

Análisis de técnicas de mantenimiento productivo total mediante simulación

Jesús Racero Moreno, Ignacio Eguía Salinas, Gabriel Villa Caro

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n. 41092. Sevilla. jrm@esi.us.es, ies@esi.us.es, gvilla@esi.us.es

Resumen

En los últimos años ha cobrado una gran importancia la aplicación de técnicas de mantenimiento en el sector cervecero. El aumento de la demanda de forma estacional ha orientado a mejorar la eficiencia y eficacia de las industrias. Las técnicas de mantenimiento permiten a las empresas mejorar su productividad sin necesidad de costosas ampliaciones. El diseño y desarrollo de modelos de simulación se hace necesario para su utilización como laboratorio de pruebas de estrategias previa implantación. El siguiente trabajo describe una herramienta para el análisis, evaluación y comparación de estrategias de mantenimiento en una línea de envasado, mediante el diseño de indicadores de eficiencia y software de simulación.

Palabras clave: mantenimiento, simulación, envasado.

1. Introducción

La competencia de las industrias exige cada vez más organizaciones flexibles y capaces de ajustarse rápidamente a las condiciones variables de mercado.

Actualmente se experimentan transformaciones a nivel tecnológico, organizacional, económico y humano. Estos cambios, que son consecuencia de la productividad y competitividad del negocio en los mercados, traerán consigo una serie de desafíos los cuales deberán ser afrontados de forma rápida.

Para tener éxito, las empresas deben anticiparse a los cambios, atender a las necesidades de los clientes y superar las competencias. Para lograr estos objetivos tienen que ser innovadoras (actualizarse tecnológicamente), presentar una estructura óptima (competir en costes) y garantizar al máximo la calidad y la satisfacción del cliente.

En todo proceso industrial, partiendo de materias primas o productos intermedios se elaboran productos de valor superior que pueden ser productos acabados o intermedio a su vez. El envasado es una parte integrante del proceso de elaboración donde se realizan todas las operaciones necesarias para colocar el producto en el mercado en las condiciones de calidad establecida por la empresa. Las líneas de envasado de fabricación son fundamentales para los procesos de fabricación de muchas industrias como comida y bebida, fármacos, tabaco, productos químicos, electrónicos, etc.

Para obtener una máxima productividad se ha de disponer de líneas de envasado dotadas de la máxima flexibilidad. En los procesos productivos actuales, la calidad tiene prioridad sobre la cantidad. Por otro lado, la creciente complejidad e interconexión de los procesos de envasado conduce a un mayor desconocimiento y entendimiento del comportamiento de dichos trenes y es por eso, que se requiere en mayor medida del uso de metodologías para el análisis del rendimiento de fabricación de alta velocidad y elevados volúmenes, donde las tasas de procesamiento son muy elevadas (centenares o miles por minuto).

El mantenimiento, actualmente reconocido como un elemento fundamental para incrementar la competitividad industrial, ha emergido como una sofisticada disciplina que combina técnicas de gestión, organización y planeamiento con aplicaciones ingenieriles. La competitividad ha llevado a un replanteamiento de los sistemas de gestión de la producción y a su vez del mantenimiento de los equipos, para alcanzar los objetivos de calidad, productividad y rendimiento esperados.

El objetivo del siguiente trabajo es el diseño de una herramienta que permita analizar y cuantificar los resultados de las posibles estrategias, para aumentar la eficiencia de una línea de envasado de cerveza, sin que ello suponga un coste añadido y en tiempo reducido.

2. Mantenimiento productivo total en líneas de envasado

2.1. Introducción

Una línea de envasado es un conjunto de máquinas, equipos e instrumentos necesarios para realizar las operaciones propias del proceso. El éxito de una línea de envasado depende de la coordinación de los diferentes elementos que confluyen el proceso.

La mejora de rendimiento de una línea de envasado esta basado en el mantenimiento realizado sobre la línea. El Mantenimiento Productivo Total (Total Productive Maintenance) es una metodología originada en Japón para eliminar pérdidas, reducir paradas, garantizar la calidad y minimizar los costes en las empresas (Crespo, 2004).

TPM es una filosofía de mejora continua (que abarca a toda la compañía) focalizada en la eliminación sistemática de todas las formas de ineficiencia, perdida y derroche. En la línea de envasado TPM presenta 3 puntos clave (Crespo, 2004).

- Establecimiento de una cultura colectiva asociada a la reducción y eliminación de pérdidas, orientadas a operaciones de máquinas, mano de obra, material y energía.
- Sistema de prevención para obtener cero accidentes, cero defectos y cero averías.
- Aprendizaje continuo y colaborativo de eficiencia en el trabajo y labores de mantenimiento.

El mantenimiento en líneas de envasado se centra en la aplicación de técnicas de reducción de averías, mejora de velocidad de procesamiento y transportes y reducción de defectos mediante la el uso de estrategias preventivas.

2.2. Diseño de indicadores de rendimiento

Los costes de producción dependen en gran parte del rendimiento de las operaciones de envasado. Para medir los procesos de optimización del rendimiento se han desarrollado metodologías de mejora basada en e OEE (Eficacia global del equipo) y en el TPM (Mantenimiento productivo total) (Ljungber et al 1998).

Históricamente, se medía el rendimiento a través de la eficiencia, concentrándose en minimizar las pérdidas de tiempo debido a los fallos y microparos. Desde 1992 se tiene en cuenta la eficacia para mejorar todo el tiempo basado en preparar y mantener actualizada las líneas. En el año 2000 surge el concepto de OPI (indicador de rendimiento operacional, Operational performance indicator) que abarca ambos aspectos (Wireman et al). El OPI es un indicador de rendimiento para estimular los costes óptimos de envasado, fabricando productos de buena

calidad con costes mínimos y produciéndolos en tiempo.

El OPi es adimensional, expresado en porcentajes, se puede calcular como el cociente entre el número de unidades buenas producidas y el número de unidades que debería haberse producido. Otras posibles definiciones son el cociente entre el tiempo de producción teórico y el tiempo operativo o el producto de la eficiencia por la efectividad.

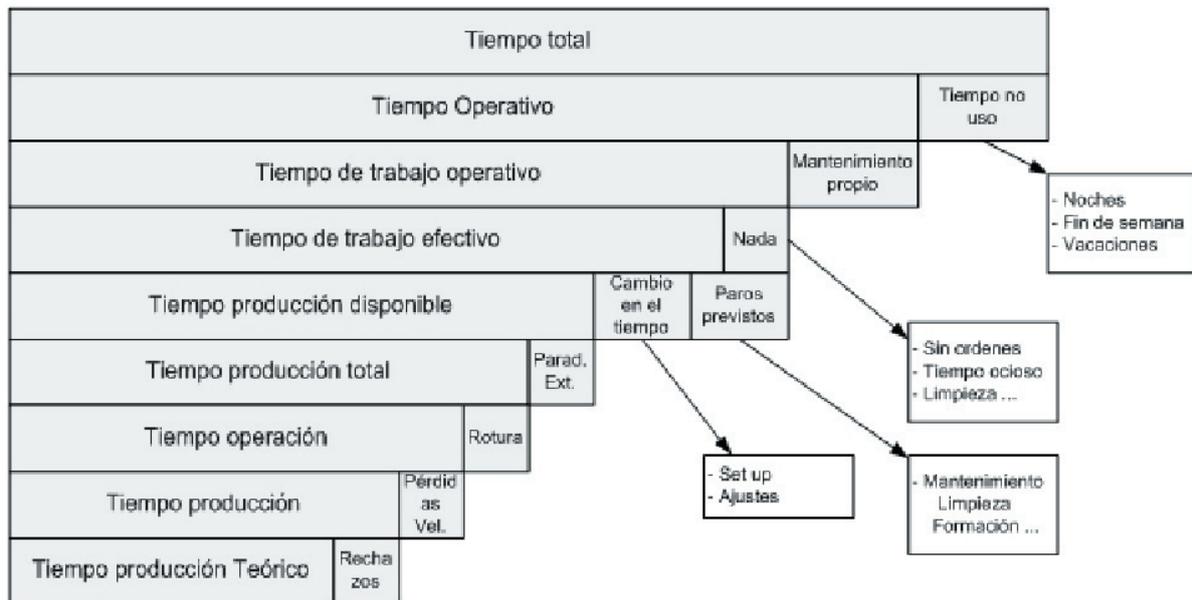


Figura 1. Descomposición de tiempos en línea de envasado

La mejora del rendimiento se realiza mediante el aumento de la eficiencia o bien la efectividad. Las estrategias de mantenimiento tendrán como objetivo mejorar alguna de ambas variables, tiempos de operación y/o reducción de fallos que permitan aumentar los indicadores de rendimiento (Figura 1).

3. Diseño y desarrollo de un laboratorio de pruebas para un tren de envasado

3.1. Introducción

La simulación es una técnica de análisis de sistemas con un enfoque a qué pasaría si.... Sus aplicaciones se centran en el estudio de los efectos que ocasionan cambios en un sistema real y en el estudio del comportamiento de nuevos sistemas (Giua, 2005). También se suelen utilizar en el análisis de las variables de control del sistema con el objetivo de establecer los valores óptimos de las mismas. Otras aplicaciones se centran en utilizar la simulación como instrumento pedagógico o como entrenamiento de personal.

Los sistemas más habituales y sobre los que existen más aplicaciones de la simulación son los sistemas de eventos discretos. El éxito de este tipo reside en la facilidad para el desarrollo e implementación de sistemas con un bajo coste.

El sistema desarrollado está estructurado en tres fases (Figura 2), una primera fase de estudio y recogida de información del sistema de envasado donde se describen los componentes y se recopila información de los elementos y procesos que constituye el sistema. Una segunda fase donde se diseña el modelo de simulación en base a la información recogida en la fase anterior. El diseño del modelo va unido a la definición de los indicadores de eficiencia del sistema, que

son definidos para cada elemento y para el conjunto del sistema. El modelo de simulación es validado a partir de los datos obtenidos en la fase de análisis. Finalmente en la fase de implantación se diseñan las estrategias individualizadas y en conjunto de los componentes del sistema. Las estrategias son aplicadas y analizadas a través del modelo de simulación cuyos resultados permiten obtener los indicadores de eficiencia.

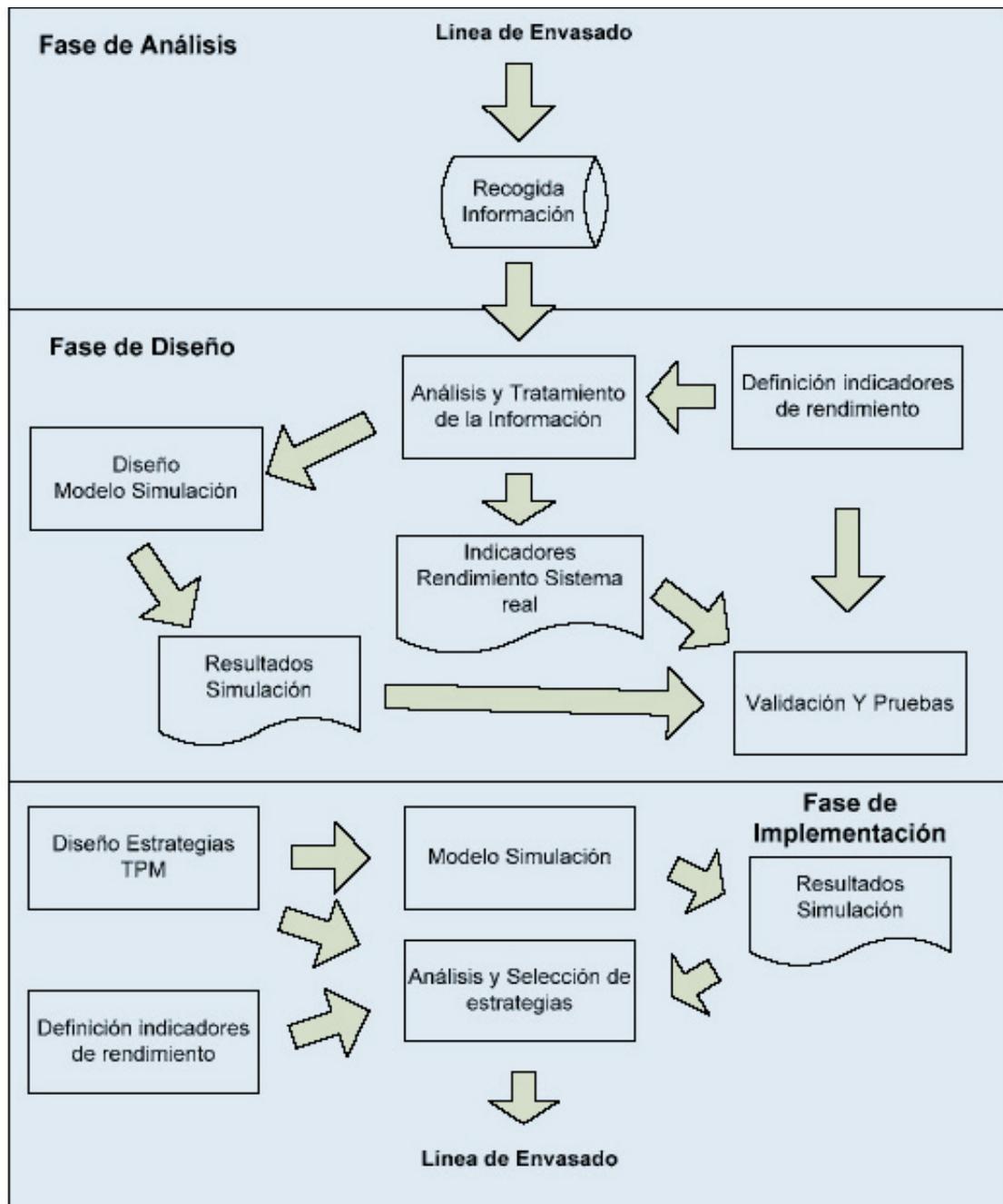


Figura 2. Descripción del sistema de análisis de estrategias de mantenimiento

En la actualidad existen un gran número de herramientas comerciales y de libre distribución para el desarrollo de modelos de simulación. Entre ellas destacar el software ARENA Packaging (Kelton, 1997) que provee de módulos adaptados a sistemas de envasado.

3.2. Modelado del sistema.

3.2.1 Descripción de la línea de envasado. Fase de análisis

El diseño del modelo comienza con la definición del sistema de envasado (Captura y análisis de información y requisitos). Las operaciones que se realizan en el proceso de envasado pueden ser resumidas mediante un diagrama de flujo secuencial (Figura 3).



Figura 3. Esquema operativo del tren de envasado

El sistema consta de un almacén de palets apilados verticalmente. Los palets están formados por 6 niveles de 410 botellas de vidrio cada una.

El primer proceso del sistema es el despaletizado, una operación consistente en depositar los envases procedentes del palet en el transportador que alimenta la línea de envasado. La máquina despaletizadora dispone de dos fotocélulas de presencia de botellas situadas al principio y al final de la mesa de botella. La primera célula tiene como misión parar la máquina, en caso de que una botella se encuentre caída a dicha altura, evitando que el carro tropiece pudiendo ocasionar daños en la máquina. La última tiene como objetivo evitar la saturación de la mesa donde las botellas son colocadas para iniciar el transporte.

El siguiente proceso es un enjuagado de las botellas. Este tren de envasado está formado por dos máquinas enjuagadoras (funcionando en paralelo) utilizadas para lavar y esterilizar las botellas con la presentación de brillo y transparencia dentro de las normas de calidad exigida. La enjuagadora es un túnel por donde las botellas circulan en fila de uno por su interior y son lavadas exclusivamente con agua tratada previamente según su dureza para evitar incrustaciones.

A la salida de cada enjuagadora se encuentra un inspector de botellas vacías. El inspector está concebido para la inspección sin contacto de envases. Esta operación tiene por objeto comprobar el estado de los envases que salen del proceso de lavado y rechazar las que presenten defectos con respecto a un envase patrón de referencia predefinido. Las botellas rechazadas son desplazadas a un acumulador de botellas próximo al inspector por dicha máquina instantáneamente sin ralentizar el proceso.

Los transportadores se instalan entre las diferentes máquinas que componen la línea, sirviendo de elemento de unión y sincronismo entre dos máquinas. La velocidad de los transportes se fija mediante reguladores de velocidad; y su puesta en marcha y paro, es a través de detectores de posición. El ancho de los transportadores puede variar de una zona a otra, pero generalmente no cambia notablemente salvo en las proximidades de las máquinas, donde en un recorrido corto, pasa del ancho correspondiente, a un carril de una sola botella. Esto es debido a que la mayoría de las máquinas procesan botellas de una en una.

Los transportes de salida en máquinas duplicadas se fusionan. Por ejemplo los transportadores de las botellas lavadas e inspeccionadas con dirección a la Llenadora – Taponadora de botellas.

El llenado es la operación más importante del proceso de envasado. La llenadora es el cuello de botella del sistema de envasado presenta una velocidad teórica de 65000 botellas/h aunque la velocidad está fijada 60800 botellas/h. Las botellas aceptadas por los inspectores de botellas llegan a la llenadora en el transportador, formando una sola fila. La botella cerrada pasa del plato de cierre que la posiciona en el transportador que la desplazará hasta la siguiente máquina, el pasteurizador.

La carga y la descarga del Pasteurizador, con capacidad de hasta 72000 botellas/hora, se producen por empuje de las botellas acumuladas. A la salida de la máquina existen detectores de acumulación que en caso de activación se para el transportador de entrada y el movimiento de las rejillas durante un tiempo ajustable, transcurrido el cual, se pone nuevamente en marcha las rejillas y el transportador de entrada. El infrautilización de la capacidad del pasteurizador es el principal coste asociado a las paradas de la línea de envasado.

La siguiente operación es el etiquetado de las botellas. Este tren de envasado consta de dos etiquetadoras operando en paralelo con una velocidad individual de 40000 botellas/hora. A continuación las botellas se posicionan en un transportador mediante una estrella de salida. A la salida de cada etiquetadora se encuentra un inspector nivel-tapón que rechaza las botellas que no cumplan con alguna de las características exigidas en cuanto a nivel de llenado, tapón y etiqueta.

Después del etiquetado de botellas se dirigen, a través de un transportador, a la zona de empaquetado (empaquetadora Kisters) que consta de una mesa de acumulación de botellas. La operación de empaquetado se realiza en máquinas que pueden ser configurada para diferentes tipos de agrupación. La máquina consta de mecanismo de separación que agrupa botellas según la configuración elegida (72000 botellas/h).

Finalmente se procede a la paletización, operación contraria al despaletizado. Consta de dos máquinas en paralelo, con una capacidad de hasta 48000 botellas/horas, toman las cajas que llegan en el transportador desde la empaquetadora Kisters y se disponen sobre un palet.

3.2.2 Modelado mediante Arena

La línea de envasado es un conjunto de máquinas y transportadores. Las máquinas están destinadas a procesar los envases unidad por unidad. Entre las máquinas existen transportadores que desplazan las botellas en grupos, excepto cuando se aproximan a las máquinas donde las botellas se disponen en fila de uno. Los datos a modelar en referente a las máquinas son la velocidad, el porcentaje de unidades rechazadas, distribución de tiempos entre microparos (MTBF), distribución de duración de microparos (MTTR), transporte de entrada y transporte de salida. En relación a los transportes es necesario contemplar la capacidad de los transportes, velocidad, dimensiones máquina o transporte de entrada y máquina o transporte de salida.

El modelado del sistema se ha realizado mediante dos herramientas software, inicialmente se opto por CellSIM (Conway, 1987), software gratuito de simulación de factorías creado en Excel. El principal problema es que trata a los transportadores como acumuladores indicando solamente su capacidad. Esto implica que el modelado de transporte no es posible ya que no permite desplazar productos de una máquina a otra.

La siguiente opción es Arena (Kelton, 2004) que desde la versión 8 provee de un módulo para la simulación de factorías de envasado, donde describe con gran nivel de detalle los transportadores y máquinas involucradas en el proceso.

a) Modelado de transportadores.

El primer aspecto a modelar son los transportadores. Los datos que definen cada transportador son el ancho, largo, capacidad, densidad y velocidad. El ancho de los transportes se ha obtenido a partir del número de cadenas que lo componen, el tipo y su dimensión. Los transportadores están compuestos por una o más cadenas de tipo fino (8.5cm) o tipo ancho (19cm). La capacidad teórica que presenta las cadenas depende de la superficie de contacto de la botella (25 cl) cuyo diámetro es de 5.5cm y ocupa un área equivalente a 23,75cm². La disposición de las botellas en la cinta transportadora puede ser de dos formas, siendo más común la disposición mostrada en la figura 4.A.



Figura 4. Disposición de los envases en el transporte

La capacidad y densidad del transporte (bot/m²) es similar en ambas configuraciones disponiéndose unas 330 botellas en un m². Así es posible determinar la capacidad de las cintas mediante la definición de la capacidad lineal y la capacidad transversal. Para un transporte de 8, 6, 4, o 1 cadena presenta una capacidad transversal de 12, 9, 6 y 1 botella respectivamente. La capacidad lineal de una cadena para un metro de longitud es de 18 botellas. Por tanto la capacidad de un transporte de 8, 6, 4 y 1 cadena sería de 216, 162, 108 y 18 botellas respectivamente.

La velocidad de la cinta puede ser obtenida mediante un tacómetro (metros/minuto), el principal problema es que el software de simulación emplea como medida de velocidad número de botellas en una hora (bot/h) (1).

$$V_t \text{ (bot/min)} = V_l \text{ (m/min)} * \text{ancho (m)} * \text{densidad superficial (bot/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Donde, V_l es la velocidad lineal de la cinta tomada con el tacómetro, ancho es el ancho del transportador y densidad superficial es el número de botellas por metro cuadrado que caben en la cinta.

La velocidad lineal se ha obtenido como la media entre el valor máximo, mínimo y el último valor tomado con el tacómetro.

El siguiente aspecto a considerar es la capacidad de los transportes, estos son utilizados como acumuladores previa entrada a la máquina. La capacidad de cada transportador puede ser obtenida mediante la ecuación 2.

$$\text{Capacidad} = \text{Acho (m)} * \text{largo (m)} * \text{densidad superficial (bot/m}^2\text{)} \quad (2)$$

Aunque es posible obtener la capacidad de forma analítica se presentan algunas dificultades

como conocer de forma exacta la longitud de los transportes, (algunas zonas son inaccesibles) o la geometría con presencia de tramos curvos y rectilíneos. Así mismo, la expresión anterior solo es válida para transportes de geometría rectangular.

En la práctica, la capacidad de los transportadores se ha obtenido mediante mediciones cuando el tren se encuentra en vacío y los contadores en la inspección están a cero.

El modelado de los transportadores se ha realizado mediante “conveyors” entre dos máquinas. En el caso de fusión de transportadores se ha modelado mediante la función “merge” y en caso de división se ha empleado la función “split” (Figura 5).

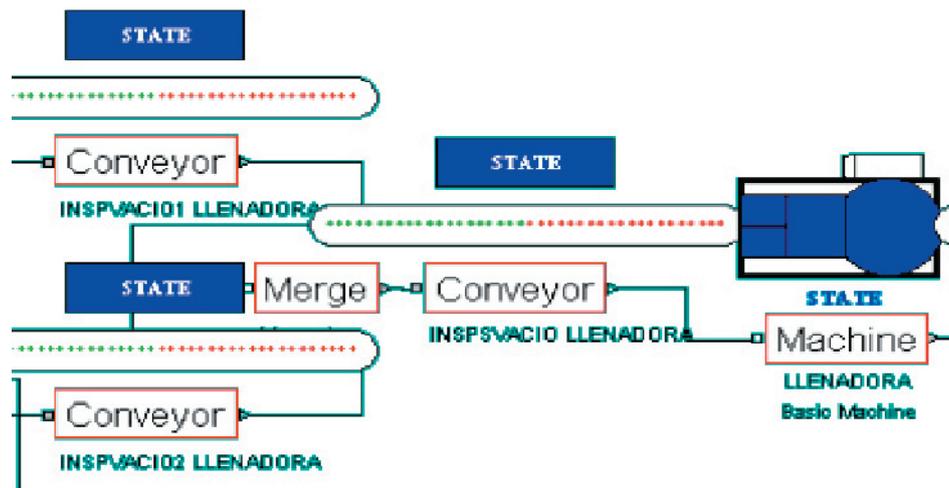


Figura 5. Modelado de transportadores. Fusión

b) Modelado de máquinas

Los parámetros que definen el comportamiento de las máquinas pueden ser de dos tipos, deterministas y estocásticos. La velocidad (bot/h) y porcentaje de rechazos serán considerados dentro del primer tipo. El MTBF y MTTR son del segundo tipo.

El modelo de simulación permite definir dos tipos de máquinas, máquinas paletizadoras o despaletizadoras y máquinas de procesamiento. Las máquinas de procesamiento pueden ser básicas o de ensamblado o agrupación. Las máquinas básicas presentan una velocidad de procesamiento (ciclos/minutos) y el número de unidades por ciclo. Las máquinas de ensamblado se caracterizan por agrupar unidades, al igual que las máquinas básicas presentan una velocidad de procesamiento y el número de ensamblados por ciclo.

4. Análisis de estrategias

4.1. Diseño de estrategias

El objetivo fijado se resume en el indicador OPI. Se pretende pasar de un OPI (año 2005) de un 46% a un 65% (año 2006), esto supone pasar de 8.971.800 a 11.018.000 unidades producidas. Actualmente las pérdidas de eficiencia se deben principalmente a averías en máquinas (Tabla 2). El pilar de mejora específica se encarga del desglose de dichas averías y de la puesta en marcha de “Equipos TPM” para su reducción.

Tabla 2. Evaluación de la productividad de la línea de envasado previo a TPM en base a simulación

OPI	Incont.	Averías	Externas	Formación	Paros. Planificados
46%	5.6%	36.8%	2.3%	2.7%	6.5%

Las averías y los fallos incontrolados (microparos y pérdidas de velocidad) además de ser los máximos responsables de la pérdida de eficiencia son los problemas que el pilar de mejora debe tratar.

4.2. Análisis y evaluación

Los datos obtenidos de la simulación del sistema implican que existen dos máquinas (Llenadora y empaquetadora Kister) que presentan una mayor pérdida de tiempos (Tabla 3). Se ha optado por la realización de tres actuaciones, dos asociadas individualmente a cada máquina y una tercera asociada a la aplicación conjunta sobre dos máquinas.

Inicialmente la eficiencia de la línea presenta un OPI de un 46% ya que la eficiencia medida por el cociente entre el tiempo de operación y tiempo de proceso es de un 52% y la eficacia medida por el número de unidades producidas frente al número con posibilidad producir es de un 88%.

La primera estrategia corresponde a mejorar los microparos (mediante un equipo de mantenimiento de microparos destinado en la máquina) producidos en la empaquetadora kister lo que implica reducir el número de microparos a 71 (55%) consiguiendo un aumento del índice OPI del 8%.

Tabla 3. Resultados de simulación previo TPM de máquinas con averías

Máquina	Velocidad	Unidades buenas	Unidades rechazadas	Nº	Tiempo parada (h)
Empaquetadora	11160	71982	0	67	0,550
Inspector vacío 1	36000	214316	215	90	0.360
Inspector vacío 2	36000	214492	215	94	0.376
Kister	3120	17992	0	257	1.584
Llenadora	60780	429156	215	71	0.615
Paletizadora	39600	9002	0	12	0.174

En relación con la estrategia dirigida a mejorar los microparos en la máquina llenadora se consigue una mejora del índice OPI en un 3%, frente a una mejora de microparos de 53%.

Por último, la estrategia conjunta de actuación sobre las máquina Kister y llenadora (las que presentan un mayor tiempo en microparos) implica que el índice OPI aumente un 15%.

5. Conclusiones

En los últimos años las tareas de mantenimiento han cobrado mucha importancia. La cantidad y número de recursos dedicado al mantenimiento ha crecido en la mayoría de las empresas proporcionando mejoras no solo en el sistema productivo sino que permite una optimización y reducción de costes.

El siguiente trabajo se centra en estudiar estrategias de mantenimiento para la mejora de la productividad de una línea de envasado. Las estrategias han sido analizadas y comparadas a

partir de la definición del índice OPI, que refleja la eficiencia y eficacia del tren de envasado. Así mismo, se ha desarrollado un modelo de simulación que como laboratorio de pruebas permite el análisis de las estrategias previa implantación.

Los resultados obtenidos han mostrado que las estrategias de mantenimiento de forma individualizada presentan peores mejoras que las estrategias conjuntas, obteniendo hasta una ganancia de un 15%.

Referencias

Conway, R.; Maxwell, W.; McClain, J.; Worona, S. (1987). Los usuarios Guían a XCELL & la Fábrica del Sistema Modelado, el Contralto de Palo.

Crespo, A.; Moreu, P.; Sanchez, A. (2004). Ingeniería de Mantenimiento. Técnicas y Métodos de Aplicación a la Fase Operativa de los Equipos. ISBN: 84-8143-390-X.

Giua, A.; Pilloni, M.; Seatzu, C. (2005). Modelling and simulation of a bottling plant using hybrid Petri nets International Journal of Production Research, Volume 43, Issue 7 April, pp. 1375-1395.

Kelton, D.; Sadowski, R.; Sturrock, D. (2004). Simulation with Arena. McGraw Hill. ISBN: 9780070275096.

Ljungber, O. (1998). Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities. International Journal of Operations & Production Management. Vol 18, N° 5, pp. 495-507.

Wireman, T. (2005). Developing Performance Indicators for Managing Maintenance. Industrial Press.