

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Práctica 2 de Sistemas de producción

Máster en Tecnologías y aplicaciones en Ingeniería informática

|  |  |
| --- | --- |
| Autores: | Luis Manuel Suárez González |
|  | Sergio Cáceres Pintor |

Almería, España

Diciembre de 2017

“Las verdades elementales caben en el ala de un colibrí”

José Martí

Índice

[1. Objetivos de la práctica 4](#_Toc502342797)

[2. Problema propuesto 4](#_Toc502342798)

[3. Modelación con una red de Petri coloreada 4](#_Toc502342799)

[4. Simulación con Arena 8](#_Toc502342800)

[5. Análisis estadístico 15](#_Toc502342801)

[5.1. Cantidades de productos que quedan en los almacenes y que abandonan el sistema 15](#_Toc502342802)

[5.2. Valor máximo de cajas en espera de ser atendidas por la máquina MA1 a lo largo del día 16](#_Toc502342803)

[5.3. Cantidad de fallos en la máquina MA1 a lo largo del día 17](#_Toc502342804)

[5.4. Utilización de la máquina MA2 17](#_Toc502342805)

[5.5. Costo total asociado al procesamiento de la máquina MA3 19](#_Toc502342806)

[5.6. Obtención de un beneficio diario del 70% a partir de los precios de venta de las maquetas 19](#_Toc502342807)

[6. Alternativa de mejora del proceso 20](#_Toc502342808)

[7. Referencias bibliográficas 21](#_Toc502342809)

Índice de figuras

[Figura 1. RdPC propuesta 5](#_Toc502342810)

[Figura 2. Tiempo de simulación especificado en Arena 9](#_Toc502342811)

[Figura 3. Modelo desarrollado en Arena 9](#_Toc502342812)

[Figura 4. Recepción de las cajas de material y transporte hacia la cinta C1 10](#_Toc502342813)

[Figura 5. Traslado de las piezas en C1 e introducción en la máquina MA1 10](#_Toc502342814)

[Figura 6. Procesamiento de las piezas en las máquinas MA2 y MA3 11](#_Toc502342815)

[Figura 7. Traslado de las maquetas terminadas hacia los almacenes 11](#_Toc502342816)

[Figura 8. Creación y atención de pedidos 12](#_Toc502342817)

[Figura 9. Utilización de las máquinas MA1, MA2, MA3 17](#_Toc502342818)

[Figura 10. Configuración del módulo de tipo Process que permite pasar una pieza a la máquina MA2 o MA3 libre 18](#_Toc502342819)

[Figura 11. Configuración de los recursos en el módulo de tipo Process que permite pasar una pieza a la máquina MA2 o MA3 libre 18](#_Toc502342820)

[Figura 12. Módulo Available machines (de tipo Set), utilizado para indicar que se utilice la máquina MA2 o MA3 libre 19](#_Toc502342821)

[Figura 13. Algunos resultados de realizar las mejoras 21](#_Toc502342822)

# Objetivos de la práctica

La presente práctica tiene como objetivos docentes los siguientes:

* Modelar un proceso de fabricación sencillo con las Redes de Petri Coloreadas (RdPC)
* Simular el proceso modelado con el software Arena
* Interpretar los resultados de la simulación realizada
* Atendiendo a los resultados obtenidos proponer una mejora al proceso

# Problema propuesto

Se desea modelar un proceso de fabricación sencillo. El sistema está constituido por: una cinta de alimentación de material (C1), dos robots R1 y R2 para transporte de piezas, una máquina para conformado de piezas (MA1), dos máquinas para acabado exterior (MA2 y MA3) y una cinta para retirada de material (C2). Además, el material en bruto y el producto final entran y salen de la célula, respectivamente, empaquetado en cajas, mediante un torillo (T). Se dispone de cinco operarios (O1, O2, O3, O4 y O5), uno que se encarga de la supervisión de la máquina MA1, otro que se encarga de la supervisión de las máquinas MA2 y MA3, otro que se encarga de desempaquetar los materiales en bruto, otro de empaquetar los productos finales y otro de conducir el torillo. Cualquiera de los 5 operarios puede realizar cualquiera de las funciones indicadas, excepto la de conducir el torillo, ya que solo el operario O5 tiene permiso para manejarlo. Se asume que se fabrican dos tipos de productos en base a dos tipos de materiales, maquetas de avión (A) en base al material M1 y maquetas de coche (C) en base al material M2. La materia prima se recibe en planchas empaquetadas en cajas. Estas cajas contienen material de un tipo, M1 o M2. Los productos finales son empaquetados en cajas atendiendo a las peticiones de los clientes, de modo que una caja puede contener al mismo tiempo maquetas de aviones y coches.

# Modelación con una red de Petri coloreada

Para la realización de la RdPC se ha empleado el software Draw.io disponible en [1] y que constituye una potente herramienta libre para realizar diferentes tipos de diagramas como los del lenguaje de modelado unificado, de entidad-relación, y de redes.

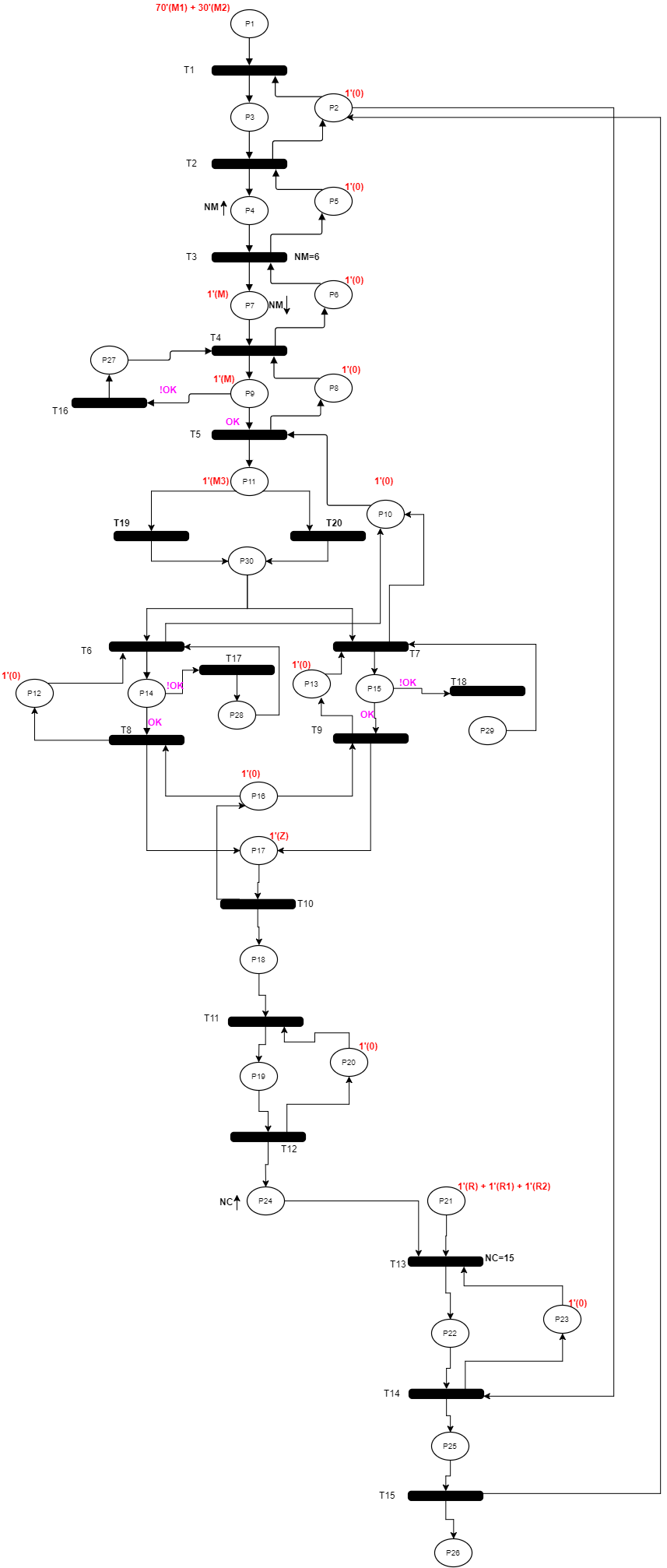


Figura 1. RdPC propuesta

*Tabla 1. Lugares en la RdPC propuesta*

|  |  |
| --- | --- |
| Lugar | Descripción |
| P1 | Estación de llegada, el 30% de las cajas de material son de tipo M1 y el 70% de tipo M2 |
| P2 | Torillo libre |
| P3 | Torillo transportando cajas |
| P4 | Cinta C1 con piezas |
| P5 | Operario que saca el material M1 y M2 de las cajas libre |
| P6 | Robot R1 libre |
| P7 | Robot R1 con una pieza |
| P8 | Máquina MA1 libre |
| P9 | Máquina MA1 procesando una pieza |
| P10 | Robot R2 libre |
| P11 | Robot R2 con una pieza procesada en MA1 |
| P12 | Máquina MA2 libre |
| P13 | Máquina MA3 libre |
| P14 | Máquina MA2 ocupada |
| P15 | Máquina MA3 ocupada |
| P16 | Robot R2 libre |
| P17 | Robot R2 con pieza terminada en MA2 o MA3 |
| P18 | Cinta con pieza Z dejada por R2 |
| P19 | Operario ocupado con pieza (apilando) |
| P20 | Operario libre |
| P21 | Recepción de pedidos de clientes |
| P22 | Operario ocupado haciendo palés de pedido |
| P23 | Operario libre |
| P24 | Cajas apiladas |
| P25 | Torillo ocupado transportando palés |
| P26 | Estación de salida con palés del pedido |
| P27 | Máquina MA1 parada y siendo arreglada |
| P28 | Máquina MA2 parada y siendo arreglada |
| P29 | Máquina MA3 parada y siendo arreglada |
| P30 | Pieza con programa 1 o programa 2 lista |

*Tabla 2. Transiciones en la RdPC propuesta*

|  |  |
| --- | --- |
| Transición | Descripción |
| T1 | Transportar cajas desde la estación de llegada hasta la estación de la cinta transportadora |
| T2 | (Llegada del torillo/descarga de las cajas) en la estación de la cinta transportadora C1 |
| T3 | Transporte en la cinta del material |
| T4 | Robot R1 introduce pieza en máquina MA1 |
| T5 | Máquina MA1 termina de procesar pieza |
| T6 | Pasar pieza de MA1 a MA2 |
| T7 | Pasar pieza de MA1 a MA3 |
| T8 | Fin del procesamiento en MA2 |
| T9 | Fin del procesamiento en MA3 |
| T10 | R2 transporta la pieza z a la cinta C2 |
| T11 | La pieza llega al final de la cinta C2 |
| T12 | El operario termina de apilar |
| T13 | Formar palés de pedido, un palé está formado por 15 cajas |
| T14 | Operario termina de formar palés de pedido |
| T15 | Torillo llegó con palés a estación de salida |
| T16 | Máquina MA1 con comportamiento extraño |
| T17 | Máquina MA2 con comportamiento extraño |
| T18 | Máquina MA3 con comportamiento extraño |
| T19 | Elección programa p1 |
| T20 | Elección programa p2 |

*Tabla 3. Colores en la RdPC propuesta*

|  |  |
| --- | --- |
| Color | Descripción |
| M | Material de tipo M1 o M2 |
| M1 | Material para la fabricación de maquetas de avión |
| M2 | Material para la fabricación de maquetas de coches |
| M3 | Pieza procesada por máquina MA1 |
| Z | Maquetas de tipo A o C |
| A | Maquetas de avión |
| C | Maquetas de coches |
| R | Cantidad de palés pedidos, cada palé está formado por 15 cajas |
| R1 | Cantidad de maquetas de aviones pedidas en cada caja de un palé |
| R2 | Cantidad de maquetas de coches pedidas en cada caja de un palé |
| NC | Contador de número de cajas para crear palé |
| NM | Número de material transportado en la cinta |

# Simulación con Arena

La simulación del proceso descrito en la sección Problema propuesto ha sido realizada con el software Arena en su versión 15 para estudiantes que puede ser obtenido gratuitamente en [2]. El software Arena es además muy utilizado en la simulación de eventos discretos [3][4][5]. Teniendo en cuenta las distribuciones de los tiempos de llegada de la materia prima se ha simulado una jornada de 24 horas.

La Figura 2 muestra los parámetros de la simulación relativos al tiempo especificados en Arena.

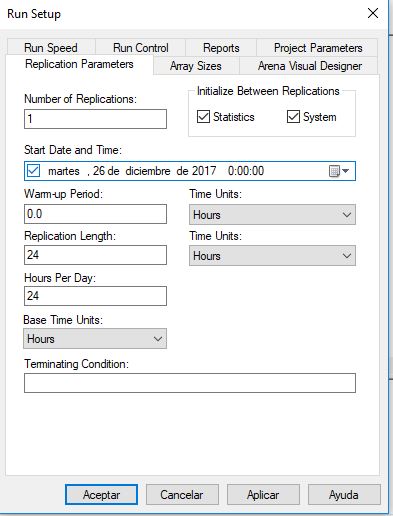


Figura 2. Tiempo de simulación especificado en Arena

La Figura 3 muestra el modelo desarrollado en Arena.

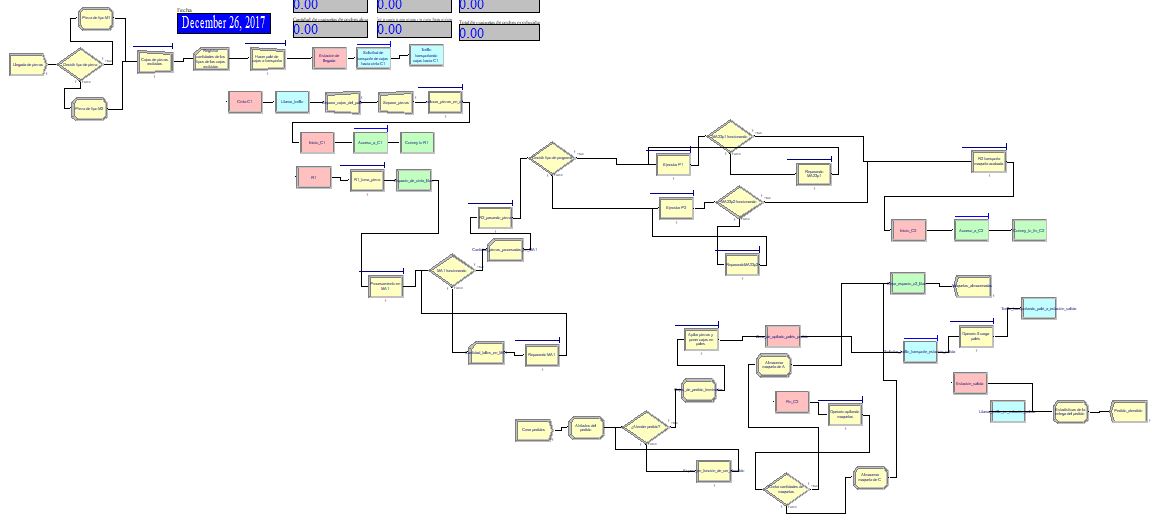


Figura 3. Modelo desarrollado en Arena

El modelo de la Figura 3 puede dividirse en las siguientes partes para su comprensión: recepción de las cajas de material y transporte hacia la cinta C1, traslado de las piezas en C1 e introducción en la máquina MA1, Procesamiento de las piezas en las máquinas MA2 y MA3, traslado de las maquetas terminadas hacia los almacenes, Creación y atención de pedidos.

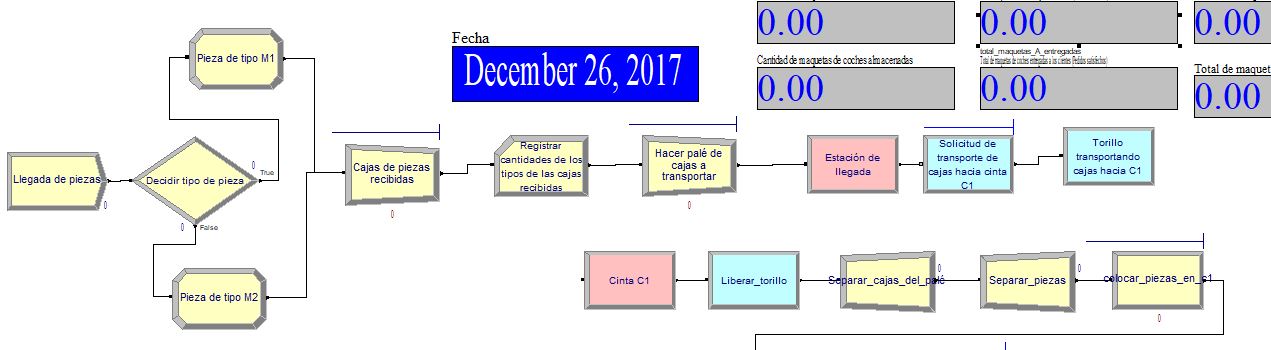


Figura 4. Recepción de las cajas de material y transporte hacia la cinta C1

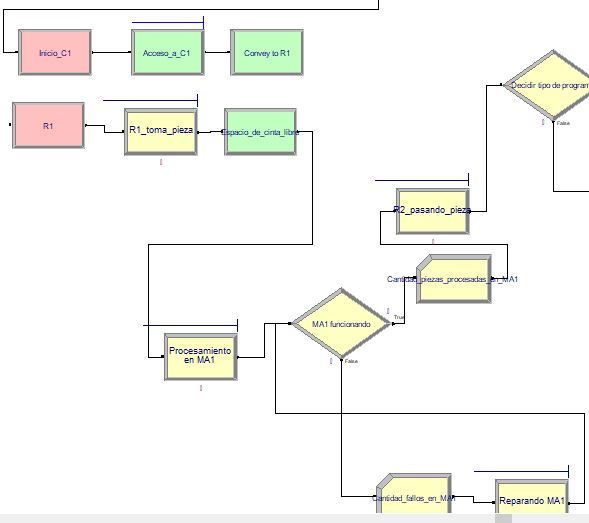


Figura 5. Traslado de las piezas en C1 e introducción en la máquina MA1

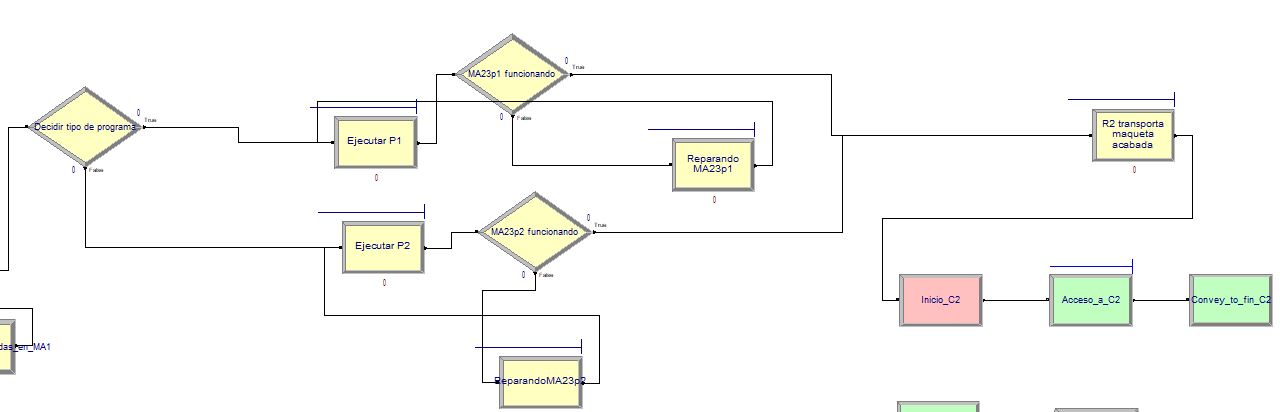


Figura 6. Procesamiento de las piezas en las máquinas MA2 y MA3

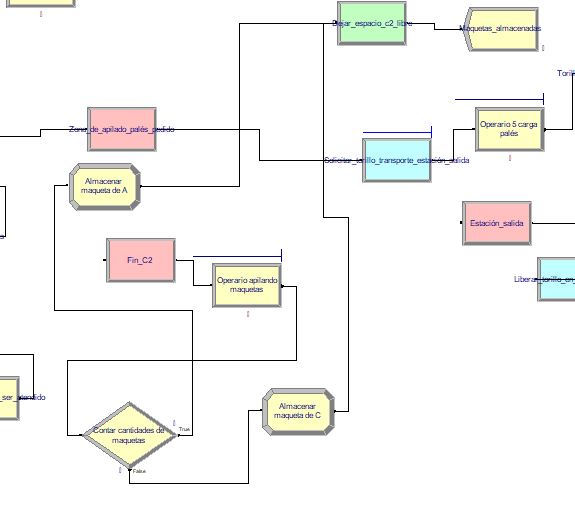


Figura 7. Traslado de las maquetas terminadas hacia los almacenes

El traslado de las maquetas terminadas comienza con el módulo “R2 transporta maqueta acabada” de la Figura 6 y continua con el módulo “Fin\_C2”, terminando con el módulo “Maquetas\_almacenadas” de tipo Dispose. Las cantidades de maquetas que están almacenadas son controladas con el uso de variables.

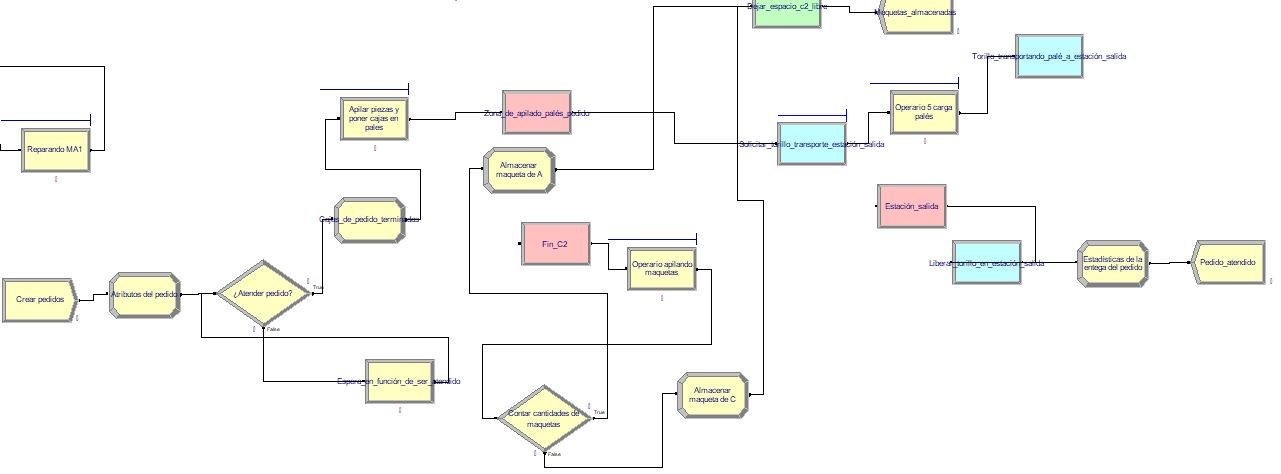


Figura 8. Creación y atención de pedidos

Debido a que para la simulación del proceso se está utilizando el software Arena para estudiantes existen limitaciones en cuanto a la complejidad de los modelos que pueden ser creados, en particular:

* No se pueden correr modelos que excedan de las 150 entidades
* Algunos módulos sofisticados no pueden ser utilizados (ejemplo el módulo Storage del panel Packaging)

Debido a las limitaciones anteriormente planteadas y a que el modelo desarrollado con Arena tiene un nivel de detalle relativamente alto fue necesario ajustar algunos de los valores de las orientaciones de la práctica para poder ejecutar el modelo. El análisis estadístico se realizará teniendo en cuenta estos valores. Las siguientes tablas muestran los diferentes valores considerados.

Tabla 4. Llegada de materia prima

|  |  |
| --- | --- |
| Horas | Cantidad de cajas de materiales que se reciben |
| 0h-4h | 1 caja por hora |
| 4h-6h | 2 cajas por hora |
| 6h-10h | 3 cajas por hora |
| 10h-17h | No se reciben cajas |
| 17h-18h | 4 cajas |
| 18h-22h | 4 cajas por hora |
| 22h-24h | 4 cajas por hora |

Se asume que una caja de material estará conformada por 4 piezas del material M1 o M2. El 30% de las cajas son del material M1 y el 70% del tipo M2. En esta simulación además se asume que la máxima cantidad de cajas de material que pueden llegar al día es 60. Cada caja de material tiene un costo de 20 €.

Tabla 5. Medidas consideradas en el proceso

|  |  |
| --- | --- |
| Elemento | Medida considerada |
| Longitud de las planchas de material | Todas las planchas de material de las piezas M1 o M2 miden 1 m |
| Palés de cajas transportadas desde la estación de llegada hasta la cinta C1 | Los palés van a estar conformados por 3 cajas |
| Palés de cajas de pedidos completados | Los palés van a estar conformados por 3 cajas |
| Cantidad de pedidos recibidos | Se reciben un máximo de 3 pedidos al día |
| Cantidad de maquetas de aviones por cada caja del pedido | La cantidad de maquetas de aviones por caja de pedido será en un 50% de 2 y en otro 50% de 4 |
| Cantidad de maquetas de coches por cada caja del pedido | La cantidad de maquetas de coches por caja de un pedido será en un 50% de 4 y en otro 50% de 3 |
| Número de palés de un pedido | El número de palés de un pedido será en un 50% de 2 y en otro 50% de 3 |
| Tiempo de procesamiento de una pieza en la máquina MA1 | 5 minutos como media |
| Tiempo de procesamiento de una pieza al ejecutar el programa P1 en la máquina MA2 o MA3 | 3 minutos como media |
| Tiempo de procesamiento de una pieza al ejecutar el programa P2 en la máquina MA2 o MA3 | 6 minutos como media |
| Tiempo de reparación de una avería en las máquinas MA1, MA2 y MA3 | 10 minutos como media |

Tabla 6. Costos de utilización de algunos recursos

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Recurso | Costo en procesamiento (€/h) | Costo en reposo (€/h) |
| MA1 | 2.5 | 1.25 |
| MA2 | 5 | 1 |
| MA3 | 6 | 0.6 |
| R1 | 2 | 0.4 |
| R2 | 2 | 0.4 |
| C1 | 3 | 0 |
| C2 | 3 | 0 |
| Operarios | Los operarios cuestan 7 €/h | |

Tabla 7. Otros costos considerados

|  |  |
| --- | --- |
| Elemento | Costo (€) |
| Brigada de mantenimiento | 5 € por reparación |
| Torillo | El torillo es eléctrico y consume 40 kW/h, teniendo el kW un precio de 0.2 € |

# Análisis estadístico

La interpretación de los reportes brindados por Arena permite dar respuesta a las siguientes cuestiones:

¿Cuántas cajas de productos quedan en el almacén (o abandonan el sistema) al final de la jornada laboral?

¿Cuál es el valor máximo de cajas que se encuentran a la espera de ser atendidos por la máquina MA1 a lo largo del día?

¿Cuántas veces se ha estropeado la máquina MA1?

¿Cuál es el valor de utilización de la máquina MA2?

¿Cuál es el valor del coste total asociado al procesamiento de la máquina MA3?

Si se quiere obtener como mínimo un beneficio diario del 70%, ¿cuál es el precio de venta que se debe fijar para cada maqueta?

## 5.1. Cantidades de productos que quedan en los almacenes y que abandonan el sistema

Para responder la interrogante de cuántas cajas de productos quedan en el almacén (o abandonan el sistema) al final de la jornada laboral se debe partir de lo siguiente:

* Cómo las cajas de productos M1 y M2 contienen piezas y es a partir de éstas que se conforman las maquetas de aviones y de coches en este trabajo se entenderá como cantidad de cajas de productos que quedan en el almacén (en realidad son dos almacenes, uno para las maquetas de aviones y otro para las maquetas de coches) a la cantidad de cajas de M1 y M2 procesadas y necesarias para realizar las maquetas de aviones y coches que quedan en los almacenes
* La cantidad de cajas de productos que abandonan el sistema dependerá de los pedidos de los clientes. Al día se reciben una cantidad de pedidos, cada uno de ellos con sus especificidades en cuanto al número de maquetas de aviones y de coches que deben estar en una caja, además cada pedido indicará el número de palés de ese tipo específico de cajas. En este trabajo se tratará como cantidad de cajas de productos que abandonan el sistema a las cantidades de cajas de M1 y M2 procesadas y que fueron utilizadas para satisfacer los pedidos recibidos

Las tablas siguientes responden la interrogante analizada teniendo en cuenta las aclaraciones anteriores.

Tabla 8. Cantidad de cajas de productos que quedan en los almacenes al finalizar la jornada laboral

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Medida | Descripción | Valor |
| 1 | Cantidad de cajas de M1 recibidas | 18 |
| 2 | Cantidad de cajas de M2 recibidas | 41 |
| 3 | Cantidad de maquetas de aviones en el almacén | 30 |
| 4 | Cantidad de maquetas de coches en el almacén | 87 |
| 5 | Cajas de M1 procesadas para obtener (3) | 8 cajas[[1]](#footnote-1) |
| 6 | Cajas de M2 procesadas para obtener (4) | 22 cajas[[2]](#footnote-2) |

Tabla 9. Cantidad de cajas de productos que abandonan el sistema al final de la jornada laboral

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Medida | Descripción | Valor |
| 1 | Cantidad total de maquetas de aviones utilizadas para satisfacer pedidos | 42 |
| 2 | Cantidad total de maquetas de coches utilizadas para satisfacer pedidos | 69 |
| 3 | Cantidad de cajas de M1 utilizadas para producir la cantidad total de maquetas de aviones (1) | 11 cajas[[3]](#footnote-3) |
| 4 | Cantidad de cajas de M2 utilizadas para producir la cantidad total de maquetas de coches (2) | 18 cajas[[4]](#footnote-4) |
| 5 | Cantidad total de cajas de M1 y M2 utilizadas para producir las maquetas en 1 y 2 | 29 |

## 5.2. Valor máximo de cajas en espera de ser atendidas por la máquina MA1 a lo largo del día

Debido a que la máquina MA1 procesa piezas del material M1 o M2 es conveniente indicar el máximo número de piezas en espera de ser atendidas. La Tabla 10 responde a esta interrogante[[5]](#footnote-5).

Tabla 10. Estadísticas sobre la cantidad de piezas y cajas en espera de ser atendidas por la máquina MA1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Medida | Descripción | Valor |
| 1 | Promedio de piezas en espera | 46.99 ≈ 47 |
| 2 | Máximo número de piezas en espera | 128 |
| 3 | Promedio de cajas de material M1 o M2 en espera | ≈ 12 |
| 4 | Máximo número de cajas de material M1 o M2 en espera | 32 |

## 5.3. Cantidad de fallos en la máquina MA1 a lo largo del día

La máquina MA1 sufrió 10 fallos en el día con un costo de reparación de averías de 50 €.

## 5.4. Utilización de la máquina MA2

La simulación realizada con los valores especificados ha revelado un problema. La máquina MA3 casi no se utiliza.

La Figura 9 muestra una porción de una captura de un reporte de Arena que así lo indica.

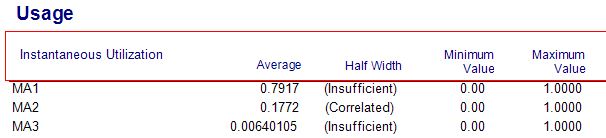


Figura 9. Utilización de las máquinas MA1, MA2, MA3

El resultado mostrado es lógico pues el procesamiento de una pieza en MA1 demora 5 minutos y el traslado hasta las máquinas MA2 o MA3 demora entre 60 y 80 segundos con lo cual ya la máquina MA2 que lo más que demoraría normalmente en ejecutar serían 6 minutos (al ejecutar el programa P2) estaría prácticamente libre. Las figuras 10, 11 y 12 muestran la configuración de los módulos de Arena utilizados para modelar el uso de las máquinas MA2 y MA3.

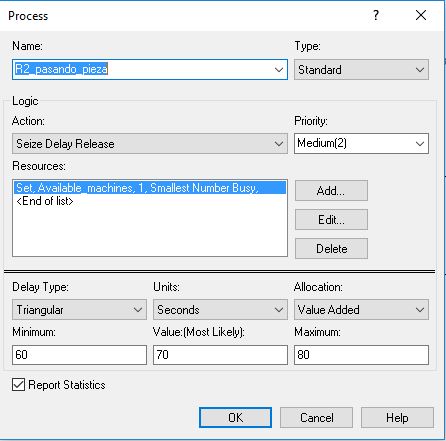


Figura 10. Configuración del módulo de tipo Process que permite pasar una pieza a la máquina MA2 o MA3 libre

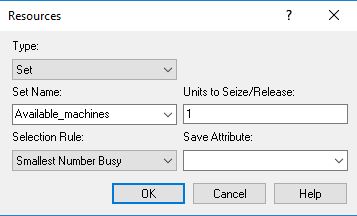


Figura 11. Configuración de los recursos en el módulo de tipo Process que permite pasar una pieza a la máquina MA2 o MA3 libre

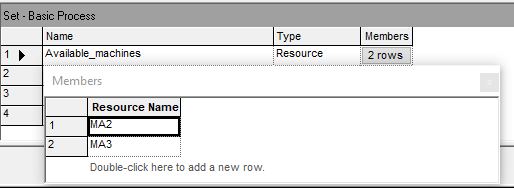


Figura 12. Módulo Available machines (de tipo Set), utilizado para indicar que se utilice la máquina MA2 o MA3 libre

Tabla 11. Estadísticas de utilización de la máquina MA2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Medida | Descripción | Valor | Interpretación del valor |
| 1 | Valor de utilización de la máquina MA2 | 0.1772 | MA2 estuvo utilizándose aproximadamente 4,26 horas |

## 5.5. Costo total asociado al procesamiento de la máquina MA3

El costo total de la máquina MA3 es de 15,24 €, de los cuales solamente 0,93 € son debido al procesamiento.

La Tabla 12 muestra los diferentes costos de las máquinas MA1, MA2 y MA3.

Tabla 12. Costos asociados a las máquinas MA1, MA2 y MA3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tipo de costo | Máquina | Costo (€) |
| Costo en procesamiento | MA1 | 47,5 |
| Costo en reposo | MA1 | 6,25 |
| Costo en reparaciones de averías | MA1 | 50 |
| Costo en procesamiento | MA2 | 21,26 |
| Costo en reposo | MA2 | 19,75 |
| Costo en reparaciones de averías | MA2 y MA3 | 85 |
| Costo en procesamiento | MA3 | 0,93 |
| Costo en reposo | MA3 | 14,31 |
| Costo total de las máquinas MA1, MA2 y MA3 | MA1, MA2, MA3 | 245 |

## 5.6. Obtención de un beneficio diario del 70% a partir de los precios de venta de las maquetas

Para poder responder la interrogante resulta necesario conocer el costo total de un día de producción, luego se debe calcular el 70% de dicho costo. El costo total añadido al 70% del costo representan un beneficio del 70% y con este valor es posible calcular el precio unitario que debería tener cada maqueta producida.

Para la simulación realizada el costo diario se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Costos diarios de producción

|  |  |
| --- | --- |
| Tipo de costo | Costo (€) |
| Costo total en máquinas MA1, MA2 y MA3 | 245 |
| Costo en operarios | 840 |
| Costo total en materia prima (cajas de materiales M1 y M2) | 1180 |
| Costo total en los robots R1 y R2 | ≈ 28,32 |
| Costo total en las cintas C1 y C2[[6]](#footnote-6) | ≈ 25,62 |
| Costo total en el torillo[[7]](#footnote-7) | 2,8 |
| Costo total | 2321,74 |

En el caso de la cinta C1 fue usada aproximadamente 7,8 horas mientras que la cinta C2 fue utilizada aproximadamente 0,74 horas. El torillo fue utilizado aproximadamente 0,35 horas (21 minutos) consumiendo 14 kW.

Para obtener un beneficio del 70% diario como mínimo se deberían vender todas las maquetas producidas (228 maquetas en total, de las cuales 72 son de aviones y 156 de coches) a un precio unitario de 17,32 € aproximadamente.

# Alternativa de mejora del proceso

El proceso simulado presenta algunas deficiencias como las siguientes:

* Poca utilización de la máquina MA3
* Número considerable de maquetas de aviones y coches que permanecen en los almacenes
* Elevado número de piezas en espera de ser procesadas con la máquina MA1

Una mejora lógica consiste en incrementar las máquinas que realizan el procesamiento de las piezas. Se propone la compra e instalación de dos máquinas MA4 y MA6 con las mismas características de la máquina MA1 para que realicen el procesado inicial de las piezas de material M1 y M2 e incorporar además una máquina MA5 con las mismas características de MA2 para que realice el terminado de las piezas ejecutando el programa P1 o P2. El modelo resultante es muy similar al explicado en la sección Simulación con Arena. La Figura 13 muestra algunos de los resultados obtenidos al realizar las mejoras.

Como es posible apreciar en la Figura 13 al realizar las mejoras propuestas se obtienen los siguientes beneficios:

* Reducción de la cantidad de maquetas que quedan en el almacén (10 maquetas de aviones y 86 de coches)
* Incremento de la cantidad de maquetas que se entregan a los clientes

Además de los beneficios anteriores se debe mencionar que se reduce el número de piezas en espera de ser procesadas inicialmente de un máximo de 128 piezas a un número máximo de 48.

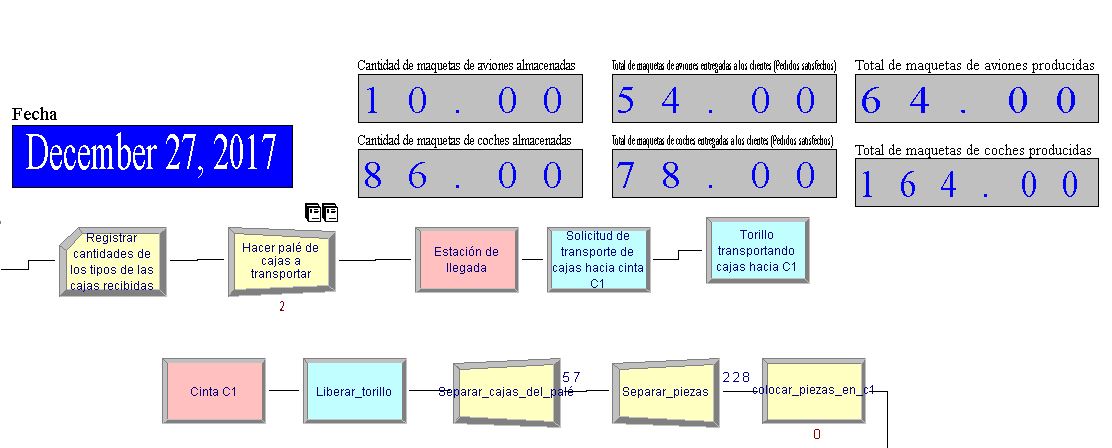


Figura 13. Algunos resultados de realizar las mejoras

# Referencias bibliográficas

[1] JGraph Ltd, “Draw.io.” [Online]. Available: https://www.draw.io/.

[2] Rockwell Automation, “Arena simulation software,” 2017. [Online]. Available: https://www.arenasimulation.com/simulation-software-download. [Accessed: 26-Dec-2017].

[3] W. D. Kelton, R. P. Sadowsky, and N. B. Zupick, *Simulation with Arena*, Sixth Edit. McGraw-Hill International, 2015.

[4] C. A. Chung, *Simulation modeling handbook: a practical approach*. CRC Press, 2004.

[5] Mathworks, *Arena user ’ s guide*, no. March. 2017.

1. La caja número 8 de M1 no se utilizó completamente [↑](#footnote-ref-1)
2. La caja número 22 de M2 no se utilizó completamente [↑](#footnote-ref-2)
3. La última caja de M1 no fue utilizada completamente [↑](#footnote-ref-3)
4. La última caja de M2 no fue utilizada completamente [↑](#footnote-ref-4)
5. El promedio de piezas en espera y el máximo número de piezas en espera fueron obtenidos de un reporte del software Arena, el resto de las medidas son simplemente calculadas a partir de estas [↑](#footnote-ref-5)
6. Los costos de las cintas fueron calculados a partir de los máximos valores de utilización de las mismas [↑](#footnote-ref-6)
7. Para el cálculo se ha utilizado el valor medio de utilización obtenido del reporte correspondiente [↑](#footnote-ref-7)