

4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management  
XIV Congreso de Ingeniería de Organización  
Donostia- San Sebastián , September 8<sup>th</sup> -10<sup>th</sup> 2010

### **Análisis mediante simulación de un sistema de almacén para mejorar el número de repeticiones en una planta de Pinturas**

**Maria Valero-Herrero<sup>1</sup> José Pedro García-Sabater<sup>1</sup>, Pilar Vidal Carreras<sup>1</sup>, Julio J. García-Sabater<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ROGLE Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n 46022 Valencia.

[mavahe@upvnet.upv.es](mailto:mavahe@upvnet.upv.es), [jpgarcia@omp.upv.es](mailto:jpgarcia@omp.upv.es), [pivicar@omp.upv.es](mailto:pivicar@omp.upv.es), [jgarsa@omp.upv.es](mailto:jgarsa@omp.upv.es)

**Palabras clave:** Secuenciación, Sección de Pinturas, Almacén Regulador

#### **Resumen**

*El problema de maximizar el número de repeticiones de colores ha sido abordado desde diferentes perspectivas. En este caso se planteó como cuestión no sólo definir el criterio de secuenciación sino la infraestructura física que permitiría conseguirlo. Este trabajo analiza de diferentes sistemas de almacenes con tal de maximizar el número de repeticiones de color en la sección de pinturas de un fabricante de automóviles. Se han tenido en cuenta diferentes factores externos en el análisis como son el número de colores, su distribución, las paradas de línea y las reparaciones. Después del estudio, análisis y simulación del proceso, los resultados indican que la mejora del tamaño de lote es factible.*

#### **1. Introducción**

La problemática de la secuenciación en las factorías de fabricantes de automóviles ha sido estudiada ampliamente con vistas a optimizar los objetivos que establece la cadena de montaje. (García-Sabater et al., 2008)

Algunos autores han llevado a cabo estudios considerando no solamente la sección de ensamblaje sino también la sección de pinturas. (Cordeau et al., 2008; Gagne et al., 2006; Joly y Frein, 2008; Solnon et al., 2008). De este modo se persigue tanto la minimización del número de violaciones de las restricciones de la línea de ensamblaje como la minimización del número de cambios de color en la sección de pinturas.

Hay que tener en cuenta que cada vez que cambia el color de la carrocería se deben limpiar convenientemente todas las bocas de los elementos de pulverizado. Esta limpieza se realiza mediante el paso de disolvente por las tuberías a limpiar. Myron en (Myron, 1996) estima en un millón de dólares los ahorros producidos por un supuesto programa de producción que generaría repeticiones en los colores. En (Poler et al., 1999) se analiza este problema, proponiendo un procedimiento que aumenta el número de repeticiones de colores en la secuencia. Por otro lado, aunque se consiguiera repetir el color de las carrocerías, habría que limpiar las tuberías cada cierta cantidad de carrocerías para evitar que se obstruyeran.

Hay pocos trabajos relativos a los objetivos de la sección de pinturas, cabe mencionar los trabajos (Andres et al., 2007; Guerre-Chaley et al., 1995), que se centran en la secuenciación

dinámica con el objetivo de producir vehículos consecutivos que tengan el mismo color. Existen trabajos que tienen en cuenta la existencia de líneas de retrabajo o reparaciones (García-Sabater et al., 2007; Li et al., 2007) que afectan directamente a la secuencia prevista en la línea. Experiencias anteriores parecen sugerir que la existencia de un almacén desde el que secuenciar unidades permite optimizar la secuenciación. (Spieckermann et al., 2004) utiliza una configuración de almacén con ocho líneas desde las que secuencia a la línea pinturas.

En el presente estudio se pretende proponer la mejor configuración física para un almacén que maximizara los objetivos marcados por la sección de pinturas.

## **2. Descripción de la sección de pinturas.**

Las plantas donde se pintan las unidades tienen unas características especiales, donde cualquier elemento extraño en el aire perjudica gravemente a la calidad de los procesos. Por ello generalmente toda la planta está presurizada para impedir la entrada de cuerpos extraños y los accesos se realizan a través de un sistema de doble puerta, para evitar la entrada de polvo o pequeñas partículas que puedan dañar la calidad.

El proceso, en una visión general, comprende tres fases:

- En la primera, se aplica un tratamiento anticorrosión y su posterior secado en horno. El tratamiento anticorrosión consta de dos fases consecutivas: Fosfatación y Cataforesis. Tras esta etapa se procede a un primer secado.
- En la segunda, se dota a la carrocería de una primera capa de pintura no necesariamente del color final del vehículo, tras esta etapa se encuentra otra fase de secado en hornos.
- En la tercera y última fase, se da al vehículo su color final y posteriormente se vuelve a pasar por hornos para su secado.

### **2.1. Planificación y control de operaciones en la sección de pintura.**

Desde el último almacén existente en la planta de carrocería se extraen las carrocerías para su pintado. El orden de extracción de éstas programará el orden de pintado. Más concretamente, indicará en cuántas ocasiones se debe producir un cambio de color.

Del mismo modo que por regla general el orden de salida de la planta de Carrocerías no coincide con el de inicio, habitualmente el orden de salida en la planta de pinturas no lo hace con el de entrada, ni evidentemente con el originalmente previsto. Este hecho es debido tanto a la existencia de almacenes de regulación, necesarios por el tiempo limitado de estancia en los baños y las limitaciones de los hornos (los productos no pueden quedarse parados en los hornos ni los hornos vaciarse repentinamente), la existencia de líneas paralelas, con posibilidad de paro independiente y con posibilidad de tener tiempos de ciclo distintos, y la no deseable existencia de recirculaciones debidas a imperfecciones.

En general, un modo fácil de incrementar las repeticiones es reduciendo el número de colores que cada día se pintan, pero eso provoca distorsiones graves en el consumo de componentes en la cadena de suministro.

La extracción de las carrocerías como generador de secuencia de operaciones en la línea de pintado, debe atender a dos objetivos simultáneamente:

- a) Cumplir el programa previsto.
- b) Reducir al mínimo los cambios de color.

En (Poler, 1999) se desarrolla un algoritmo que mejoraría la cantidad de repeticiones de modo dinámico. Este sistema podría generar una secuencia de colores con el objetivo de repetirlos, teniendo como restricción que debe existir en el programa de producción una carrocería con ese color. Monden en (Monden, 1998) indica que Toyota utiliza este otro procedimiento que minimiza derroches en el pintado gracias a la repetición de colores.

### **3. Planteamiento del problema.**

En el presente estudio se pretende proponer la mejor configuración física para un almacén que maximizara los objetivos marcados por la sección de pinturas de la planta estudiada. Es decir, cumplir con el programa previsto reduciendo al mínimo los cambios de color, tal y como se ha expuesto anteriormente.

#### **3.1. Medir la calidad de la secuencia.**

Existen tres modos básicos mediante los cuales medir la calidad del número de repeticiones. Son básicamente los mismos aunque a los usuarios les sugerían conceptos diferentes.

- Número de cambios de color frente a número de coches secuenciados.
- Número de “no cambios de color” frente a unidades secuenciadas.
- Tamaño de lote promedio. Es el método utilizado en la factoría donde se ha realizado el estudio y por tanto el utilizado. Evalúa el tamaño de cada lote de repeticiones. Hay que tener en cuenta que el tamaño máximo de lote es 5 ya que se hace necesario purgar cuando se han realizado 5 repeticiones.

El modo de gestión de partida del caso estudiado, permitía obtener un tamaño de lote de 1,6 coches. El tamaño de lote promedio si el sistema de secuenciación fuera estrictamente aleatorio sería de 1,4. Lo cual quiere decir que algunas acciones tomadas aguas arriba han producido efecto, aunque probablemente no el esperado.

#### **3.2. Factores externos.**

Los factores externos que afectan al funcionamiento de la secuencia y por tanto afectan al objetivo perseguido de maximizar el tamaño de lote son:

- Nº de colores: Existen gran cantidad de colores posibles pero los datos agregados para un mes indican la presencia casi despreciable de algunos colores. Pero cuando se analiza la producción día a día se percibe que sólo hay entre cinco y siete colores diariamente.
- Distribución de colores: Las distribuciones de presencia de los 7 colores no son homogéneas. Al analizar algunos días concretos se puede observar que la suma de la presencia de los 3 primeros colores oscila entre 63% y 81%.
- Parada de línea: La repercusión de las paradas de línea es alta en el caso de pretender lotificar colores, pues obligan a romper la secuencia. Los parámetros que representan las paradas de línea son tiempo medio entre fallos (MTBF) y tiempo medio de puesta en marcha (MTTR). Los valores estimados oscilan alrededor de los 600 segundos de MTBF y 40 segundos de MTTR. Posteriores análisis permitían dudar de la consistencia de estos datos.
- Reparaciones: Como se ha indicado anteriormente existe una realimentación a la línea de pinturas desde la línea de reparaciones. La unidad de medida en este caso es el número de reparaciones medio por día. En el caso estudiado se indica que se tienen 80 reparaciones por día de valor promedio, aunque se indica también que este número es muy variable.

### 3.3. Factores de diseño.

Los factores que pueden ser modificados con tal de obtener un mejor resultado en cuanto a las repeticiones en las líneas de laca son:

- Configuración física: Se plantean diferentes configuraciones con la utilización de almacén a la entrada de las líneas de pintura, utilización de almacén en segunda planta, aumentar el número de mesas móviles en paralelo, etc.
- Procedimiento de secuenciación: De él depende la posibilidad de conseguir lotes teóricos de 5 coches. Se trata del componente que más va a influir sobre el resultado final, es decir, sobre la posible mejora del lote medio. Control de las unidades que provienen de la línea de reparaciones.

## 4. Configuraciones físicas estudiadas.

Se indican a continuación las tres configuraciones analizadas así como la situación de partida.

### 4.1. Situación de partida.

En la configuración inicial de la planta estudiada (Figura 1) los automóviles proceden de las líneas de la sección de preparación. En paralelo a la línea 3 existe un conveyor que proviene de la sección de reparaciones y de la que no se hace, en el momento de iniciar este estudio, ningún tipo de control, de tal modo que en el momento en que una unidad está lista se introduce inmediatamente en la línea.

Durante la noche sólo funcionan dos líneas de laca. En paralelo a la línea 3 se produce la entrada desde la sección de reparaciones. Es interesante destacar que las mesas que unen Laca 2 y Laca 3 son necesariamente reversibles para poder enviar los coches de reparaciones hacia Laca 2 si el mantenimiento nocturno se hace sobre Laca 3.

La presencia de la línea de recirculación de la línea de reparaciones dificulta conocer la secuencia de unidades que van a llegar al almacén, pero por otro lado permitiría que fuera utilizado para mejorar el tamaño de lote adecuado.

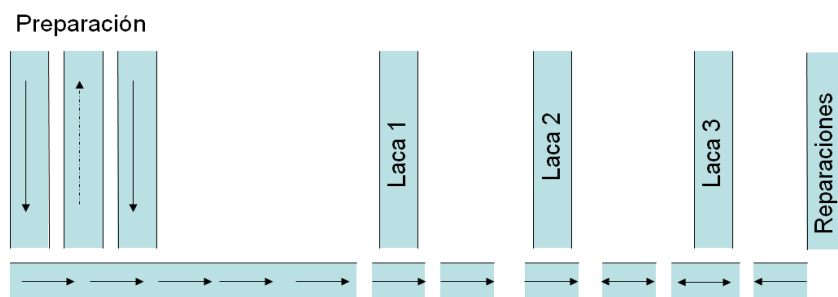


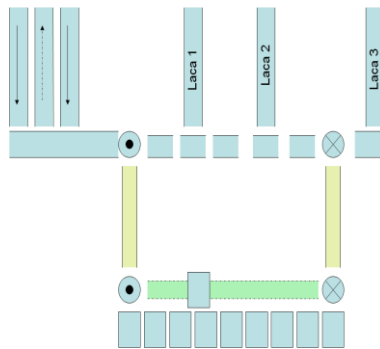
Figura 1. Configuración inicial.

### 4.2. Primera configuración analizada: Ascensores.

La idea inicial (Figura 2) consistía en la realización de un buffer o almacén situado en la segunda planta para controlar las entradas en las líneas de pintura. De este modo, se podría gestionar desde el buffer y mediante un algoritmo, la mejor secuencia de coches para aumentar el número de repeticiones en cada línea.

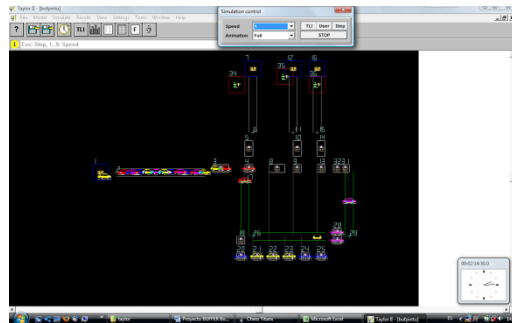
El funcionamiento del buffer mediante mesas móviles también se consideró como otro dato sin posibilidad a cambiar. Únicamente se podía variar el número de mesas o tamaño de buffer y la colocación de los ascensores que comunican con el buffer (El primero situado delante o

detrás de la L1 y el segundo delante o detrás de la L3). Desde el almacén se podrían alimentar una o dos líneas.



**Figura 2.** Configuración con ascensores.

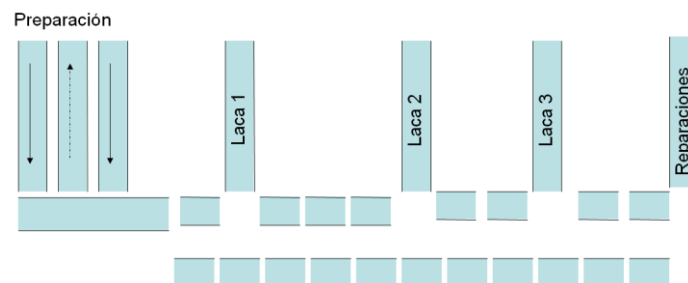
Para esta configuración se hizo un completo análisis experimental (Figura 3) que (dado que su utilidad es reducida) no se ha adjuntado. Basta decir que el sistema era mucho más complicado puesto que las decisiones a tomar eran más complejas y más vinculadas entre ellas. Aunque se conseguía aumentar el número de repeticiones la inversión económica y la complejidad que suponía no se veían justificadas respecto a otras alternativas utilizadas.



**Figura 3.** Simulación de la Configuración con Ascensores.

#### 4.3. Segunda configuración analizada: Mesas móviles en paralelo.

En esta configuración (Figura 4) la idea era aumentar el número de mesas móviles en paralelo, teniendo de este modo más posibilidades para gestionar la entrada a la línea de lacas (En vez de una entrada, tiene 3 entradas posibles para cada línea). Se trata de una alternativa más barata que la anterior ya que no haría falta construir ascensores ni realizar un almacén en voladizo. Esta configuración tiene muy poca maniobra de control, además no se podría llevar a cabo por problemas de geometría.



**Figura 4.** Configuración con Mesas Móviles.

#### 4.4. Tercera configuración analizada: Almacén a la entrada de lacas.

El almacén (Figura 5) se propone a la entrada de las líneas de lacas en la factoría de automóviles estudiada que se pretende modificar, con tal de mejorar el número de

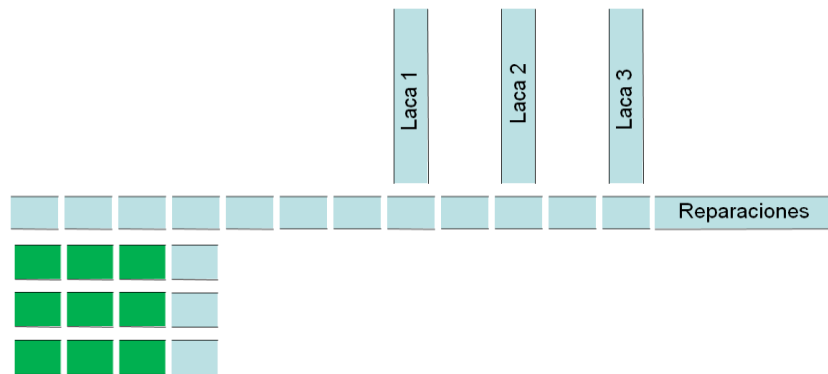
repeticiones de color en las líneas de laca. Se compone de mesas que van a transportar los coches y va servir de conexión entre la línea de lacas y la línea de pintura.

El almacén regulador se situaría a la salida de las líneas de preparación. Tendría capacidad para alrededor de 12 coches de los cuales serán secuenciables 5 ó 6 dependiendo del modo de gestión del almacén.

El almacén estaría lejos de las líneas de laca (entre 7 y 10 coches). Esto impide que se puedan tomar decisiones teniendo en cuenta las circunstancias puntuales de las líneas como paradas o introducción desde reparaciones.

El almacén, para su correcto funcionamiento debiera tener bien calibrado el mecanismo de selección de colores en función de las últimas unidades extraídas, del turno de trabajo, de los colores a secuenciar en un futuro próximo.

Denominamos distribuidor de entrada a la línea que distribuye las unidades a las líneas. En principio dicho distribuidor recibe las unidades y coloca en cada una de las líneas. En ausencia de paradas o interrupciones el modo de trabajo del almacén no afecta al resultado final, así pues sería aceptable utilizar el distribuidor de entrada al modo convencional, esto es, absolutamente lleno de coches.



**Figura 5.** Configuración con Buffer a la entrada de las líneas de laca.

## 5. Estudio experimental realizado.

Se pretende proponer la mejor configuración física para un almacén que maximizara el tamaño de lote. Se han evaluado las tres configuraciones expuestas anteriormente, así como la configuración original. Dado que diferentes factores externos influyen en la calidad de la secuencia obtenida se ha diseñado un sistema que evalúa la bondad de cada configuración en función de los factores externos.

La simulación del proceso se ha realizado con un programa de simulación de eventos discretos.

### 5.1. Plan de experimentación.

Interesa conocer el efecto que tienen los siguientes factores externos: Número de unidades provenientes de la línea de reparaciones, tiempo de parada de cada línea, número y distribución de los diferentes colores. Para cada uno de los factores se han analizado diferentes valores con tal de analizar su sensibilidad y con vistas a posibles cambios en la planta debido a la introducción de un nuevo modelo en la línea. Así mismo se ha pretendido analizar el comportamiento del sistema con control y sin control en la alimentación de la línea de reparaciones.

El número (y su definición) de los escenarios diferentes analizados para cada factor es el siguiente:

- Número de colores: 5, 7 y 10.
- Distribuciones de colores: Para obtener los valores se han elegido las proporciones de los datos de los que se dispone de la planta estudiada, habiendo incorporado cuatro más, para analizar la sensibilidad convenientemente. En total, se dispone de 11 distribuciones diferentes.
- Número de reparaciones media por día: 40, 80, 160.
- Duración de cada parada de línea y tiempo transcurrido entre paradas: 0, 40 y 80 segundos con un periodo de 300 y 600 segundos en producirse cada parada.
- Con control del sistema de reparaciones y sin control en el sistema de reparaciones.

El recorrido de cada simulación (Figura 6) es de 10 días a 24 horas por día. El análisis de transitorio indica que el lote medio se estabiliza a partir del segundo día.

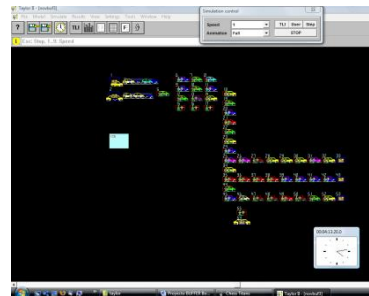


Figura 6. Simulación de la configuración propuesta.

## 6. Análisis de Resultados.

Se presentan brevemente algunos de los resultados obtenidos para la configuración física finalmente seleccionada (almacén a la entrada de las líneas de lacas). No se muestran el resto de resultados por razones de espacio. Los resultados de las otras dos configuraciones permitían también aumentar el número de repeticiones pero se descartan dichas configuraciones por motivos de complejidad e inversión económica que no son justificados con los resultados obtenidos.

Se ha analizado el comportamiento con dos líneas (el correspondiente a la noche) y es muy similar al del día. Por ello en todas las simulaciones se han considerado siempre 3 líneas, puesto que no aportaba valor proporcional al esfuerzo que había que realizar para poder simular esta situación.

- Número de colores

A más cantidad de colores la posibilidad de repetición se reduce considerablemente.

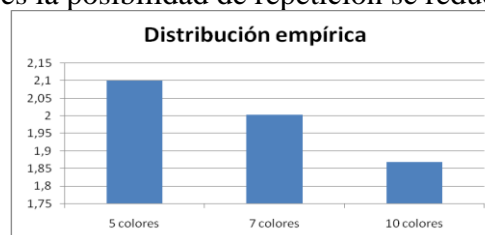
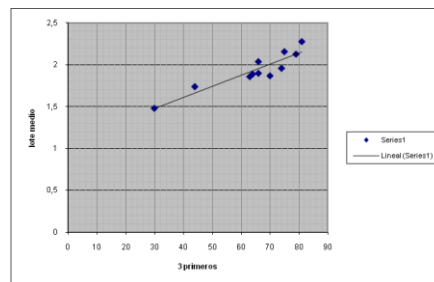


Figura 7. Tamaño de lote Vs. Número de colores

- Distribución de colores.

Se ha analizado según la presencia de los 3 colores más importantes. La relación (Figura 8) entre la suma de los tres colores más frecuentes y el lote medio es aproximadamente lineal, por tanto a medida que aumenta la diferencia de porcentaje entre colores ganamos en número de repeticiones.



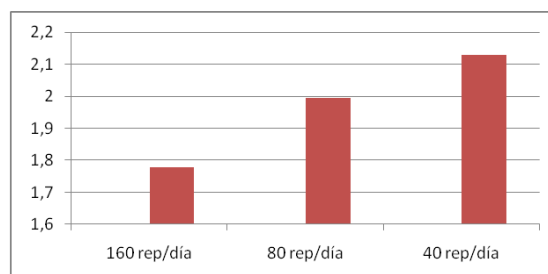
**Figura 8.** Suma de los tres colores más frecuentes Vs Lote medio.

Cabe destacar que habría que evitar las distribuciones homogéneas ya que se comprueba que debilita el proceso como se aprecia en la Tabla 1. Se han tomado como referencia 1000 segundos de duración por reparación y una duración de la parada de línea de unos 600 segundos con una frecuencia de 40 segundos en producirse cada parada, sin control de reparaciones.

**Tabla 1.** Tamaño de Lote obtenido para las 11 distribuciones planteadas.

Distribución Colores	Tamaño Lote
10 colores (10%,10%,10%,10%,10%,10%,10%,10%,10%,10%)	1,48
10 colores (35%,25%,10%,10%,5%,5%,5%,3%,1%,1%)	1,87
7 colores (40%,25%,16%,13%,4%,1%,1%)	2,28
7 colores (23%,21%,20%,15%,13%,5%,4%)	1,89
7 colores (15%,15%,14%,14%,14%,14%,14%)	1,74
7 colores (23%,21%,20%,15%,13%,5%,3%)	1,90
7 colores (27%,23%,13%,12%,11%,8%,6%)	1,86
7 colores (35%,25%,14%,10%,6%,6%,4%)	1,96
7 colores (41%,20%,18%,9%,6%,4%,2%)	2,13
5 colores (26%,22%,18%,18%,16%)	2,04
5 colores (32%,28%,25%,9%,6%)	2,16

- Número de reparaciones: Los tiempos de reparación tienen una repercusión directa en el tamaño del lote medio ya que los coches reparados son enviados a la línea 3 una vez acabados sin consideraciones de colores ni de ningún tipo. A medida que aumente el número de unidades que entran por reparaciones el resultado será peor.

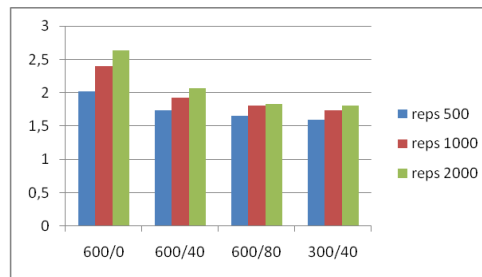


**Figura 9.** Tamaño de lote vs. Reparaciones/día.

- Paradas de línea: Se comprueba que el número de repeticiones se ve afectado tanto por la duración como por frecuencia en que se producen dichas paradas. La línea, en condiciones normales, se para cada 600 segundos con una duración de 40 segundos aproximadamente.



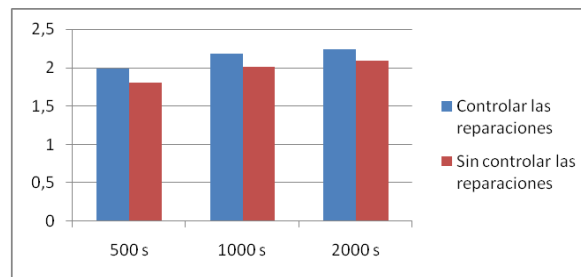
Para esas condiciones, el modo de aumentar el tamaño de lote es reduciendo el número de reparaciones por día o, principalmente, reducir el tiempo de parada.



**Figura 10.** Tamaño de lote Vs. Tiempo de parada para diferentes frecuencias de parada.

– Gestión de las reparaciones

Otra posibilidad a contemplar es realizar un control de reparaciones para paliar el problema de mandar coches a la línea 3 sin ningún criterio (automático). Una posible solución es introducir una máquina que gestione la salida a la línea 3, pudiendo almacenar 2 coches y decidiendo el momento adecuado para lanzar el coche y mejorar el lote medio.



**Figura 11.** Tamaño de lote Vs. Tiempo de reparaciones Sin control y Con Control.

Se ha comprobado la mejora de este sistema con datos reales, obteniendo que el control de las reparaciones supone un aumento en el lote medio de 0,2.

Los experimentos muestran que la gestión de la introducción de reparaciones puede ser crítico en la obtención de resultados. En los experimentos se ha comprobado que una gestión simple: sacar la unidad de reparaciones cuando el color del coche a introducir en la línea 3 coincida con el color que sale o que va a entrar en la línea 3 (excluyendo el caso en el que el color del que sale y el que entra sea el mismo) o si hay dos coches esperando.

El resultado mejoraría si al realizar dicha extracción se pudiera enviar no sólo a la línea 3 sino también a la línea 2 (el motivo es que reduce a la mitad el número de interrupciones de la secuencia).

**7. Conclusiones.**

La planta estudiada intentaba la repetición de colores aguas arriba de reparaciones y se ha comprobado que esta secuenciación no afecta sustancialmente a la línea de lacas. Además de realizar la secuenciación más cerca de la entrada a las líneas de lacas, para llevar a cabo el aumento del número de repeticiones hay que realizar una gestión adecuada de los elementos y medios del sistema (almacén, reparaciones y paradas).

Después del estudio, análisis y simulación del proceso, los resultados indican que la mejora del tamaño de lote es factible. De hecho, con los datos reales que se manejan actualmente en la planta y sin atender a las especificaciones descritas anteriormente se puede llegar a obtener un tamaño de lote alrededor de 2 que incrementaría en un valor de 0,4 el lote actual en la línea de pinturas.

Además, si se trabaja en perfeccionar la gestión de los elementos y medios del sistema es razonable pensar que se pueden llegar a obtener tamaños de lote de 2,2, que representarían una importante mejora, y conllevarían una reducción de costes para la planta.

## Referencias

- Andres, C., Garcia-Sabater, J. J., Garcia-Sabater, J. P., & Miralles, C. (2007). Secuenciación en procesos cíclicos de pintura. Modelos y Heurísticas..
- Cordeau, J. F.; Laporte, G.; Pasin, F. (2008). Iterated tabu search for the car sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, n° 3, pp. 945-956.
- Gagne, C.; Gravel, M.; Price, W. L. (2006). Solving real car sequencing problems with ant colony optimization. *European Journal of Operational Research*, Vol. 174, n° 3, pp. 1427-1448.
- Garcia-Sabater, J. P., Andres, C., Garcia Sabater, J. J., & Miralles, C. (2007). A Decision Support System for Scheduling a Painting Facility in an Automotive Supplier, in [mistaconference.org](http://mistaconference.org).
- Garcia-Sabater, J. P., Miralles, C., Andres, C., & Jamous, S. (2008). Batch cyclic scheduling with setups in an Automovil Sector Supplier. A case study, in XII CLAIO Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa.
- Guerre-Chaley, F., Frein, Y., & Bouffard-Vercelli, R. (1995). An efficient procedure for solving a car sequencing problem., in *Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 385-393.
- Joly, A.; Frein, Y. (2008). Heuristics for an industrial car sequencing problem considering paint and assembly shop objectives. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 55, n° 2, pp. 295-310.
- Li, J. S.; Blumenfeld, D. E.; Marin, S. P. (2007). Manufacturing system design to improve quality buy rate: An automotive paint shop application study. *Ieee Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 4, n° 1, pp. 75-79.
- Monden, Y. (1998). *Toyota Production System. An integrated Approach*, 3 ed. Engineering and Management Press
- Myron, D. L. (1996): *Paint Blocking in Ford In-Line Vehicle Sequencing Environment*, MIT-USA.
- Poler, R., Garcia-Sabater, J. P., Rodriguez, A., & Lario, F. C. (1999). Un algoritmo greedy para la agrupación de colores en la secuencia maestra de una empresa de automoción, in III Jornadas de Ingeniería de Organización.
- Solnon, C.; Cung, V. D.; Nguyen, A.; Artigues, C. (2008). The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, n° 3, pp. 912-927.
- Spieckermann, S.; Gutenschwager, K.; Voss, S. (2004). A sequential ordering problem in automotive paint shops. *International Journal of Production Research*, Vol. 42, n° 9, pp. 1865-1878.