

Simulación y optimización de los recursos de Servicio de Asistencia Técnica (SAT)



Arkaitz Uriarte-Zearra*
Itziar Ricondo-Iriondo*
Aitor Goti-Elordi**
Kristina Bogataj***

Ingeniero en Organización Industrial
Dra. Ingeniero en Organización Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Master en eBusiness management

*IDEKO-IK4. Línea de investigación de Gestión de la Producción. Arriaga Kalea, 2 - 20870 Elgoibar (Gipuzcoa). Tfno: + 34 943 748000. auriarte@ideko.es ; iriondo@ideko.es

** UNIVERSIDAD DE MONDRAGÓN. Escuela Politécnica Superior de Mondragón. Dpto. de Mecánica y Producción Industrial. Calle Loramendi, 4 - 20500 Mondragón. Tfno: +34 943 797000. aitor.goti@hotmail.com

*** ORIA, poslovne rešitve, d.o.o. Litostrajska c. 52, 1000 Ljubljana (Eslovenia). Tfno: +386 (01) 5140300. kristina.bogataj@oria.si

Recibido: 05/07/2011 • Aceptado: 06/02/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4315>

TECHNICAL ASSISTANCE SERVICE (TAS) SIMULATION AND OPTIMIZATION

ABSTRACT

- In today's increasingly global industrial environment, machinery manufacturers should base their offer beyond the selling of efficient, good quality and good priced products. It is necessary for companies offer prompt and efficient technical assistance service to their customers (regardless their location) if they want to continue surviving and competing. On the other hand, customers are willing to pay for machinery equipment which guarantee high production availability. Consequently, service and, particularly, Technical Assistance Service (TAS) become critical when assuring this availability. In this sense, companies have increased their export sales with not a clear or accurate sized and location of their TAS units. This paper focuses on the optimization the sizing of required human resources TAS points and TAS points locations through the use of a Discrete Event Simulation software. The program has been used in a real case in order to optimize the TAS department of a company of DANOBATGROUP in a specific area. This work has been carried out through the use of a Discrete Event Simulation program and later exploitation with spreadsheets.
- **Keywords:** Technical Service Assistance (TAS), Resources, Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time To Recovery (MTTR), optimization, decision making, discrete event simulation.

RESUMEN

En un entorno industrial cada vez más globalizado ya no es suficiente con vender productos eficientes, de alta calidad y a un precio competitivo. Para que las empresas puedan seguir existiendo o compitiendo, es necesario además que ofrezcan un servicio de asistencia técnica rápido y eficaz a sus clientes, independientemente de la localización en la que se encuentren los mismos. Por otro lado, los clientes están dispuestos a pagar por equipos y/o maquinaria que les garanticen disponibilidad productiva. Por tanto, el servicio y el servicio de asistencia técnica en particular se convierten en aspectos críticos para el aseguramiento de la disponibilidad. En este sentido, las empresas han incrementado sus exportaciones sin dimensionar y localizar de forma clara y precisa sus puntos de SAT. Este artículo se centra en el dimensionamiento de los recursos humanos de los puntos de servicio SAT, así como en la localización del punto de servicio SAT a través de la simulación por elementos discretos. Para ello se presentará un caso real en el que mediante las herramientas desarrolladas se ha optimizado el SAT de una de las empresas de DANOBATGROUP, fabricante de máquina herramienta, en una determinada región.

Este trabajo se ha llevado a cabo a través del uso de un programa de *Simulación de Eventos Discretos* y posterior explotación de los resultados mediante una hoja de cálculo.

Palabras clave: Servicio de Asistencia Técnica (SAT), recursos, Tiempo Medio de Buen Funcionamiento (MTBF), Tiempo Medio de Reparación (MTTR), optimización, toma de decisiones, simulación de eventos discretos.

1. INTRODUCCIÓN

En un entorno cada vez más globalizado, ya no es suficiente con vender productos eficientes con alta calidad y a precios competitivos. Hoy en día, la competitividad no se centra exclusivamente en el producto, sino que abarca conceptos más amplios que añaden servicios a las funcionalidades tradicionales del producto [Oliva & Kallenberg, 2003]. Este artículo se centra en la optimización de uno de estos servicios, el SAT.

Actualmente, para que las empresas dedicadas a la venta de maquinaria puedan seguir existiendo o compitiendo, además de vender máquinas competitivas, también deben ofrecer un servicio SAT rápido y eficaz a sus clientes, independientemente de la localización en la que se encuentren los mismos.

Para los fabricantes tradicionales (orientados al producto) supone un reto adaptar sus estructuras y capacidades de servicio de modo que puedan asegurar a los clientes la disponibilidad de los equipos o máquinas suministrados, durante todo el ciclo de vida. Por tanto, el logro de altos valores de disponibilidad operativa de los equipos de fabricación y los productos manufacturados se convierte en un factor dominante para la competitividad de los usuarios finales [Narayan, 2004], donde la disponibilidad se define como el tiempo en el que un sistema está en disposición de trabajar sobre el tiempo que se requiere que el sistema esté en uso [Biolini de 2007, Blanchard, 1995]. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que muchos usuarios de equipos insisten en la necesidad de una mayor disponibilidad del sistema a un mínimo costo [Kumar, 2000]. De modo que el fabricante no se puede centrar exclusivamente en sus procesos de fabricación, también debe atender y optimizar aquellos procesos que ocurren mientras el sistema está en uso.

En el caso del proceso de SAT, con frecuencia y debido a diferentes razones, muchas de las PYMEs y de las empresas con estructura LEAN no pueden soportar la estructura de recursos que sería necesaria para mantener sus equipos, por lo que a menudo se externaliza el servicio (38% de los trabajos de mantenimiento realizados en España se externalizan, [Goti y Arnaiz, 2008]) y dejan en manos de los fabricantes un nuevo proceso a ser gestionado.

Analizando la bibliografía existente, esta problemática de reparación de máquinas ya ha sido analizada por la *teoría de colas* y las *cadena de Markov*. El primer problema con la teoría de colas fue considerado por Erlang en 1908. La teoría de colas [Cooper, 1981] se ocupa de los problemas que implican cola (o esperas). Este modelo puede explicar una situación en la que hay K máquinas que se averían con una tasa λ y cuentan con R trabajadores de mantenimiento que pueden arreglar las máquinas según una tasa μ . Sin embargo, los métodos analíticos sólo son válidos para sistemas de colas relativamente simples. Los sistemas complejos de cola casi siempre son analizados mediante simulación de eventos discretos (DES).

El problema del tamaño del departamento de SAT se

considera una problemática relativamente compleja, ya que al tamaño se le añaden algunos aspectos más como la ubicación de las máquinas en una región geográfica, el hecho de que diferentes familias de máquinas tengan diferentes indicadores de fiabilidad, las sanciones por un servicio tardío y el costo de alquilar instalaciones o edificios donde ubicar al departamento de SAT. Por tanto, a la hora de abordar este problema, la simulación parece ser una solución eficiente, ya que permite una gran flexibilidad en el modelado de sistemas complejos y además añade simplicidad a la interpretación de los resultados. Este hecho supone una ventaja a fin de mostrar los resultados a los directivos en un entorno industrial y posteriormente tomar decisiones y medidas. Algunas herramientas basadas en DES son *Witness* [Witness, 2008], *Tecnomatix* [Simulación Tecnomatix Planta, 2010] o *Arena* [Arena, 2010]. Ofrecen la capacidad de modelar y modificar los modelos de sistemas complejos con facilidad.

Duffuaa et al. (2001) afirma que la simulación es la mejor alternativa a los modelos de análisis para las funciones de mantenimiento, debido a la complejidad de las operaciones de mantenimiento, la incertidumbre de los parámetros de las llegadas, la secuenciación, así como la disponibilidad de recursos. Oyarbide et al. (2008), por su lado, utiliza una combinación de la simulación de eventos discretos y algoritmos genéticos para la optimización del mantenimiento preventivo.

El objetivo de este artículo es presentar un modelo para el establecimiento óptimo de puntos de SAT, tanto desde el punto de vista de dimensionamiento (n° de persona) como de ubicación geográfica, con el objeto de minimizar el coste total de establecimiento y operación del servicio de SAT en una región geográfica. Para ello se ha hecho uso de la *Simulación de Eventos Discretos (Discrete Event Simulation, DES)* y la herramienta ha sido implementada en una empresa del sector de la máquina herramienta, con un parque de máquina de más de 500 en el país de estudio (Alemania).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

El funcionamiento del servicio SAT se representa de la siguiente manera: cuando una máquina se avería, el cliente solicita ayuda técnica al servicio SAT del fabricante. El técnico de SAT se desplaza a las instalaciones del cliente, chequea la máquina y la repara. Este servicio debe ser realizado en un tiempo menor al establecido contractualmente con el cliente, normalmente especificado en tiempo de asistencia máxima y ratio de disponibilidad de máquina. El técnico de SAT, una vez finalizado su trabajo, vuelve a sus instalaciones de origen para después atender otras posibles averías.

En este marco, la ubicación de las instalaciones de SAT se convierte en un importante factor a tener en cuenta. Su localización determina las distancias que habrá a casa de los clientes y por tanto el tiempo que el técnico necesitará en desplazarse a una ubicación u otra. Es necesario por tanto

localizar correctamente el punto de partida del Servicio para ofrecer un servicio rápido y eficiente, tratando de eliminar o en su caso minimizar los tiempos en operaciones que no aportan valor (tales como el desplazamiento).

Las estrategias seguidas por los fabricantes a la hora de establecer la localización del punto SAT pueden ser muy diversas: cercanía a clientes prioritarios, selección de localidades que permiten una fácil y rápida movilidad hacia distintas localizaciones, selección de la ubicación en función de los costes de alquiler y de mano de obra o la identificación de la localización centroide del mapa de máquinas, entre otras.

En cuanto a las averías, la frecuencia de las averías o reparaciones a realizar por los técnicos puede no ser determinista y, generalmente, no lo es. No obstante, sí se admite que se puede definir algún tipo de caracterización del comportamiento de la ocurrencia de estas averías o reparaciones y los tiempos de reparación a partir del análisis de los datos históricos disponibles. En cualquier caso, el fabricante debe registrar correctamente las diferentes tareas de los pedidos de SAT, con objeto de poder obtener estadísticas fiables.

Si bien la actividad de asistencia técnica puede ser de carácter correctivo o programado, este artículo se centra en el mantenimiento correctivo. La diferencia entre estos dos tipos de actividad reside en la existencia de avería. En el mantenimiento programado, el cliente programa una serie de operaciones de mantenimiento en sus máquinas, para los cuales requiere de apoyo o asistencia del fabricante. El origen de este tipo de tareas de mantenimiento a subcontratar puede venir de un plan de mantenimiento preventivo, como resultado de un mantenimiento predictivo, de un correctivo no resuelto completamente o un proyecto de adaptación o remodelación que el cliente haya querido llevar a cabo, entre otros. Por el contrario, en el mantenimiento correctivo, la máquina se avería y el fabricante debe reparar la avería lo antes posible para que la instalación se vuelva a poner en marcha y el cliente pueda continuar con su fabricación. Para poder atender a esas reparaciones y averías, el departamento o punto de servicio SAT dispone de un equipo técnico cualificado capaz de realizar tareas de mantenimiento mecánico, eléctrico, electrónico, hidráulico y/o neumático.

En muchas empresas, a la hora de dimensionar el equipo es necesario también tener en cuenta la tipología de la avería (mecánica, eléctrica, etc.) y a partir de ella realizar los cálculos pertinentes para dimensionar el equipo. En el caso estudiado, en cambio, el equipo es polivalente y por tanto capaz de realizar operaciones de distinta índole, lo que permitirá simplificar el marco de estudio y el modelo de simulación a realizar. No obstante, la herramienta desarrollada es apta para realizar estudios específicos dependiendo de la cualificación de los técnicos. Para ello, el usuario de la herramienta no debe más que ajustar los parámetros de MTBF y MTTR de las máquinas del área de estudio a la tipología de averías (y por tanto cualificación del técnico), y realizar una nueva simulación para obtener el dimensionamiento óptimo para

la tipología de averías estudiada (Mecánico, eléctrico, etc.). Los parámetros de MTBF y MTTR dependiendo de la tipología de avería se pueden obtener explotando los filtros de las bases de datos que tienen los distintos SAT.

Otro aspecto también a tener en cuenta es que el parque de máquinas contiene equipos/instalaciones/máquinas de diferentes familias de productos. Ello supone un comportamiento distinto de cada máquina (familia de máquina) y por tanto ratios de MTBF y MTTR distintos para cada una de ellas.

2.2. MODELO DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de los modelos de simulación para el dimensionamiento de los recursos humanos y su ubicación, se ha optado por hacer uso de una herramienta DES (*Discrete Events Simulation*). La simulación de eventos discretos permite modelar sistemas de diversa complejidad a partir de un conjunto de variables que representan el estado de los elementos del sistema y en los cuales los valores cambian de forma discreta a lo largo del tiempo.

Las principales ventajas del DES son dos (Goti, Oyarbide-Zubillaga, y Sánchez 2007; Oyarbide-Zubillaga, Goti, y Sánchez 2008):

- I) Las herramientas basadas en el DES estándar proporcionan capacidades de modelización o modificación de modelizaciones de sistemas complejos fácilmente.
- II) DES está estrechamente relacionado con sistemas estocásticos de manera que son apropiados para simular fenómenos reales, ya que existen pocas situaciones donde las acciones de las entidades que se encuentran dentro del sistema bajo estudio pueden ser completamente previstos por adelantado. Para generar eventos estocásticos, los paquetes de simulación generan números pseudo-aleatorios para seleccionar un valor particular para cada distribución dada. Así, en modelos DES, utilizando números pseudo-aleatorios es posible implementar la naturaleza estocástica de modelos reales.

El mecanismo de funcionamiento del DES, según Harrell, Ghosh, y Bowden (2000) se muestra en la Figura 1.

Este modelo representa la secuencia que siguen los técnicos de SAT en situaciones de averías simultáneas. En aquellos casos donde el equipo de SAT está formado por más de 1 persona y se producen averías simultáneas o secuenciales, la o las avería/s no atendidas por un técnico es o son asistidas por el otro u otros técnicos del equipo. De esta forma los tiempos de espera a máquina se minimizan. No obstante, siempre existe la posibilidad de que el equipo de SAT no sea capaz de atender a todas las averías ocurridas en un periodo de tiempo determinado (debido a que están ocupados todos los técnicos u otras razones). Por tanto es posible que las máquinas tengan que esperar a que alguno de los técnicos se libere para poder ser atendidas y se deba considerar un tiempo j de espera en máquinas.

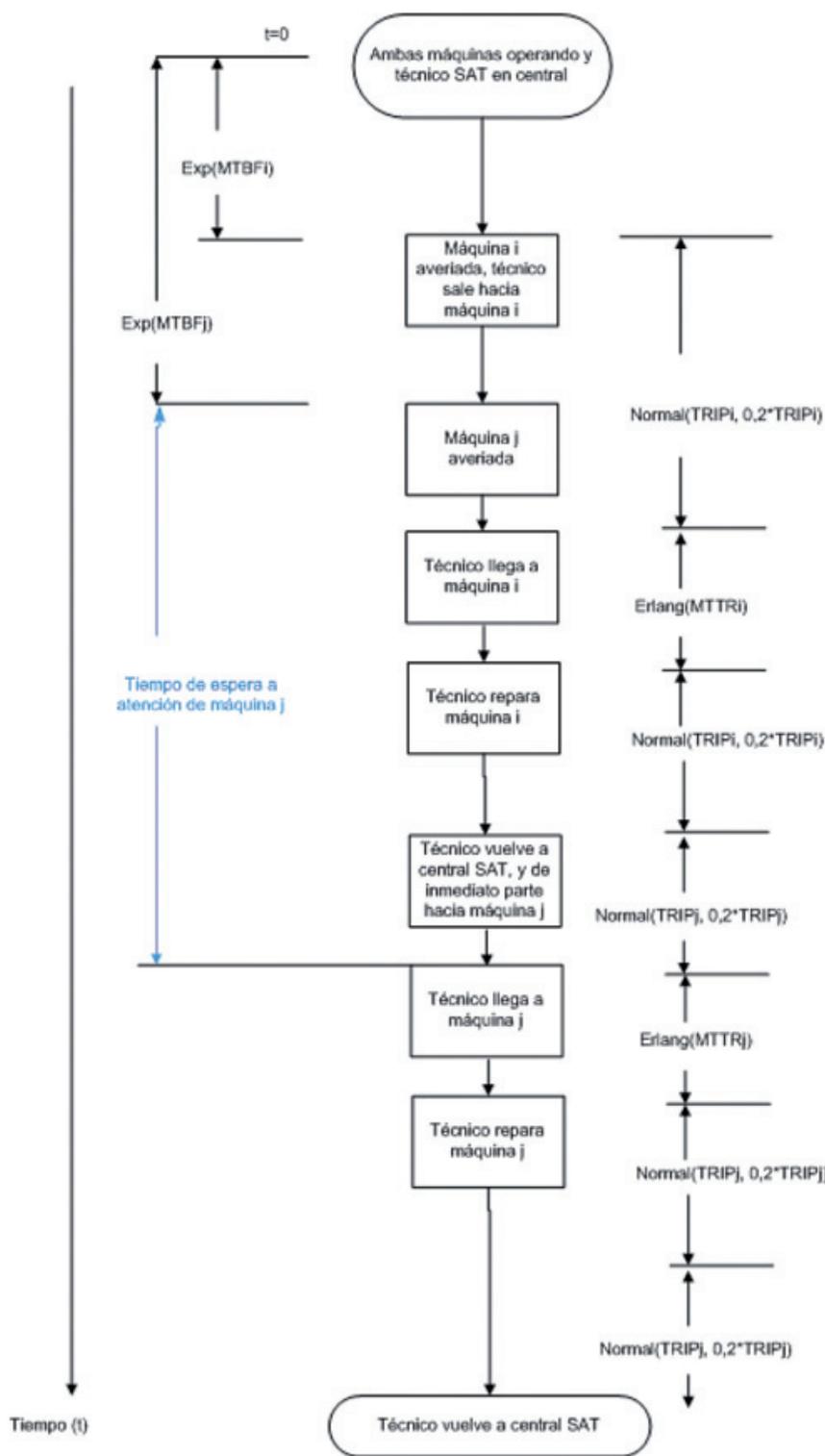


Fig.1: Diagrama del proceso DES aplicado al problema de estudio [Harrell et al., 2000]

Una vez reparada la avería, el procedimiento habitual en máquina herramienta es que el técnico de SAT vuelva a la central de SAT. En otros sectores como puede ser el de electrodomésticos u otros de reparación relativamente

rápida, es habitual que los técnicos de SAT realicen una ruta visitando diferentes clientes en un mismo día, pero en el caso de máquina herramienta las reparaciones suelen ser más largas. Teniendo en cuenta el hecho de que los técnicos SAT vuelven a la central, se ha modelizado el problema como un conjunto de nodos (representando las localizaciones de los clientes, como se explicará posteriormente) unidos a la central de SAT, de modo que todos los caminos parten de este nodo central de SAT.

En este proyecto, el modelo ha sido desarrollado haciendo uso de una versión gratuita pero limitada del programa de simulación *Witness* (Lanner 2008). Debido a las limitaciones de este programa informático (en cuanto al número de objetos posibles a simular) y a la conveniencia de mantener la complejidad del modelo en un nivel aceptable, se ha optado por la agrupación de clientes mediante la técnica estadística de *clusterización*. Esta agrupación permite dibujar y trabajar con un modelo mucho más sencillo y fácil de gestionar pero con resultados muy similares a la realidad. Cada grupo o cluster es un nodo que representa la ubicación geográfica de un conjunto de máquinas.

El parque de máquinas instalado se ha agrupado mediante el uso de una herramienta SPSS y la técnica "*K-means*", en el que se siguen las siguientes etapas: (i) Seleccionar el número de grupos "*k*" a generar; (ii) generar "*k*" grupos aleatoriamente y determinar los centros de los grupos, o generar directamente "*k*" puntos aleatorios como centros de grupo; (iii) asignar cada punto (máquina) al grupo más cercano (según distancia hasta el centro de grupos); (iv) recalculer nuevos centros de los grupos, y (v) repetir los dos pasos anteriores hasta que se encuentre un criterio de convergencia.

En este estudio se han calculado distintos números de grupos con intención de testear y validar la sensibilidad del modelo a diferente número de grupos. El resultado del análisis de grupos es la localización final de los centros de los grupos (longitud y latitud) y el número de casos (máquinas) asociados a cada grupo.

Por otro lado, el modelo permite asignar a cada nodo o grupo un conjunto de máquinas diferenciado por familias, ya que los indicadores de fiabilidad pueden variar según las diferentes familias de máquinas.

Los factores fundamentales que toman parte en el modelo de simulación desarrollado son:

- Tiempo medio de buen funcionamiento (MTBF): MTBF es el acrónimo de las palabras inglesas *Mean Time Between Failures*, o tiempo medio entre fallos. El MTBF es el tiempo medio entre cada ocurrencia de una parada específica por fallo (o avería) de un proceso, o en otras palabras, la inversa de la frecuencia con que ocurre cada parada.
- Tiempo medio de reparación (MTTR): MTTR es el acrónimo de las palabras inglesas *Mean Time To Repair* o tiempo medio hasta haber reparado la avería.
- Tiempo de viaje: tiempo que el técnico de asistencia técnica requiere para desplazarse desde la base del servicio de asistencia técnica a la fábrica del cliente donde se ha producido una avería de máquina y después volver a la base.
- Tiempo máximo de servicio: tiempo máximo que tiene el servicio de asistencia técnica para presentarse en casa del cliente para la reparación de la avería, sin recibir ninguna penalización por ello. Normalmente esta variable se define con el cliente durante la fase de negociación y firma de contratos de mantenimiento o de garantía.
- Tiempo máximo de reparación o nivel de disponibilidad concertado con el cliente: tiempo máximo que tiene el servicio de asistencia técnica para reparar o dar una solución definitiva a una avería, sin recibir ninguna penalización por ello. Normalmente esta variable se define con el cliente durante la fase de negociación y firma de contratos de mantenimiento o garantía.
- Coste de mano de obra.

Para poder cuantificar estos factores es necesario tener en cuenta la agrupación llevada a cabo. Es preciso, por tanto, que los nuevos grupos definidos representen la globalidad del sistema, de forma que cada grupo funcione de manera análoga a la que haría la globalidad del conjunto de máquinas a las que representa.

En este caso, los grupos se han tratado como sistemas de máquinas en serie (si una máquina falla, falla todo el sistema) [Ireson, 1996] y las fórmulas empleadas para calcular los valores de los factores de estudio que representan el grupo han sido:

$$MTBF_K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i}}$$

$$MTTR_K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{MTTR_i}{MTBF_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i}}$$

$$MTBF_K = MTTF_K + MTTR_K$$

Donde

$MTBF_K$ es el MTBF del grupo k.

$MTTF_K$ es el MTTF del grupo k.

$MTTR_K$ es el MTTR del grupo k.

$MTTR_i$ es el MTTR de cada máquina incluida en el grupo.

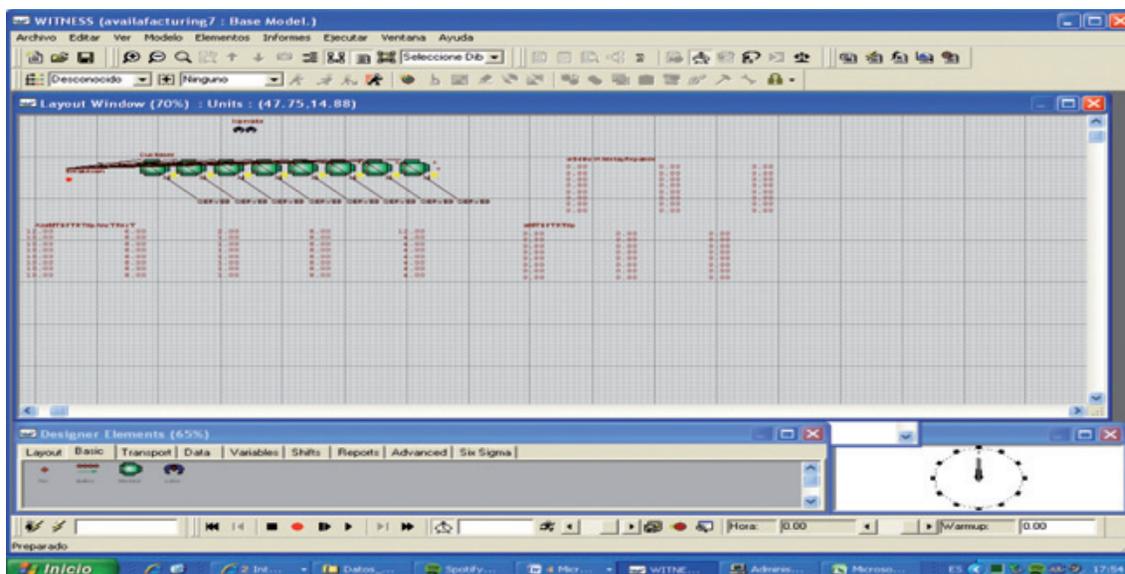


Figura 2: Representación gráfica del modelo en Witness

A la hora de analizar los resultados de la simulación y establecer la dimensión y la ubicación óptima de la sede de SAT se han empleado dos indicadores principales: (1) % de cumplimiento de servicios (en plazos acordados con los clientes), (2) Coste Total Anual del punto de servicio SAT, que puede ser desglosado también por sus componentes principales de costes fijos y costes por penalizaciones.

El coste total anual que puede tener la empresa (costes SAT) se calcula a partir de las distintas variables de coste tenidas en cuenta:

- Costes de personal: corresponden al coste anual que supone la contratación y/o mantenimiento de cada técnico de servicio de asistencia técnica para la empresa (€/año y persona). Este coste dependerá del número de técnicos que estén contratados.
- Penalizaciones por asistencia tardía: muchos clientes definen contratos de asistencia con el fabricante con intención de asegurar una temprana asistencia en caso de que alguna de sus máquinas se estropee. De forma que si el fabricante llega tarde tiene que pagar una penalización en forma de descuento sobre la factura final de la asistencia técnica (€/h) a pagar por el cliente.
- Penalizaciones por reparación tardía o no cumplimiento de ratios de disponibilidad concertados: al igual que en el caso anterior, en muchos casos también existe otro tipo de coste para el fabricante de maquinaria, que corresponde a las penalizaciones que debe pagar en caso de que el tiempo de reparación le suponga más que el acordado con el cliente en el contrato de servicio de asistencia técnica y mantenimiento anual o las penalizaciones por no cumplir con los niveles de disponibilidad concertados en los distintos pliegos de compra realizados con el cliente (en este proyecto ambos casos se han trasladado en €/h).
- Costes de Alquiler: dependiendo de la ciudad o localidad donde esté instalada el punto de servicio SAT. Los costes de alquiler de oficinas, edificio, equipamiento, etc. varían. Este coste, se considera como un coste anual.

Siendo la siguiente la fórmula final:

-
- Coste Total Anual de SAT = Costes Fijos + Coste Penalizaciones.
 - Costes Fijos = Costes de Alquiler + Costes de Operarios.
-

Una vez desarrollado el modelo de simulación, la dimensión óptima de técnicos de SAT se obtiene lanzando directamente la simulación con los parámetros de coste para cada ubicación en estudio. Para la optimización de la localización, en cambio, primero será necesario definir la nueva localización a estudiar (en función de criterios tales como la cercanía a determinados clientes, punto centroide del sistema de distribución de máquinas, ciudades con buenas vías de comunicación, etc.) y a partir de ahí calcular el coste total anual que se obtendría en cada una de las

ubicaciones estudiadas y seleccionar aquella que presente como resultado el menor coste total y los mejores ratios de cumplimiento de servicio.

3. CASO DE APLICACIÓN

El modelo de simulación se ha testado y validado con datos reales de SAT de una de las empresas de DANOBATGROUP. Este grupo industrial forma parte del *Grupo Mondragón* (la séptima corporación más grande de España). DANOBATGROUP fabrica Máquinas Herramienta (Tornos, Fresas, Rectificadoras, Sierras, Punzonadoras, etc.) para los principales sectores industriales desde 1954 y cuenta con un total de 9 plantas productivas distribuidas en España, Alemania y Reino Unido.

La empresa en estudio de DANOBATGROUP estaba interesada en evaluar el dimensionamiento actual de su red de SAT en Alemania, uno de sus países/mercado estratégicos y determinar si los costes y la localización existente podían ser optimizados. Actualmente la empresa cuenta con un parque de máquinas superior a 500 máquinas en Alemania. Para la definición del modelo se ha hecho uso de la información almacenada en la base de datos del departamento de SAT. El MTBF y el MTTR se han obtenido a partir del número de asistencias realizadas y el número de horas imputadas por asistencia. Para definir el Tiempo de viaje en cambio, se han calculado los tiempos de traslado a las distintas localizaciones, mediante el cálculo de distancias entre el punto de servicio SAT y la localización de los centros de los grupos (cálculo realizado mediante aplicaciones Web y el uso de coordenadas para la localización de máquinas y grupos).

En el caso de estudio se mostrarán los resultados obtenidos en 3 ubicaciones: la primera ubicación corresponde con la disposición actual de la central de SAT en el país de estudio, Alemania; la segunda ubicación es el punto centroide del conjunto de máquinas, mientras que en el tercer caso se ha ubicado la central de SAT en un punto extremo del mapa, en concreto en Düsseldorf. Se da la circunstancia de que la central actual SAT y el centroide están muy cerca. A continuación se amplía esta información con datos de distancias entre la central de SAT y los diferentes clusters o agrupaciones geográficas de máquinas realizados:

- Caso 1 (SAT Actual): agrupación del parque de máquinas en 30 agrupaciones geográficas, con agrupaciones que contienen de 5 máquinas a 58 máquinas por agrupación (media de 18 máquinas). Las distancias desde el punto de servicio SAT al punto centroide de cada agrupación de máquinas varían de 36 Km. a 593 Km., siendo la media de 317 Km. y la desviación típica de 139 Km.
- Caso 2 (SAT en punto centroide): agrupación del parque de máquinas en 30 agrupaciones. Las distancias desde el punto de servicio SAT (punto centroide a partir de la ubicación de las máquinas del parque de maquinaria) al punto centroide de cada agrupación en cambio varían de 95 Km. a 594 Km., con una media de 344 Km. y desviación típica de 112 Km.

- Caso 3 (SAT en un extremo, Düsseldorf): agrupación del parque de máquinas en 30 agrupaciones. Las distancias desde el punto de servicio SAT al punto centroide de cada agrupación en cambio varía de 49,5 Km. a 703 Km., donde la media es de 405 Km. y la desviación típica de 172 Km.

En cuanto a las restricciones, los tiempos máximos de espera y de reparación, así como las posibles penalizaciones se han obtenido de los contratos de mantenimiento y de garantía definidos por la empresa con sus clientes. En la Tabla 1 se muestran los valores referencia para las diferentes simulaciones realizadas en un escenario de 3 turnos de trabajo en casa del cliente.

A continuación se comentarán los principales resultados obtenidos. Primeramente, se mostrarán y analizarán los resultados obtenidos con la ubicación de SAT actual. Después se mostrará la sensibilidad del modelo a la variable clave de costes de penalización. Por último, se mostrará cómo varían los resultados totales para las 3 ubicaciones analizadas.

En el caso inicial, localización en SAT actual, se observa que la dimensión óptima para la problemática de estudio (Parque de máquinas de más de 500 máquinas en Alemania) es contar con 8 técnicos de SAT (Figura 3 y Figura 4). Con esta dimensión el coste total anual es de alrededor de 600.000€, el % de cumplimiento de servicios en 24 horas (Figura 3) ronda el 97% y las penalizaciones que pudiese haber por un servicio tardío no son significativos (supondría un 3,4% del coste total).

Parámetro	Unidad	Valor
Coste de personal	€/ persona año	Entre 40.000 y 90.000 €/año y persona
Coste de alquiler	€/ año	Entre 80.000 y 200.000 €/año
Coste de atención tardía	€/ hora	Entre 20 y 250 €/h
Coste de reparación tardía o no cumplimiento con los niveles de disponibilidad pactados	€/ hora	Entre 20 y 250 €/h
Nº de operarios		1a15

Tabla 1: Datos económicos del caso de optimización



Figura 3: % de cumplimiento de servicio realizados en 24 h en función de Nº de operarios

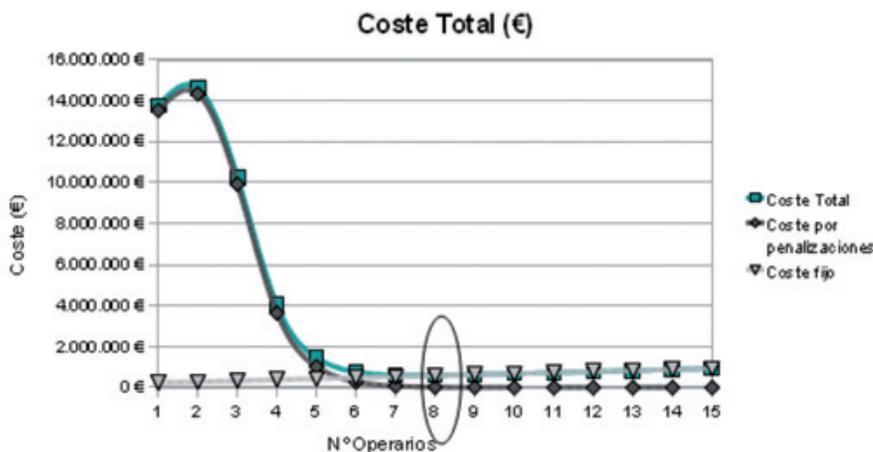


Figura 4: Costes de SAT en función del Nº de operarios

La Figura 3 y Figura 4 presentan una curva que merece ser comentada con mayor detenimiento. Con 1, 2 y 3 técnicos el nivel de servicio desciende (mínimo con 3 técnicos) para luego volver a subir a partir de 4 técnicos. Del mismo modo, con ese número de técnicos, los costes son muy elevados, debido al coste de penalizaciones, llegando al coste máximo con 2 técnicos. Lo que sucede es que, con ese número de técnicos, las máquinas están averiadas (en espera de ser reparadas) durante mucho tiempo. En ese rango de técnicos los costes de penalización son muy altos y las máquinas están averiadas tanto tiempo que el número de averías se reduce (mucho tiempo averiadas, por lo que no pueden darse más averías al no estar en funcionamiento).

En cualquier caso, ese rango inicial no es representativo y es a partir de 4-5 técnicos donde los resultados son interesantes para el estudio. Conforme aumenta el número de operarios SAT, aumenta el nivel de servicio (porcentaje de averías atendidas en plazo), reduciéndose así el coste por penalizaciones pero aumentando el coste fijo de contratación (que depende del número de operarios).

El coste de penalización depende directamente de la tasa de penalización horaria establecida. Se ha analizado la sensibilidad del modelo realizado a la variable de penalización horaria (Figura 5), variando la penalización entre 30 y 250 €/h. La mejor opción de operarios SAT sigue siendo tener 8

personas, a excepción de la penalización más baja de 30 €/h, donde el coste mínimo se daría con 6 operarios (el coste de contratación adicional de personas sería superior al ahorro en penalizaciones).

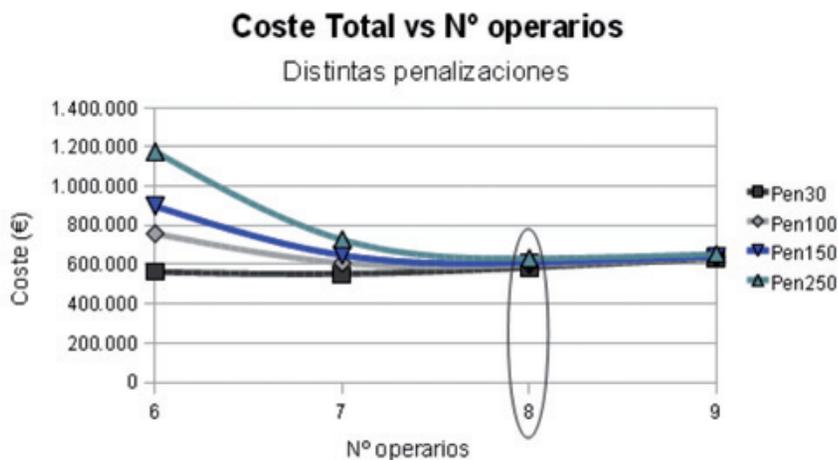


Figura 5: Coste Total de SAT en función del N° de técnicos de SAT y coste horario de penalizaciones

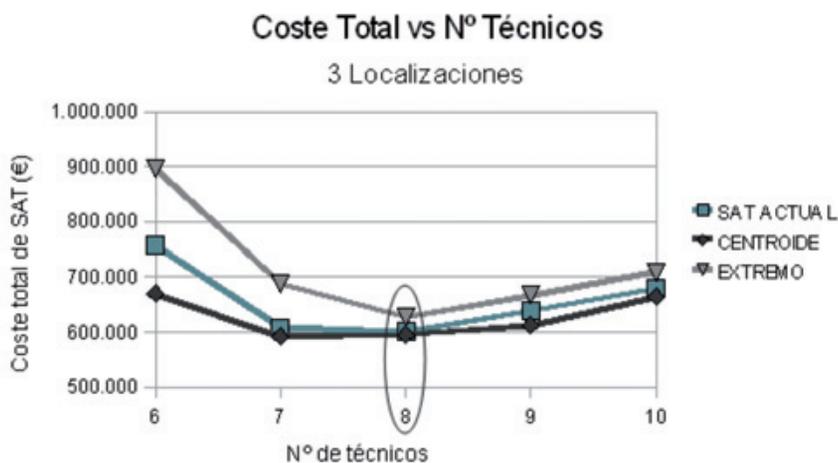


Figura 6: Diferencias de coste total dependiendo de la ubicación del punto de SAT y el número de operarios.

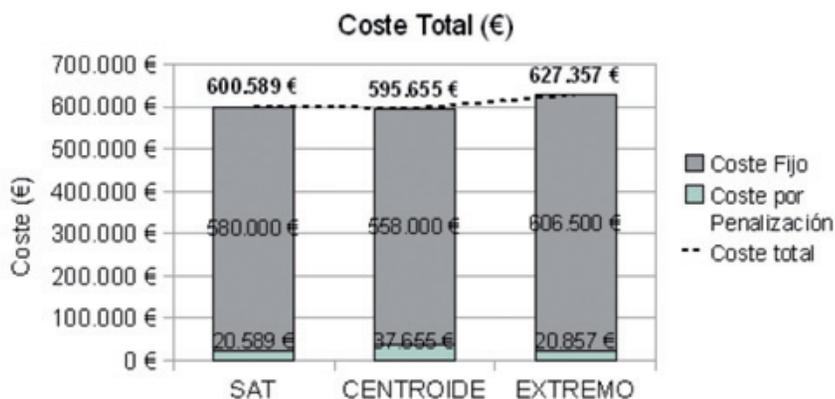


Figura 7: Diferencias de coste total dependiendo de la ubicación del punto de SAT para 8 operarios.

Para finalizar la exposición de los resultados, la Figura 6 y Figura 7 muestran los resultados obtenidos para las 3 ubicaciones seleccionadas (localización del SAT en ubicación actual, en punto centroide de parque de máquinas y en un extremo del mapa). Para la simulación de estas 3 ubicaciones se han utilizado diferentes costes de alquiler y coste de personal. El coste mínimo para SAT actual y SAT en el extremo se da con 8 técnicos de SAT, mientras que el mínimo con el SAT en el centroide se obtiene con 7 técnicos. Este coste de 7 técnicos para ubicación en el centroide es, por otro lado, el coste mínimo obtenido con las 3 ubicaciones, con una diferencia mínima de alrededor de 8.000 € con respecto al conseguido con 8 técnicos en el SAT actual. Para el caso de dimensión 8 técnicos de SAT, la ubicación óptima sería la del punto centroide, sin embargo su diferencia respecto a la ubicación actual no llegaría a 5.000€. Es decir el coste total no mejoraría ni un 1% (Figura 7).

Por tanto, ante esta situación, la empresa ha decidido no realizar ningún cambio de ubicación de Servicio SAT por el momento.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, la herramienta desarrollada, además de indicar cuál es el mejor resultado, también demuestra el gran potencial de análisis y diagnóstico que ofrece para el entendimiento de los sistemas de estudio y se convierte en una herramienta muy útil y eficaz para todos aquellos negocios de SAT interesados en optimizar sus recursos.

El departamento de SAT de DANOBATGROUP por su parte valora positivamente el resultado obtenido y ve un gran potencial en la herramienta como soporte a sus decisiones operativas de dimensionamiento de puntos SAT.

Actualmente, y con los resultados de la simulación en mano, la empresa se encuentra negociando con el equipo de SAT de Alemania, la optimización del tamaño de su equipo de trabajo. De este modo minimizarán sus costes internos, sin afectar con ello a la calidad de servicio ofrecido a sus clientes.

El modelo ha permitido analizar las diferencias en costes atendiendo a diferentes ubicaciones. Las diferencias obtenidas en coste son mínimas, por lo que la empresa ha podido confirmar la idoneidad del actual punto de SAT. Por otro lado, la empresa ha reconocido el valor de la herramienta para el estudio de otro país (o conjunto de países) donde todavía no cuenta con un centro de SAT instalado, tanto para el problema de la ubicación como el del dimensionamiento, teniendo en cuenta el parque de máquinas instalado y sus indicadores de funcionamiento. Asimismo, la utilización del modelo obliga a la empresa a continuar mejorando el registro de incidencias en máquina, como fuente principal para la obtención de datos de funcionamiento MTBF y MTTR.

En cuanto a otras futuras líneas de trabajo, el equipo del proyecto y la empresa han coincidido en el interés de profundizar en el nivel de detalle de los diferentes tipos de avería (mecánico, eléctrico, electrónico), con sus correspondientes habilidades o competencias requeridas por parte de los técnicos de SAT, de forma que mediante una única simulación se puedan obtener resultados precisos de necesidades, desglosados según tipología de averías y características de técnicos de SAT. Así como estudiar nuevas técnicas que permitan calcular de una forma más automatizada, la ubicación óptima para la sede de SAT.

5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por los siguientes programas de financiación: AVAILAFACURING, *development of a tool for the management of Technical Assistance Service Networks for the availability maximisation of Manufacturing Equipment and/or Products (European transnational project MANUNET-2009)* y SERVISTOCK, desarrollo de una herramienta para la optimización conjunta de los niveles logísticos de stock de seguridad y tipos de transporte (*European transnational project MANUNET-2008-BC-001*).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Arena. (2010). Milwaukee Wis.: Rockwell Automation.
- Birolini A. Reliability engineering: theory and practice (5^o ed.). Berlin; New York: Springer. 2007. ISBN: 2-540-40287-X
- Blanchard B. Maintainability: a key to effective serviceability and maintenance management. New York: Wiley. 1995.
- Cooper R. Introduction to queueing theory (2^o ed.). New York: North Holland. 1981.
- Duffuaa et al. "A generic conceptual simulation model for maintenance systems". Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2001. 7(3), 207-219. <http://dx.doi.org/10.1108/13552510110404512>
- Goti A, Arnaiz A. "The status of maintenance decision making under economic criteria: survey". In: Proceedings of 34th Esreda Seminar, Supporting technologies for advanced Maintenance Information Management. San Sebastian. 2008.
- Goti A. Optimización del mantenimiento preventivo en sistemas productivos mediante algoritmos genéticos. Directores: Sánchez, A; Oyarbide, A. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2007.
- Goti A, Oyarbide A, Sánchez A. "Optimizing preventive maintenance by combining discrete event simulation and genetic algorithms". Hydrocarbon Processing. 2007, vol. 86, N^o 10, p. 115-122. <http://dx.doi.org/10.1080/09537280802034091>
- Harrell C, Ghosh BK, Bowden R. Simulation using ProModel. New York: McGraw Hill. 2000. ISBN-13: 9780072341447
- Ireson et al. Handbook of reliability engineering and management. New York: McGraw Hill. 1996.
- Kumar D. Reliability maintenance and logistic support : a life cycle approach. Boston MA: Kluwer Academic. 2000. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-4655-9_LANNER. Witness [CD-ROM], ver. 2008, [Programa informático]. Distribuidor disponible: Lanner Group Limited, The Oaks, Clews road, Redditch, Worcestershire, B98 7ST, UK. 2008.
- Narayan V. Effective maintenance management : risk and reliability strategies for optimizing performance. New York: Industrial Press. 2004. ISBN:9780831131784
- Oyarbide A, Goti A, Sánchez A. "Preventive maintenance optimization of multi-equipment manufacturing systems by combining discrete event simulation and multiobjective evolutionary algorithms", Production Planning & Control. 2008, vol. 19, no. 4, Special Issue on Maintenance and Facility Management, p. 342-355. <http://dx.doi.org/10.1080/09537280802034091>
- Oliva R, Kallenberg R. "Managing the transition from products to services". International Journal of Service Industry Managemen. 14(2). 160-172. <http://dx.doi.org/10.1108/09564230310474138>
- Oyarbide A, Goti A, Sanchez A. (2008). "Preventive maintenance optimisation of multi-equipment manufacturing systems by combining discrete event simulation and multi-objective evolutionary algorithms". Production Planning & Control, 19(4), 342-355. <http://dx.doi.org/10.1080/09537280802034091>
- Tecnomatix Plant Simulation. Siemens Product Lifecycle Management Software. Siemens. 2010. The Mathworks. Matlab [CD-ROM], ver. R2008, [Programa informático]. Distribuidor disponible: The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098, USA. 2008. Witness. (2008). Manufacturing Performance Edition. Lanner Group.