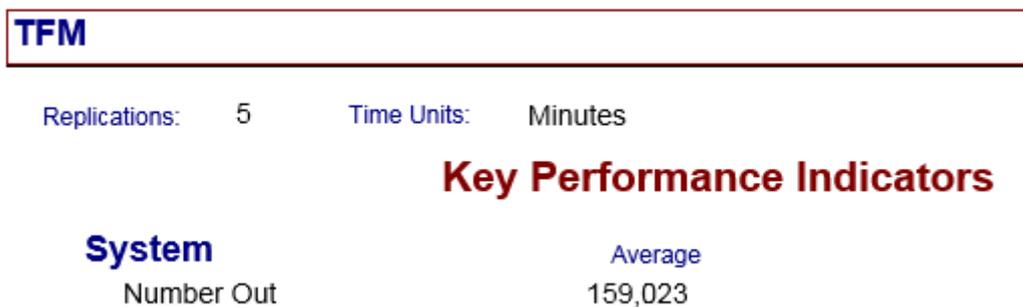


Imagen 162 - Resultados. Number Out 2 (Arena)

Puede verse que el número ya es mayor que el anterior dato que se tenía, pero la clave está en saber si es suficiente como para cumplir con la nueva tasa de producción que se va a requerir. Para ello, e igual que se ha hecho anteriormente, hay que multiplicar este número por 8 ejes de dirección asistida que contiene cada paquete final, y dividirlo entre los 3 años de simulación del modelo. El resultado es de unas 424.000 direcciones anuales, por lo que se alcanza el nuevo objetivo demandado por el cliente, y además se tiene un margen de error bastante amplio con el que poder contar siempre que hiciera falta.

Tras obtener un resultado satisfactorio en relación a la producción, se van a ir analizando igual que en el apartado anterior, los diferentes resultados obtenidos en esta simulación con ARENA de este nuevo modelo, apartado por apartado.

- **ENTIDADES (ENTITIES):** Se va a focalizar el estudio en un resultado, el “WIP”, para poder ver el número de piezas en proceso medio.

ESCENARIO ACTUAL

| WIP | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|--------------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| | Caja tuercas | 21.2654 | 0,03 | 21.2325 | 21.2946 | 0.00 |
| carretilla tuercas | 2.3635 | 0,01 | 2.3578 | 2.3695 | 0.00 | 18.0000 |
| conjuntos finales | 0.3968 | 0,00 | 0.3966 | 0.3969 | 0.00 | 4.0000 |
| pales tuercas | 0.1503 | 0,00 | 0.1499 | 0.1505 | 0.00 | 22.0000 |
| Tuercas | 1692.46 | 2,20 | 1691.03 | 1695.38 | 0.00 | 3864.00 |

NUEVA PROPUESTA

| WIP | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|--------------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| | Caja tuercas | 29.2640 | 0,02 | 29.2535 | 29.2871 | 0.00 |
| carretilla tuercas | 3.3053 | 0,00 | 3.3038 | 3.3077 | 0.00 | 22.0000 |
| conjuntos finales | 0.4799 | 0,00 | 0.4797 | 0.4800 | 0.00 | 6.0000 |
| pales tuercas | 0.1896 | 0,00 | 0.1891 | 0.1900 | 0.00 | 24.0000 |
| Tuercas | 1747.30 | 0,91 | 1746.13 | 1747.95 | 0.00 | 4240.00 |

Imagen 163 - Resultados. Comporación WIP (Arena)

Se puede observar como el número de entidades del tipo “Caja tuercas”, “Carretilla tuercas”, “conjuntos finales” y “pales tuercas” aumenta en el nuevo escenario, mientras que el número de entidades del tipo “Tuercas” disminuye. Esto es indicativo, en primer lugar, de que la producción ha aumentado considerablemente. Y otra lectura que puede tener, que más adelante se podrá esclarecer, es que al reducir el tiempo en cola a la entrada del montaje, se reducen en cierta medida las entidades que permanecen en el modelo, y por lo tanto se generan más del resto de entidades, y decrece el número de tuercas.

- COLAS (QUEUE): Igualmente, se va a ofrecer una comparativa tanto del “Waiting Time” como del “Number Waiting” de los puntos clave donde antes existían tiempos elevados de espera.

“Waiting Time”

| Queue | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------------|---------|------------|----------------------------------|---------|------------|
| Time | <u>Escenario Actual</u> | | | <u>Nueva propuesta</u> | | |
| | Waiting Time | Average | Half Width | Waiting Time | Average | Half Width |
| entrada montaje.Queue | 1632.17 | 1,73 | | entrada montaje.Queue | 1173.37 | 0,84 |
| area de espera hornos.Queue | 401.10 | 1,40 | | area de espera hornos.Queue | 498.12 | 0,39 |
| area espera entrada celula.Queue | 181.54 | 0,32 | | area espera entrada celula.Queue | 229.28 | 0,27 |

Imagen 164 - Resultados. Comparación Waiting Time (Arena)

El alivio en la entrada a la fase de montaje es considerable, ya que baja en casi **500 minutos**, una eficiencia de tiempo en torno a **8 horas**. Es decir, si antes las tuercas esperaban en esta área durante $27 \pm 0,03$ horas, ahora apenas están de

media unas **19,5±0,01 horas**, no llegando a sobrepasar la barrera del día en espera.

A su vez, también es de reseñar que las otras dos colas aumentan, pero teniendo en cuenta que se trata de las dos primeras fases de la producción y que también están entrando más piezas a la fábrica, es lógico que haya una carga mayor de trabajo en estas áreas, aunque hay que valorar también si el número de piezas que esperan en estas dos colas también aumenta considerablemente.

“Number Waiting”

| Queue | | | | | |
|----------------------------------|---------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|------------|
| Other | | <u>ESCENARIO ACTUAL</u> | | <u>NUEVA PROPUESTA</u> | |
| Number Waiting | Average | Half Width | Number Waiting | Average | Half Width |
| entrada montaje.Queue | 1087.74 | 1,12 | entrada montaje.Queue | 949.48 | 0,54 |
| area de espera hornos.Queue | 1.4863 | 0,01 | area de espera hornos.Queue | 2.2413 | 0,00 |
| area espera entrada celula.Queue | 4.0354 | 0,01 | area espera entrada celula.Queue | 6.1887 | 0,01 |

Imagen 165 - Resultados. Comparación Number Waiting(Arena)

Al igual que ocurre con el tiempo en cola, el número de tuercas en cola también disminuye en la entrada al montaje, y en los otros casos apenas aumenta el número de cajas a la espera de ser procesadas, salvo en la entrada a la célula de fresado, pero como se ha comentado antes, es asumible este aumento, puesto que las llegadas de material han aumentado, y por tanto a carga de trabajo también.

- **RECURSOS (RESOURCE):** Se va a exponer a tabla que más conclusiones puede ofrecer, junto con su gráfica correspondiente, para posteriormente realizar una valoración y comparar con el escenario actual.

| Scheduled Utilization | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average |
|-----------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| DRAKE fresadora | 0.1175 | 0,00 | 0.1175 | 0.1175 |
| DRAKE rect int | 0.05934537 | 0,00 | 0.05932821 | 0.05937002 |
| Hornos | 0.3526 | 0,00 | 0.3525 | 0.3528 |
| impresora laser 1 | 0.02039729 | 0,00 | 0.02037101 | 0.02041536 |
| impresora laser 2 | 0.02040246 | 0,00 | 0.02038721 | 0.02042361 |
| maq embalar | 0.08238118 | 0,00 | 0.08232794 | 0.08240882 |
| maq tridimensional | 0.07149918 | 0,00 | 0.07055951 | 0.07202910 |
| maq verificacion | 0.7403 | 0,00 | 0.7401 | 0.7405 |
| op montaje | 0.8218 | 0,00 | 0.8217 | 0.8220 |
| perfilometro | 0.06140073 | 0,00 | 0.06054719 | 0.06185277 |
| Rect Danobat 1 | 0.05562897 | 0,00 | 0.05555730 | 0.05567827 |
| Rect Danobat 2 | 0.05564307 | 0,00 | 0.05560147 | 0.05570074 |
| rogosimetro int | 0.03881843 | 0,00 | 0.03832360 | 0.03909110 |
| rogosimetro ext | 0.01183237 | 0,00 | 0.01163787 | 0.01218677 |
| util medicion | 0.2269 | 0,00 | 0.2255 | 0.2281 |

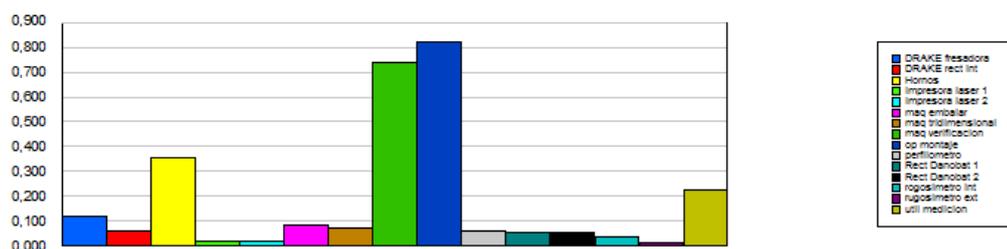


Imagen 165 - Resultados. Scheduled Utilization 2(Arena)

Si se centra la atención en el recurso que representa a los operarios de la fase de montaje, se puede ver como ahora tienen una tasa de ocupación algo más relajada, un **82 %**, comparando este dato con los resultados de la anterior simulación del modelo que representaba el sistema real, se puede observar un ligero desahogo, rebajando la anterior tasa del **90%** en unos 8 puntos. Este dato también hacía indicar que el proceso se encontraba muy colapsado, y ante cualquier fallo o parada de la producción en esta fase, puede conllevar a que los responsables de la planta paren la producción de toda la línea, pudiendo ocasionar retrasos en los pedidos.

Dentro de este apartado merece la pena destacar el que ARENA llama “*Total Number Seized*”, que representa la media de las cinco réplicas que realiza la simulación del número total de entidades procesadas por cada recurso.

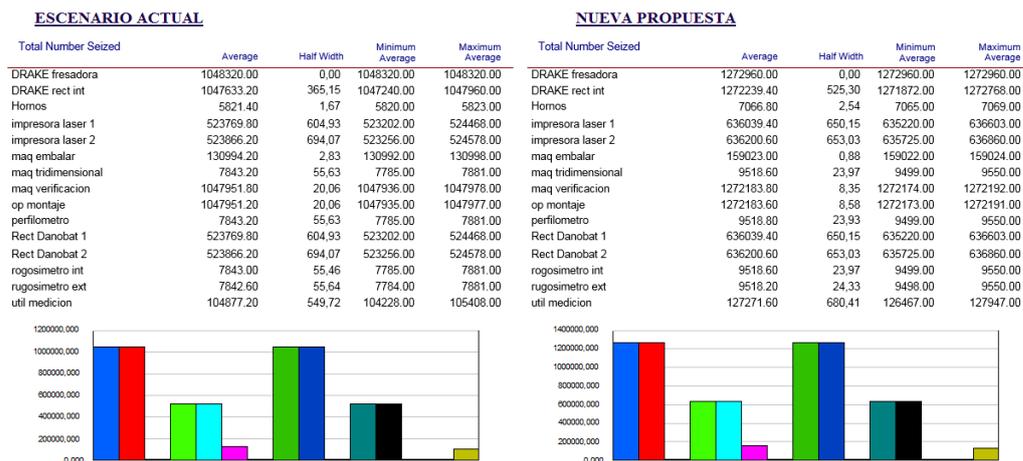


Imagen 166 - Resultados. Comparación Total Number Seized (Arena)

Se puede apreciar como el número de entidades procesadas es proporcionalmente mayor en la nueva propuesta de mejora, lo que garantiza una mayor producción y poder llegar a la nueva demanda de conjuntos de dirección asistida.

- **INTERVALO DE TIEMPO (INTERVAL):** Esta medida de tiempo se obtiene gracias al atributo que se diseñó con tal propósito. A continuación se va a exponer el nuevo registro que se ha obtenido en el nuevo modelo, y posteriormente se comparará y se verá si existe una mejora significativa.

User Specified

Tally

| Interval | Average | Half Width | Minimum Average | Maximum Average | Minimum Value | Maximum Value |
|-------------------------|---------|------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| tiempo de proceso total | 2498.01 | 1,18 | 2496.92 | 2498.93 | 214.69 | 8433.35 |

Imagen 167 - Resultados. Time Interval 2 (Arena)

En esta nueva propuesta las entidades pasan de media en la cadena de producción unas **41,6±0,02 horas**, frente a **47±0,05 horas** que pasan las entidades con el formato actual del sistema. Puede verse que el ahorro casi corresponde con el ahorro que tienen las entidades en el tiempo de espera para entrar a la fase de montaje, por lo que es una buena noticia ver que repercute en el tiempo de proceso total, el nuevo estado de la cola que da entrada al proceso de montaje.

Resumiendo, esta nueva propuesta de mejora consigue su objetivo de mejorar el estancamiento de la producción en la entrada a la fase de montaje, aliviando a su vez la carga de trabajo, por lo que se consigue rebajar la tasa de utilización del recurso de este proceso. Y también se logra llegar con bastante suficiencia a la nueva meta de producción impuesta por el cliente para el año próximo, con un amplio margen de seguridad.

8. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se ha tratado de crear un modelo de simulación que represente fielmente una línea de producción real, que en este caso se trata de la línea de producción de sistemas de dirección asistida eléctricos de la fábrica que tiene ZF-TRW en la comarca de Pamplona. Este proyecto se ha realizado de manera paralela a la empresa, pero sin llegar a ser un proyecto oficial demandado por ellos, pero si se ha contado con la estimable colaboración de algunos de sus empleados.

Se ha logrado poner en práctica aquellos objetivos o ventajas que ofrece la simulación de procesos productivos y que se citaron en la introducción de este TFM. Estas ventajas son la de comprender el comportamiento que tiene el sistema real, mediante la creación de un modelo de simulación que represente fielmente dicho comportamiento, y poder realizar pequeñas modificaciones en el modelo, que puedan dar respuesta a cómo responderá el sistema real si se aplicasen esas modificaciones en el proceso productivo real.

Se ha puesto en práctica el plan de acción para la creación de un modelo de simulación que contiene los siguientes pasos:

- **Planteamiento del problema:** Se quiere modelar un proceso productivo, para poder dar solución a dos cuestiones fundamentales, que son el cuello de botella que se forma en la fase de montaje y la nueva demanda de piezas anuales del cliente.
- **Recogida de datos:** Para poder representar fielmente un sistema real en un modelo de simulación, se podría decir que lo más importante es realizar un buen análisis previo. Este análisis consta de entender cómo funciona el sistema y de la recopilación de todos los tiempos y datos que intervienen en todo el proceso de producción. En este caso se pudieron hacer recopilaciones en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre de 2016. Esta recolección de datos, se queda escasa, si el proyecto fuese oficial los datos para poder hacer un buen análisis estadístico deberían ser de por lo menos un año, para poder estimar mejor las tendencias que cada grupo de observaciones.
- **Modelización:** Es la etapa de construcción del sistema, y la cual centra la mayor atención de este trabajo, detallando cada paso que se ha seguido hasta poder arrancar la simulación y obtener los resultados.
- **Validación:** Esta consiste en ver si hay correspondencia entre el sistema real y el modelo de simulación. Lo ideal sería contar con la ayuda de expertos tanto en el área de la simulación, como de la empresa que conozcan en profundidad la cadena de producción. En este trabajo no se ha podido validar por esa vía el modelo, por lo que se optó por comparar un resultado de salida como por ejemplo la tasa de producción anual y ver que se corresponde con la del sistema real.
- **Simulación:** Se arranca el programa y ARENA realizara la simulación de las 5 réplicas que se le programaron, cada una con su periodo de calentamiento y su longitud de réplica.

Tras obtener los resultados de la simulación y viendo evidenciado en el modelo el estancamiento de la fase de montaje, se hace una propuesta de mejora, la cual será

evaluada, ya que como se ha comentado, una de las ventajas de la simulación, es que una vez validado tu modelo, puedes realizar pequeñas modificaciones y ver cómo se comporta el sistema ante estos cambios.

Para aliviar la espera de las tuercas a la entrada de la fase de montaje, se propone aumentar la capacidad de este recurso de 3 a 4, a la vez que se aumenta también en una máquina más el proceso de verificación, para no crear en este punto una nueva congestión. Además, como se pretende aumentar la producción, se tiene que aumentar las llegadas de piezas, por lo que se programan más cantidad de palés en las llegadas de los lunes (9) y en las llegadas de los jueves (8), de esta manera se asegura material en el almacén con el que poder trabajar sin que se produzcan paros en la producción.

Tras simular este escenario y obtener los nuevos resultados, al compararlos con la situación actual de la empresa, se observó que se conseguían ambos objetivos, rebajar el tiempo en cola de las tuercas al llegar al montaje y alcanzar con bastante holgura la nueva demanda de 400.000 direcciones asistidas anuales.

Paralelamente a este proceso también se realizó un estudio, de la estimación del tiempo de calentamiento que necesita el modelo al tratarse de un modelo de simulación sin punto de finalización. Este procedimiento se llevó a cabo mediante la ventaja que ofrece *ARENA* de poder ir registrando datos según va realizando la simulación en un archivo de datos *EXCEL*.

Para concluir comentar también que la introducción de las Técnicas de reducción de Varianza, abren la posibilidad de realizar estudios más exhaustivos con el modelo, como por ejemplo, la posibilidad que se ha comentado en ciertas partes del trabajo, de combinar simulación con optimización. La optimización se encarga de evaluar innumerables escenarios, hasta conseguir reportar la mejor solución. La implantación en el modelo de las TRV, favorece que dicha evaluación de escenarios, se produzca siempre bajo las mismas condiciones experimentales, es decir, preservar siempre el mismo entorno de aleatoriedad.

9. BIBLIOGRAFÍA

- AZCÁRATE, CRISTINA; MAYOR, FERMÍN. (2015) *Documentación asignatura Simulación y Optimización de Procesos Industriales*.
- PIERA, MIGUEL ÁNGEL; GUASCH, ANTONI; CASANOVAS, JOSEP; FIGUERES, JAUME. (2002): *Modelado y Simulación. Aplicación a Procesos Logísticos y Servicios*
- KELTON, W.D.; SADOWSKY, R.P.; ZUPICK, N.B. (2015): *Simulation with Arena*. 6th Ed. McGraw-Hill.
- LAW, A.M. (2015): *Simulation modeling and analysis*. 5^a Ed. McGraw-Hill.
- ROSSETTI, M.D. (2010): *Simulation modeling and Arena*. John Wiley & Sons.
- RUSSELL, R.S.; TAYLOR, B.W. (2006): *Operations Management*. Wiley. 5^a Ed.
- JAY APRIL; FRED GLOVER; JAMES P. KELLY; MANUEL LAGUNA (2003): *Practical introduction to simulation optimization. Proceedings of the Winter Simulation Conference*
- MICHAEL C. FU; FRED W. GLOVER; JAY APRIL (2005): *Simulation optimization: a review, new developments, and applications. Proceedings of the Winter Simulation Conference*.
- MARVIN K. NAKAYAMA. (2006): *Output analysis for simulations. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*.
- ALEXOPOULOS, CHRISTOS. (2007): *Statistical analysis of simulation output: state of the art. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*.
- Law, A.M. (2015): *Simulation Modeling and Analysis*, 5th Edition, McGraw-Hill, New York
- ALDABALDETRECU, PATXI (2010): *Máquinas y hombres. Guía histórica*. Ed. Fundación Museo de Máquina Herramienta
- KALPAKJIAN, SCHMID. (2003): *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Ed. Pearson
- L.N. LÓPEZ DE LACALLE MARCAIDE, J.^a SÁNCHEZ GALÍNDEZ, A. LAMIKIZ MENCHACHA. (2006): *Mecanizado de Alto rendimiento*. Ed. Izaro
- PUCHE FORTE, JOSÉ FRANCISCO; ANDRÉS CARPENA, JUAN JESÚS; GÓMEZ GÓMEZ, JOAQUÍN; LÓPEZ VILAR, RICARDO; SANTA VILLALBA, SEBASTIÁN; SANZ PERPIÑAN, JESÚS. (2005): *Guía para la simulación de procesos industriales*

10. REVISTAS CIENTÍFICAS

- Journal of Simulation
- Proceedings of the Winter simulation conference
- European Journal of Industrial Engineering
- European Journal of Operational Research
- Computers and Industrial Engineering

11. WEBGRAFÍA

- <https://es.scribd.com/doc/113605014/Simulacion-con-el-Software-Arena>
- <http://www.logisticamx.enfasis.com/notas/72941-modelos-simulacion-manufactura>
- <http://www.imh.eus/es/comunicacion/dokumentazio-irekia/manuales/introduccion-a-los-procesos-de-fabricacion/referencemanual-all-pages>
- <http://www.landarsimulation.com/formacion-con-simulacion/el-mundo-en-movimiento/historia-de-la-simulacion/>
- <https://unicrsthiamurbinaio.files.wordpress.com/2011/03/el-programa-arena-para-simulacion.pdf>