

Study of the configuration of a pre-assembly plant using maximum fill levels of units' options

Estudio de la configuración productiva de una planta de pre-montaje de unidades aplicando parámetros de presencia máxima de opciones

Julien Maheut^a, Joan Morant Llorca^b y José P. Garcia-Sabater^c

^aJulien Maheut (Universidad Europea de Valencia, C/ General Elio 2, 46010 Valencia (Spain), julienphiliped@uem.es), ^b Joan Morant Llorca (Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia (Spain), joamollo@upv.es) and ^c José P. Garcia-Sabater (Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia (Spain), jpgarcia@upv.es).

Recibido: 2014-11-17 Aceptado: 2015-01-26

Abstract

In this paper, a "pull" system to solve the problem of sequencing homogeneous units is defined. The literature and practice usually address this problem of "Push" mode in which an intelligent system calculates the next unit that the system must produce according to what is available. The proposed method suggests that the plant is fed with production orders (unit by unit) versus those that remain in the plant (or rather those than miss). The case study of an assembly factory in which a new pre-assembly plant with parallel lines and alternate routings and pull off tables prior to the final assembly plant is introduced. The impact of restricting the number of units that receive high operating cycle time in the system considering different indicators are studied. It is proposed to analyze the levels, theoretically considering both physical space as existing times in the system. Finally, an analysis through a simulation based on discrete events with Simio Simulation Software® is proposed.

Keywords: Assembly line, Automotive Industry, Simulation, Fill Level, Pull System.

Resumen

En este artículo, se define un sistema "Pull" para resolver el problema de secuenciación de unidades homogéneas. La literatura y la práctica abordan habitualmente este problema de un modo "Push" en el que un sistema inteligente calcula la siguiente unidad que el sistema debe producir en función de lo que tiene disponible. El método propuesto plantea que se alimente la planta con órdenes de fabricación (unidad a unidad) en función de las que permanecen en la planta (o más bien de las que faltan). Se plantea el caso de una planta de montaje en la que existe una planta de pre-montaje previa a la línea de montaje con líneas en paralelo y ruteos alternativos así como operaciones que se realizan en estaciones ubicadas fuera de la línea. Se estudiará el impacto de restringir la cantidad de unidades que reciben operaciones de alto tiempo de ciclo en el sistema considerando diferentes indicadores. Se propone analizar los niveles de manera teórica considerando tanto los espacios físicos como los tiempos existentes en el sistema. Por último, se propone un análisis a través de una simulación basada en eventos discretos con Simio Simulation Software®.

Palabras clave: Línea de montaje; Automóvil; Simulación; Nivel de Presencia, Sistema Pull.

Introducción

El problema de secuenciación de unidades homogéneas consiste en definir el orden en el cual unas variantes de unidades deben pasar por un punto determinado (Valero-Herrero, García-Sabater, Hernández, & Maheut, 2011). Se consideran según la literatura tres tipos básicos de problemas (Bautista & Cano, 2011):

- Problema de secuencia con mezcla de modelos (*Mixed-Model Sequencing Problem, MMSP*). Esta tipología la constituyen los problemas donde se intenta programar la producción en un tiempo determinado con el objetivo de reducir al mínimo la sobrecarga de trabajo sobre el promedio, con el uso de recursos adicionales si es necesario (Bautista, Cano, & Alfaro, 2012).
- Problema de Secuenciación de Coches (*Car Sequencing Problems, CSP*). Pertenecen a este tipo aquellos problemas que intentan conseguir una secuencia mediante reglas que restringen la secuenciación consecutiva de opciones especiales para vehículos que circulan por una línea de montaje. En 2009, Boysen et al. (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2009) presentan una exhaustiva revisión del CSP.
- Problema de nivelación de secuenciación (*Level Scheduling, LS*). Los problemas que pertenecen a este tipo son aquellos cuyo objetivo es la obtención de secuencias que pretenden la regularidad en la aparición de opciones, en el consumo de componentes o partes, o de regularidad en las cargas de trabajo requeridas por las unidades en el tiempo (Drexel, Kimms, & Matthießen, 2006; Garcia-Sabater, Maheut, & Garcia-Sabater, 2012).

Siendo los tres casos relevantes, tanto la literatura como la aplicación práctica se han concentrado en el problema que ha sido denominado CSP. Se trata de bloquear la aparición de modelos en unas ventanas dadas de coches y esto se consigue a través de los ratios de tipo $M:L$ a características de vehículos. Un ratio de tipo $M:L$ supone que no debería haber más de M vehículos con la opción considerada en una ventana de L coches consecutivos. En otros casos, se puede considerar restricciones de tipo $m:l$ donde se penaliza que haya menos de m coches con una característica dada en una ventana de l coches consecutivos (Valero Herrero & Molina Morte, 2012).

Sin embargo, en la realidad industrial, existen casos donde estas reglas no pueden resolver la regularidad buscada. Es el caso de líneas en paralelo donde existen ruteos alternativos juntos con tiempos de operaciones dependientes de las características del vehículo (Maheut, Besga, Uribechebarria, & Garcia-Sabater, 2014). En la literatura estudiada tampoco se ha encontrado una referencia donde se aborde el efecto de tener estaciones de trabajo aisladas del flujo de coches. En esos casos, la definición de la secuencia es una tarea diferente ya que la aplicación de restricciones de tipo $M:L$ o de tipo $m:l$ no se puede aplicar ya que el orden de los productos se ve alterado de forma difícilmente controlable.

En este caso de estudio, un almacén de tipo ASRS (*Automated Storage & Retrieval System*) recibe unidades de una planta de pintura y las almacena antes de enviarlas a la línea de montaje. El sistema que gestiona el almacén es responsable de enviar unidades en una secuencia dada con el fin de conseguir una secuencia “la mejor posible” que debe ser construida en un punto situado a la entrada de una planta de montaje. Es una característica especial de este caso de estudio que entre el ASRS y la planta de montaje, existe una planta de pre-montaje donde se envían las unidades que necesitan recibir un conjunto de operaciones específicas que requieren un tiempo de ciclo mayor que el tiempo de ciclo de la línea. Las unidades que no tienen que recibir estas operaciones pasan directamente por una línea *By-pass* que los envía a

la planta de montaje, evitando la planta de pre-montaje. En la actualidad un sistema de información que incluye un algoritmo secuenciador es el que se encarga de definir la secuencia tanto para la planta de “pre-montaje” como para la línea. El modo de cálculo es un sistema *Push* donde las unidades que pasan por la planta de pre-montaje se tienen que enviar con antelación con el fin de llegar a tiempo al punto de unión de las secuencias. Es la secuencia obtenida en este punto de unión la que es medida según las restricciones de tipo *M:L* y/o *m:l*.

La principal circunstancia que desembocó en un modo alternativo de trabajar es que debido a la configuración productiva de la planta de pre-montaje, pueden ocurrir casos en los cuales se producen bloqueos debido a una acumulación de unidades que están esperando recibir una operación bloqueando el acceso a otras líneas que están en paralelo.

Con el fin de evitar situaciones de bloqueo la sub-secuencia formada por las unidades que van a ser trabajadas en la “planta de pre-montaje” debería tener una serie de características especiales.

Se trata pues de definir un modo de construir una secuencia que alimente a la línea de montaje y reduzca al mínimo las incidencias, maximizando la producción. Se propone en este trabajo un modo de gestión en el que un conjunto de valores denominados “*Maximum Fill Levels*” (FLM) o en castellano “Nivel Máximo de Presencia” limitará la presencia relativa en la subsecuencia de determinadas opciones. Además se propone en este artículo una evaluación del impacto de considerar este nuevo modo de secuenciar, y por tanto de estos niveles de presencia máximos, en los niveles de productividad del sistema sin distorsionar la mezcla de producción prevista y que permita conseguir el objetivo último de conseguir que las unidades que pasan por pre-montaje lleguen a tiempo en el punto de unión y generen una secuencia adecuada.

El método pretende definir los FLM's de cada operación para las unidades de pre-montaje de la forma siguiente: se cuenta el número de unidades que deben recibir una operación dada presentes en la cola de retirada del ASRS hasta el lector más próximo posterior a la estación de trabajo. Como cualquier unidad que pasa por un lector está identificada, se puede saber en cualquier momento, cuántas unidades están pendientes de recibir esta operación. El FLM tiene en consideración unidades que han sido físicamente secuenciadas pero también unidades que están en cola de retirada. El cálculo del FLM asociado a cada operación de pre-montaje no es evidente y una mala definición del mismo puede afectar la productividad del sistema.

De este modo, las reglas que alimentan de unidades la denominada línea de pre-montaje no serían reglas clásicas de separación de opciones, sino un esquema de tipo kanban en el que a la planta se le da la autorización de fabricar otra unidad con una determinada opción si el número de unidades con esa opción es menor que una cierta cantidad.

Para poder establecer estos valores máximos de referencia es necesario conocer diferentes elementos del sistema y aplicarles un determinado procedimiento. El procedimiento incluye un cálculo previo teórico que orienta el necesario estudio de simulación que se propone a continuación. Si los valores de FLM son demasiado altos el sistema se bloqueará en los cruces y líneas compartidas. Si los valores de FLM son demasiado bajos, el sistema no será suficientemente alimentado y producirá una pérdida relevante de productividad.

El resto del trabajo se estructura como sigue: en primer lugar se describirá la planta de pre-montaje y a continuación los tipos de unidades que se consideran en el ejemplo que se sigue como caso de estudio. Posteriormente se definen tres juegos de valores que se concretan para el caso. Finalmente se desarrolla una simulación antes de extraer conclusiones.

Descripción de la planta de pre-montaje

En ocasiones hay tareas que no pueden ser desglosadas para dar lugar a operaciones de tiempo de ciclo menor que la de la línea de montaje. En algunos casos esas estaciones se pueden “doblar”, esto es disponer dos (o más) juegos de recursos (equipamiento y personal) para realizar la misma operación, lo cual puede ser inasumible por su coste.

Un modo de resolver el problema es sacar la operación de la planta de montaje y asignarla a una planta de pre-montaje, dónde se realizan los procesos de ensamblaje que necesitan sobre todo las operaciones con mayores tiempo de ciclo de la línea. Incorporar esas operaciones en la línea de montaje podrían ralentizar el flujo productivo en la línea de Trim o de Chasis.

La planta de pre-montaje objeto de estudio se diseñó para montar los techos solares atornillados o pegados, que por su tamaño sólo pueden ser ensamblados mediante robots que serían muy caros de duplicar. Aprovechando la instalación se han incorporado otras operaciones que así se podrán realizar fuera de línea de montaje, mejorando con ello su eficiencia. Actualmente, un total de 6 operaciones se ejecutan en dicha planta. En la figura 1.1, se presenta la configuración productiva del sistema dónde, a la salida del ASRS, las unidades llegan a una mesa de distribución que se denominará “*split point*”. En este punto, las unidades que tienen que recibir operaciones en esa instalación de montaje irán a la misma y los demás irán al *By-pass* que les conducirá al punto donde se juntarán con las unidades que llegan desde la planta de pre-montaje. Cuando la entrada de la planta de pre-montaje o el *By-pass* están bloqueados, las unidades se recircularán para volver a entrar en el ASRS.

Es de destacar también que el ASRS es un almacén automático con 4 pasillos. Con el fin de evitar pérdidas de productividad ligadas a la gestión de colas, el ASRS necesita tener un listado de varias extracciones pendientes de realizar (que se denominará “cola de retirada”) en el que coinciden unidades que van hacia el *By-pass* y unidades que van a la denominada “planta de pre-montaje”.

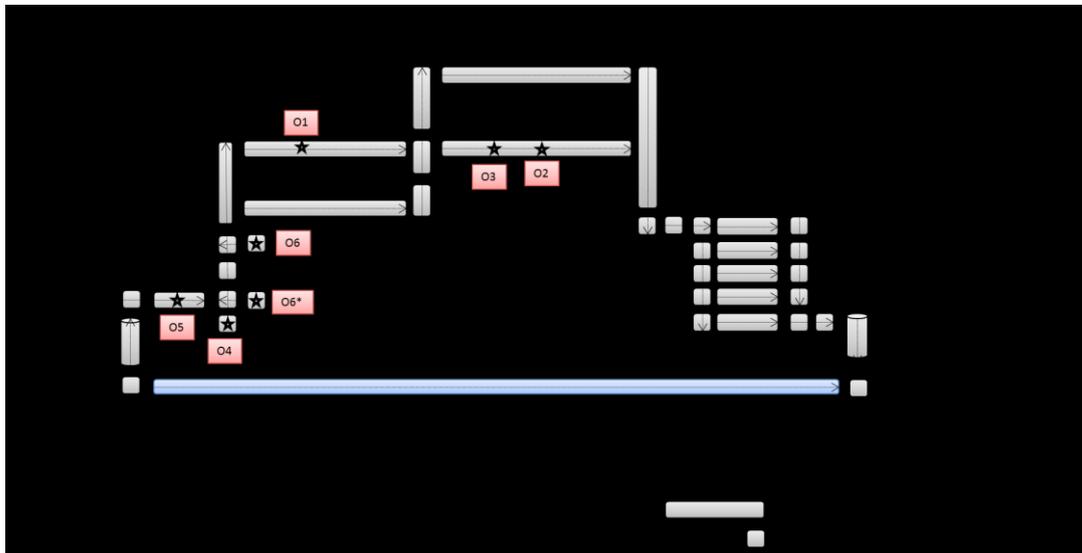


Figura 1.1. Configuración productiva del sistema

La planta de pre-montaje se compone de diferentes etapas:

- Una línea continua hecha de mesas transfer.
- Una línea continua con mesas de apoyo (*pull-off tables*) en los laterales para algunas operaciones.
- Un desdoblamiento de línea dónde se realizan procesos que no pueden ir en el mismo modelo. Este tramo tiene una forma de 8.
- Un almacén de reordenación de unidades compuesto por un cierto número de líneas en paralelo con varias posiciones en cada línea.
- Una línea continua y única.

En esta planta de montaje, actualmente existen 6 mesas de operación, una de ellas es en realidad una mesa de apoyo a una operación dónde se espera a que la mesa de destino se libere para poder sea tratada (O6*).

Las operaciones se realizan en estaciones de trabajo dónde interactúan operarios y robots. La gestión de los recursos humanos no se considera en este estudio ya que se asume que no son un cuello de botella. Sin embargo, los robots sufren fallos que junto a sus correspondientes bloqueos conducen a la pérdida de efectividad del sistema.

Los fallos son independientes entre cada máquina y dos parámetros utilizados en la empresa pueden ser considerados: el MTTR (Tiempo Promedio de Reparación) y la Disponibilidad de máquina. El MTBF (Tiempo Promedio entre Fallos) se puede calcular a partir de estos dos datos.

Según un estudio realizado por la planta, tanto el MTBF como el MTTR se pueden representar según una ley de Distribución Weibull de parámetros $\alpha=1$ para ambos tiempo y con $\beta=15\text{min}$ para MTTR y $\beta=1$ día para MTBF.

El sistema estudiado dispone de unos lectores que permiten saber en cada momento que unidades han pasado por unas zonas determinadas.

Análisis de la mezcla de producción de unidades esperadas

Un juego de datos básico en el análisis propuesto es el porcentaje de unidades de cada tipo, y la presencia relativa de modelos y opciones que se tiene con la demanda prevista.

Análisis de la mezcla global

La mezcla de producción se puede estudiar considerando los aspectos siguientes:

- Por Destino (Trim A o Trim B)
- Por Ruteo (Unidades de Pre-montaje o Unidades sin Pre-montaje)
- Por modelo (Berlina, Ciudadina, Familiar)
- Por variante de unidades
- Por opción

En la figura 1.2 a continuación, se plantea un posible escenario en el que el 33% de las unidades tendrán que pasar por la planta de pre-montaje (en adelante planta PPM) mientras que el resto irá directamente a la planta de montaje a través del *By-pass* para entrar en los Mezzanines de Trim.

Las unidades de la PPM se pueden dividir en 4 modelos y cada modelo se puede dividir en variantes. Según la previsión, 11 variantes distintas pasarán por la planta PPM. La mezcla de unidades se presenta en la figura 1.2 a continuación.

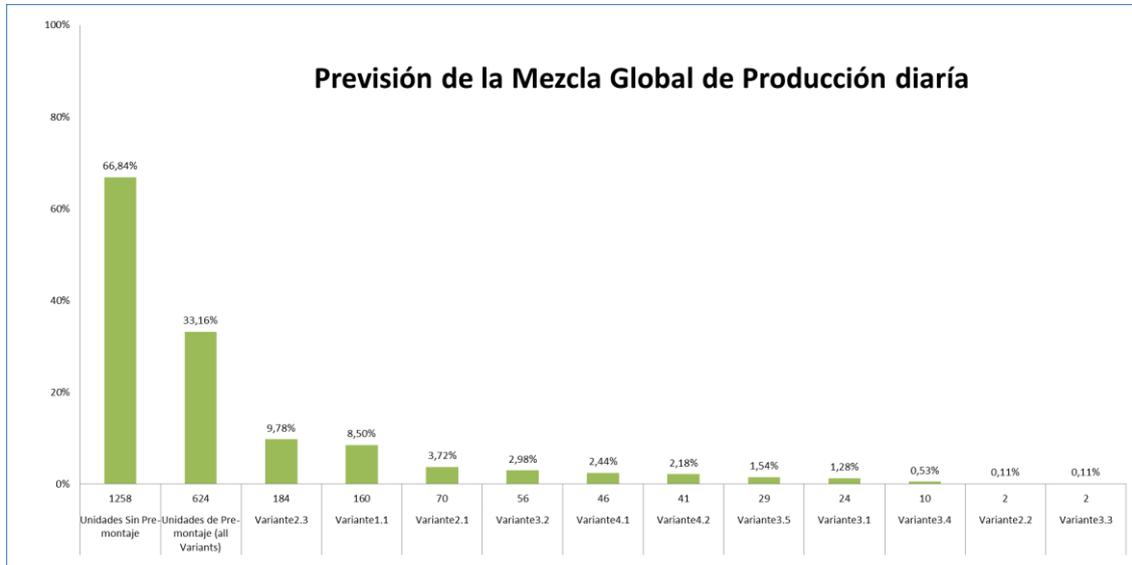


Figura 1.2. Previsión de la mezcla global de producción diaria

Análisis de la mezcla de unidades para pre-montaje

Como se ha visto anteriormente, un promedio de 1 de cada 3 unidades que se extraerá del ASRS pasará por la planta PPM. Es pues interesante ver como se distribuyen estas variantes de unidades.

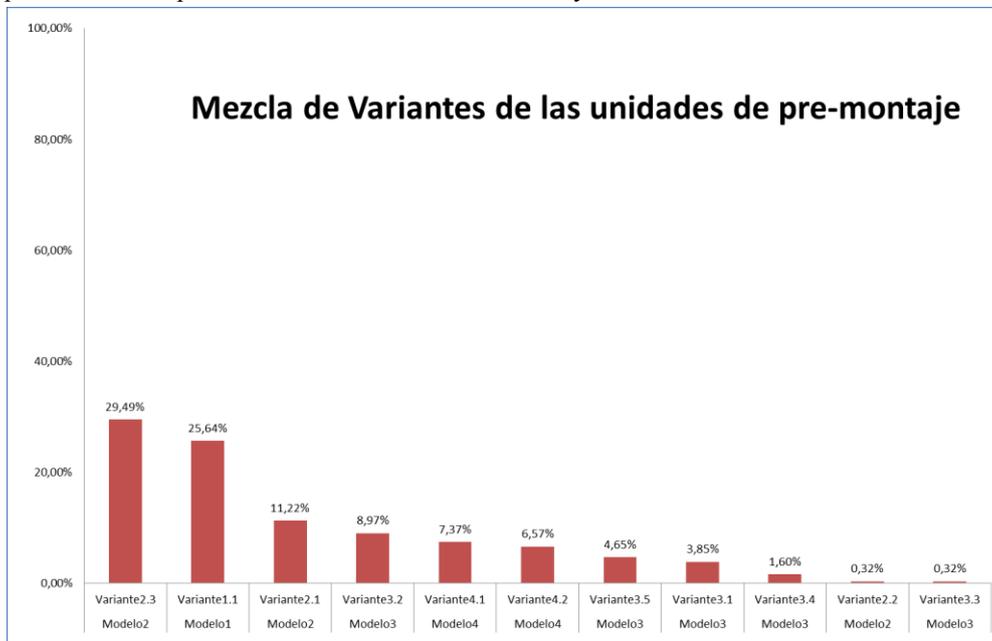


Figura 1.3. Mezcla de producción diaria en la planta PPM

Se puede apreciar que dos variantes representan el 55.13% de las unidades que pasan por la planta PPM y cinco variantes representan el 89.26% de los productos.

Análisis de la mezcla de producción en función de las operaciones de la planta de pre-montaje

Como se ha comentado que cada variante tiene por lo menos una operación a recibir en la planta PPM, es interesante estudiar la mezcla de operación que se tendrá que realizar en la planta.

Para entender el concepto de FLM por operación, es pues interesante analizar la mezcla de producción por operación. A continuación, en la tabla 1.1, se puede apreciar que la mitad de las unidades que entran por la planta PPM pasan por la operación O1 y que casi un tercio pasan por O2.

Tabla 1.1. Previsión de la mezcla de operaciones a realizar en la planta PPM

Operación	Mezcla Global	Mezcla de Pre-montaje	Número de Operaciones por Día
O1	16.21%	48.88%	305
O2	9.88%	29.81%	186
O3	5.37%	16.19%	101
O4	4.89%	14.74%	92
O5	2.18%	6.57%	41
O6	0.64%	1.92%	12

Sin embargo, gracias al análisis de las especificaciones de las unidades (figura 1.4), se puede ver que la mayor parte de las unidades reciben solamente una operación en la planta PPM (82.21%) y que sólo el 0.3% reciben más de dos operaciones.

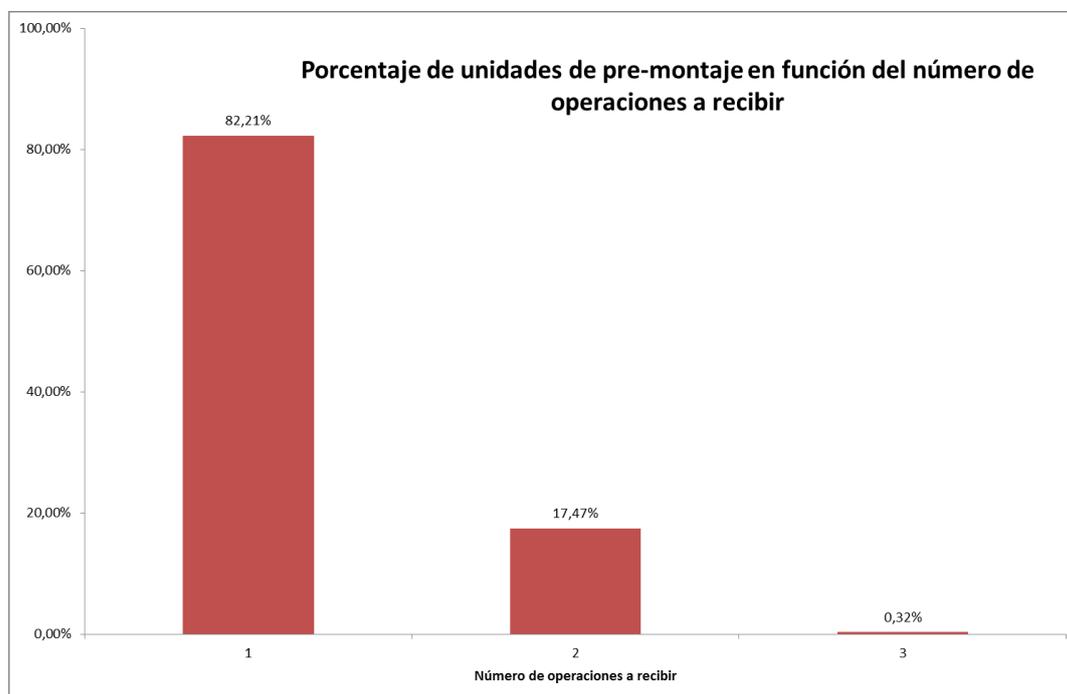


Figura 1.4. Proporción de unidades que reciben un número dado de operación en la planta PPM

Solamente cinco variantes de los once reciben más de una operación en la planta:

- Variante 3.2 : O1 + O4 [56 unidades al día]
- Variante 4.2 : O1 + O5 [41 unidades al día]
- Variante 3.4 : O6 + O4 [10 unidades al día]
- Variante 2.2 : O3 + O2 [2 unidades al día]
- Variante 3.3 : O1 + O6 + O4 [2 unidades al día]

Otro análisis interesante de la mezcla de producción consiste en ver como como los modelos tienden a tener operaciones recurrentes. En la figura 1.5, se observa por ejemplo que el modelo 1 y siempre recibe la operación O1. El modelo 4 siempre recibe la operación O1 y la mitad recibe O5.

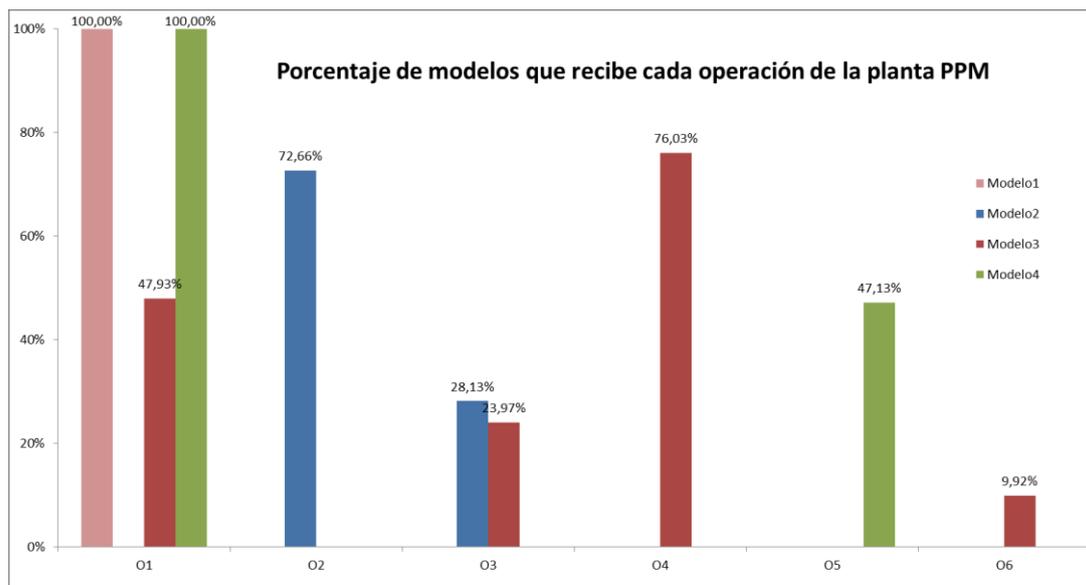


Figura 1.5. Proporción de modelos de unidades que recibe cada una de las operaciones de la planta PPM

Análisis teórico de los FLMs por operación en la planta de pre-montaje

Con el fin de calcular los FLMs por operación, se realizará varios estudios de tipo analítico para poder contrastar los resultados con la simulación. El primer enfoque consistirá en estudiar la presencia de modelos en función de la capacidad física de la planta. Un segundo enfoque consistirá en calcular estos niveles en función de los tiempos de tránsito. Estos dos valores permitirán conocer los valores de referencia sobre las unidades que debiera haber en el sistema para garantizar que el mix previsto se está produciendo. Otros dos valores marcarán la referencia sobre la cantidad a partir de la cual se puede producir un bloqueo cuando una situación de parada inesperada ocurra.

Estos resultados analíticos permitirán contrastar y validar los resultados a través de la simulación basada en eventos discretos donde se considerará la lógica real del sistema.

Calculo de la presencia de modelos por posiciones/espacio disponible

El primer enfoque analítico para el cálculo de los FLMs consiste en primero evaluar el número de posiciones entre la cola de retirada del ASRS y el lugar donde la unidad recibe la operación; evaluar la mezcla

de producción esperada y así conocer la capacidad máxima que para una determinada opción tiene la planta.

Conociendo la mezcla de producción asociado a cada operación (calculado en la mezcla por operación en PPM y en Global) y la capacidad acumulada se puede estimar el número de unidades que, en condiciones de ocupación completa de la PPM, circula por cada tramo.

En esta aproximación, destacar que no se han considerado las posiciones intermedias posibles cuando una unidad debe recibir más de una operación. Con lo cual, tampoco se consideran situaciones complejas inter-relacionadas de bloqueos, es decir, como dos opciones pueden generar un bloqueo. Además, esta aproximación se basa en la hipótesis de partida que cada posición está ocupada por una unidad, lo que en la práctica no ocurre ya que los tiempos de tránsito y/o operación son muy diferentes en cada posición.

Aplicándolo a un caso concreto de la operación O5. Las unidades que van a la estación dónde se realiza O5 pasan por dos tramos:

- Un tramo global donde pasan tanto las unidades de pre-montaje y las que no. En el tramo global, existen 20 unidades en la cola de retirada del ASRS (posiciones virtuales) y la posición del Split Point (esta cantidad es modificable por los usuarios pues no es una línea física).
 $N^{\circ} \text{ unidades con O5 en Tramo global} = 2.18\% \cdot (20 + 1) = 0.4578 \text{ coches}$
- Después del Split Point, todas las unidades son de pre-montaje y tienen que pasar por 15 estaciones en el tramo específico para recibir la operación correspondiente.
 $N^{\circ} \text{ unidades con O5 en Tramo específico} = 6.57\% \cdot 15 = 0.9855 \text{ coches}$

Así, en el caso de tener todas las estaciones ocupadas, y con un sistema regularmente lleno se puede deducir que en el promedio, en cada instante, no debiera haber más de dos unidades en el sistema. Usando la misma metodología de cálculo, se propone la tabla 1.2 a continuación.

Tabla 1.2. Determinación de los FLMs por operación basado en los espacios físicos

Operación	Posiciones en Tramo Global	Presencia en Tramo Global	Posiciones en Tramo específico	Presencia en Tramo específico	Presencia Total según posiciones
O1	20	16.21%	18	48.88%	12.04
O2	20	9.88%	30	9.88%	4.94
O3	20	5.37%	30	16.19%	5.93
O4	20	4.89%	17	14.74%	3.48
O5	20	2.18%	15	6.57%	1.42
O6	20	0.64%	20	1.92%	0.51

Calculo de la presencia mínima de modelos basado en el estudio de los tiempos de tránsito y el ritmo de producción

Se pretende en este apartado estimar cuántas unidades de cada opción debería haber como mínimo en un sistema que estuviera funcionando de manera normal si para calcularlo tuviéramos en cuenta el tiempo que tarda la unidad en transitar desde un punto a otro y el número de unidades que, para garantizar la mezcla de producción, debiera haber de cada tipo.

Para ello se mide el tiempo que, en condiciones normales y con el sistema físico vacío, se tarda en recorrer la planta entre dos puntos cualesquiera. Al dividir ese tiempo por el tiempo de *takt* del tramo considerado al que esa opción debe ser consumida se puede estimar el número de unidades mínimo que debe haber de esa opción en ese trayecto para garantizar que se produce la cantidad prevista.

Cada una de las dos líneas de Trim del caso considerado en este estudio, tienen un tiempo de *takt* de alrededor de 76 segundos. Para el cálculo de la presencia de modelo, se asumirá pues que el *Split Point* tiene un tiempo de ciclo igual al tiempo de *takt* de 38 segundos ($=76/2$).

Considerando que 1 unidad de cada 3 entra en la planta de montaje, se puede asumir que en el promedio, alrededor de 1 unidad cada $38 \times 3 = 114$ segundos debiera entrar en la planta PPM.

Para calcular la presencia de unidades, hay que conocer cuáles son los puestos dónde los tiempos de ciclo son superiores al tiempo de ciclo del ascensor.

En el caso de la operación O5, hay 21 posiciones entre la cola de retirada hasta el split point con un tiempo de ciclo de 38 segundos para cada posición. La presencia de variantes con la operación O5 es del 2.18%, entonces, en promedio, habrá 0.457 unidades con O5 entre la cola de retirada y Split Point.

En PPM las unidades entran a un ritmo de 114 segundos y hay 14 estaciones hasta la estación O5. El tiempo total de tránsito desde la entrada a la planta PPM hasta la estación de operación es de 523 segundos, lo que implica que en una situación regular habrá 4.59 unidades hasta O5 en cada momento. Como el 6.57% de las unidades en este tramo específico recibe O5, 0.302 unidades recibirán esta operación.

Entonces, en promedio, la presencia mínima de modelos con O5 sería de 0.759 unidades en cada momento.

Aplicando la misma metodología a todas las operaciones, se obtiene la tabla 1.3 siguiente.

Tabla 1.3. Cálculo de la presencia mínima por operación según un estudio de tiempos

Operación	Tiempo Tránsito en Tramo Global	Presencia en Tramo Global	Tiempo de Tránsito hasta la operación	Presencia en PPM	Presencia Según Tiempo
O3	798	5.37%	918	16.19%	2.430
O1	798	16.21%	879	48.88%	7.172
O6	798	0.64%	668	1.92%	0.247
O4	798	4.89%	593	14.74%	1.793
O5	798	2.18%	523	6.57%	0.759
O2	798	9.88%	993	9.88%	2.936

Se puede comparar pues la presencia de modelos según los tiempos y según el espacio posible (ver Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Comparación de los dos primeros enfoques propuestos

Operación	Presencia mínima según tiempos de tránsito y Tiempo de Takt	Presencia máxima según posiciones	Diferencia	Porcentaje de Diferencia	Valores Aproximados de FLMS
O3	2.430	5.930	3.500	143.99%	6
O1	7.172	12.040	4.868	67.87%	13
O6	0.247	0.510	0.263	106.82%	1
O4	1.793	3.480	1.687	94.03%	4
O5	0.759	1.420	0.661	87.11%	2
O2	2.936	4.940	2.004	68.24%	5

Promedio	2.164	94.68%
----------	-------	--------

Se observa pues que en teoría, si PPM está funcionando sin ningún fallo de máquina y sin que existiera ninguna sobre-alimentación, y haciendo consideraciones simplificadoras sobre la problemática real, la presencia mínima de unidades podría ser la mitad de la presencia máxima permitida cuando el sistema está lleno. Gracias a estos cálculos, se podría intuir que los valores mínimos de FLMs serían los presentes en la tabla 1.4.

También destacar que no se ha considerado en el estudio por posiciones y por tiempo el efecto que pueda tener el hecho de recibir varias operaciones. Además, la realidad es distinta ya que existen fallos de máquina, y el envío de unidades a PPM no se hace según un mix constante a lo largo del horizonte sino que se hace en base a las unidades disponibles en el ASRS en un momento dado. Por otro lado, los niveles de presencia actuales en el sistema se miden entre la cola de retirada del ASRS y unos lectores físicos presentes después (a veces lejos) del puesto de operación. Además de ello, cuando PPM está saturada a su entrada, las unidades que no han entrado aún por la planta de pre-montaje se recirculan y esto puede suponer romper la secuencia o, aún más grave, perder capacidad productiva para alimentar a la planta de montaje final.

Cálculo de la capacidad de unidades seguidas sin bloqueos de ruteo

Otro cálculo que puede resultar de interés es el número de unidades seguidas que caben en las mesas previas a una determinada estación que pueden originar un bloqueo de flujo. En este enfoque, no se considera el funcionamiento de los PLCs. Esto permite conocer cuántas unidades seguidas podríamos llegar a tener “paradas” frente a una estación “averiada” sin que ello produzca bloqueo en el resto del sistema. Los cálculos se presentan en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Resumen de los FLMs calculados según

Operación	Valores Aproximados de FLMs según Unidades seguidas
O3	1
O1	5
O6	1
O4	1
O5	14
O2	3

Cálculo de la capacidad de unidades con la misma operación

Si se considera el funcionamiento real del sistema, se puede calcular el número de unidades con la misma operación que caben en las mesas previas a una determinada estación sin bloquear flujos ligados a otras operaciones. Esto permite conocer cuántas unidades podríamos llegar a tener “paradas” frente a una estación “averiada” sin que ello produzca bloqueo en el resto del sistema.

Para ello, se contabiliza pues la mesa considerada más las mesas previas dónde se pueden almacenar únicamente las unidades que esperan esta operación. Algunas mesas pueden enviar las unidades a zonas distintas. Debido a la lógica del sistema, cuando existen estos casos, los PLCs evitan enviar una unidad a una mesa si su siguiente mesa de destino está bloqueada, y esto se considera en el cálculo. En la tabla 1.6, se proponen los valores calculados.

Tabla 1.6. Resumen de los FLMs calculados según lógica del sistema

Operación	Valores Aproximados de FLMs según lógica del sistema
O3	8
O1	5
O6	2
O4	1
O5	1
O2	10

Consolidación de resultados

En este apartado se han propuesto cuatro modos de calcular cuáles debieran ser los niveles de referencia para alimentar la planta de pre-montaje. Cada uno de ellos atiende a una aproximación distinta. Los valores obtenidos están en la siguiente tabla 1.7.

Tabla 1.7. Comparación de los diferentes enfoques analíticos propuestos

Operación	Presencia mínima según tiempos de tránsito y Tiempo de Takt	Valores Aproximados de FLMs según estudio de tiempos	Valores Aproximados de FLMs según Unidades seguidas	Valores Aproximados de FLMs según lógica del sistema	Máximos de los 4 enfoques analíticos
O3	2	6	1	8	8
O1	7	13	5	5	13
O6	0	1	1	2	2
O4	1	4	1	1	4
O5	7	2	14	1	14
O2	2	5	3	10	10

En esta tabla, se puede observar que cada enfoque da resultados muy distintos ya que la lógica del sistema, la mezcla de producción, los tiempos de procesos, el tamaño de la cola de retirada del ASRS, las posibles averías de maquina pero también el nivel de llenado del sistema son factores relevantes en el cálculo de los FLMs a considerar.

Sin embargo, este análisis empírico supone unas consideraciones previas: las maquinas no se pueden parar en ningún momento; nunca se enviará más de 1 unidad de cada 3 a PPM; la presencia se contabiliza cuando la unidad se pone en la cola de retirada del ASRS y desaparece cuando la unidad recibe la operación considerada.

Dado que estos enfoques analíticos propuestos no son capaces de considerar todos estos aspectos, se propone en la sección a continuación una simulación basada en eventos discretos para comprobar la validez de los resultados analíticos.

Descripción del modelo de simulación

Descripción del modelo

Con el fin de simular el comportamiento del sistema productivo en función de diferentes FLMs, se ha diseñado un modelo basado en eventos discretos con *Simio Simulation Software*®. Una representación del modelo final se presenta a continuación en la figura 1.6.

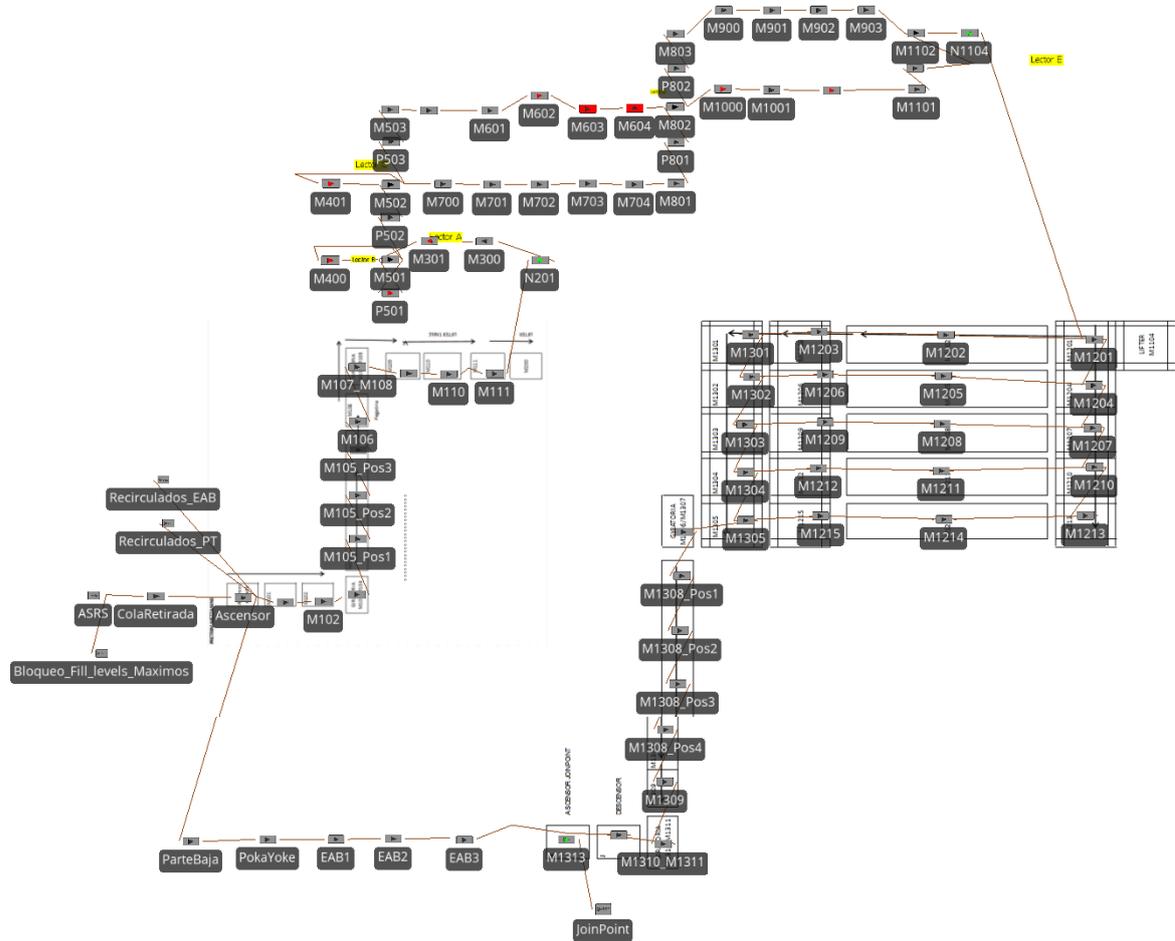


Figura 1.6. Modelo diseñado en Simio®

En el modelo, la generación de unidades se hace en el ASRS dónde salen aleatoriamente los diferentes modelos de unidades según la mezcla de producción diaria. Cuando aleatoriamente la unidad a generar es para PPM, entonces se comprueba si los FLMs fijados están respetados. Si la unidad obtenida no respeta un FLM, entonces se perderá en el *sink* “Bloqueo_Fill_Llevels_Maximos”. Si la unidad es de PPM y que respeta todos los FLMs o la unidad no es de PPM, se asignará la unidad en la cola de retirada. Cuando la extracción del ASRS se hace, la unidad pasa en el ascensor (*Split Point*) dónde entra en PPM, va al *By-pass* (Parte Baja) o se recircula si existe un bloqueo.

Los tiempos considerados y asociados a cada uno de los *servers* son de transporte (tiempo independientemente del modelo pero sí que puede depender del ruteo), y de operación (dependiente de la variante de unidad que recibe la operación).

Diferentes medibles se evalúan después de la ejecución del modelo:

- La producción total de PPM así como la producción total del sistema
- La desviación entre la mezcla de producción prevista y la mezcla de producción real en el punto de unión (Join Point)
- Los tiempos promedios, máximos y mínimos entre muelles
- Las unidades recirculadas
- Los bloqueos de máquinas
- Las unidades que no se han podido extraer del ASRS en un momento determinado debido a la existencia de los FLMs.

Configuración del estudio experimental

El estudio experimental para evaluar los FLMs se ha realizado en dos etapas. En una primera etapa, se han probado valores entre 0 y 20 para una operación manteniendo los valores de todos los demás a un número infinito. En una segunda fase, se ha lanzado un experimento masivo en simulación discreta para intentar encontrar los valores de FLM que maximicen la producción de la planta PPM, respetando el mix y minimizando el número de los recirculados.

Comenzando por la primera fase a continuación, se presenta el caso de la operación O1. En este experimento, se ha fijado los FLMs de todas las operaciones a 99 y el FLM de O1 se ha evaluado para valores entre 0 y 20.

Debido a la aleatoriedad producida por las paradas de máquinas, cada experimento se ha repetido 15 veces y se ha considerado el promedio de los valores de las variables de salida.

En la figura 1.7 a continuación, se observa la evolución de la desviación de la mezcla de producción en función del valor del FLM para O1.

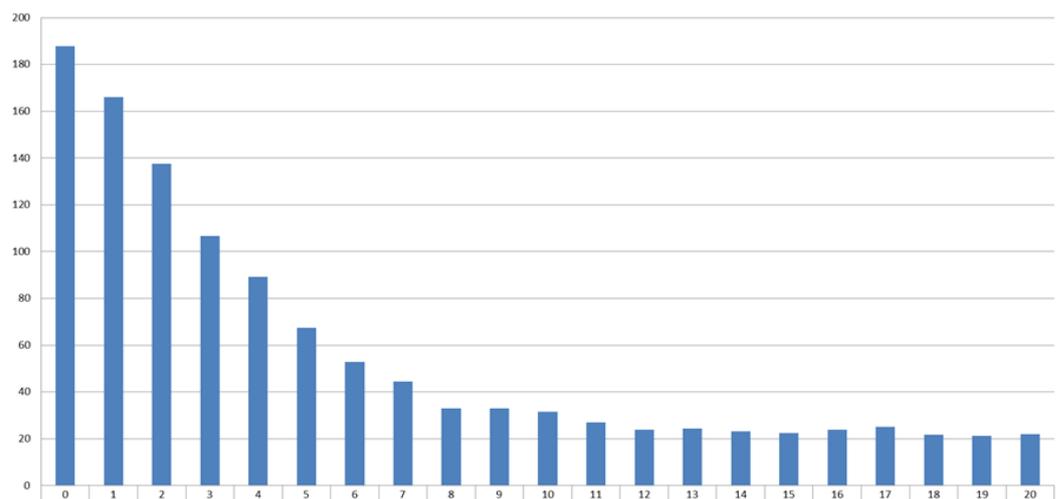


Figura 1.6. Desviación de la mezcla de producción en función del FLM de O1

De la figura 1.6, se observa que cuando más alto sea el FLM, menor es la desviación al mix de producción. Esta desviación en el mix se puede explicar gracias a la figura 1.7.

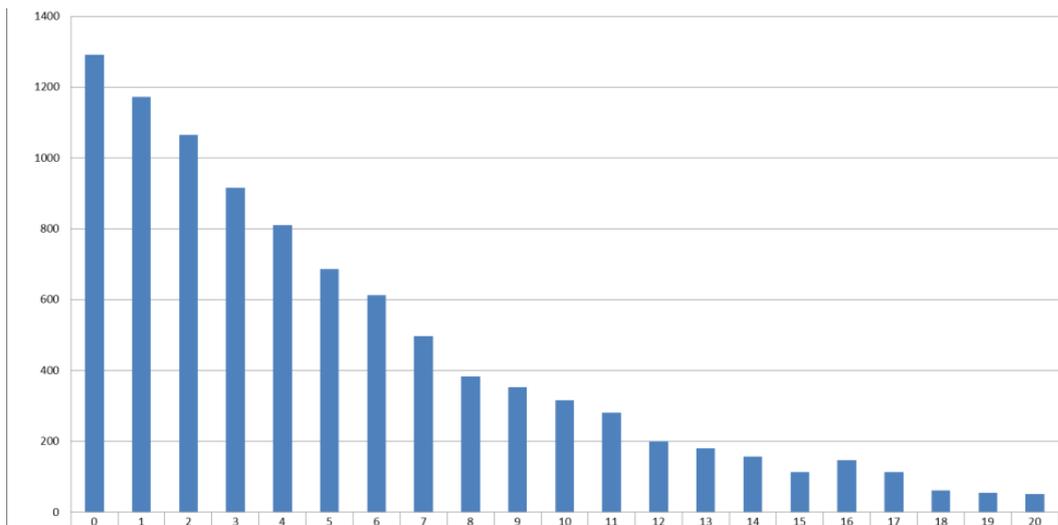


Figura 1.8. Extracciones falladas debido al FLM de O1

En esta figura 1.7, se ve que cuando aumenta el FLM de O1, se producen menos extracciones falladas. Sin embargo, sea cual sea el FLM, nunca se llega a poder seguir el mix previsto. En la figura 1.9, se observa el número de unidades recirculadas después del ascensor. En esta figura, se observa que cuando suben los FLM de O1, cada vez más unidades se recirculan lo que supone una pérdida de capacidad del ASRS.

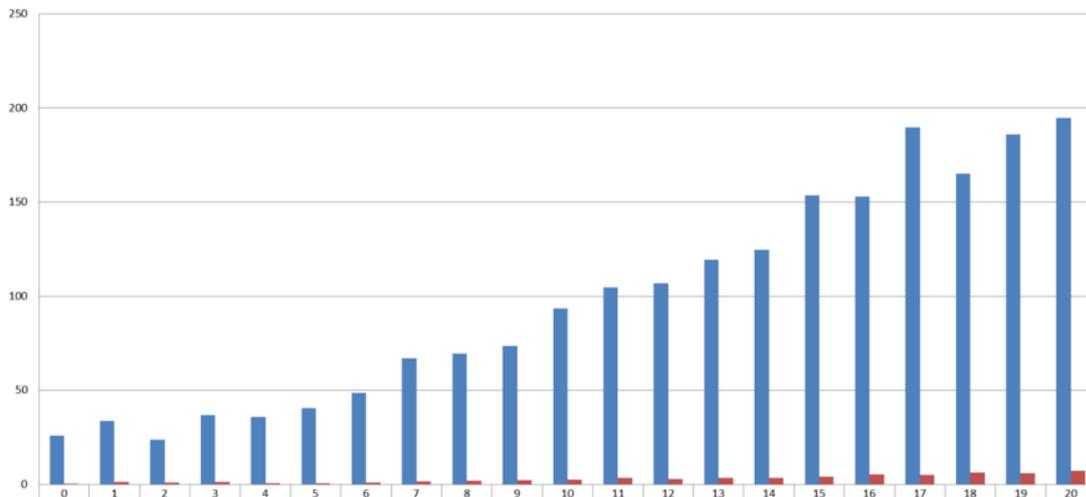


Figura 1.9. Evolución del nivel de unidades recirculadas en función del FLM de O1

Las unidades son recirculadas debido, la mayor parte del tiempo, a bloqueos de la entrada de PPM. La entrada de PPM puede estar bloqueada ya que una maquina está sufriendo un fallo o que también el mix de producción haga que se produzcan situaciones de bloqueos temporales en las zonas de bifurcaciones o debido a las operaciones que se realizan en mesas apartadas del flujo.

En la figura 1.10, se observa el porcentaje del tiempo que 3 *servers* relevantes están parados. Como se puede apreciar, cuando el FLM de O1 sube, las maquinas tienen una tendencia a estar cada vez más saturadas. Sobre todo, se ve claramente que el server a la entrada de PPM (color verde) pasa de 2.3% al 12% cuando el FLM sube de 0 a 20 unidades.

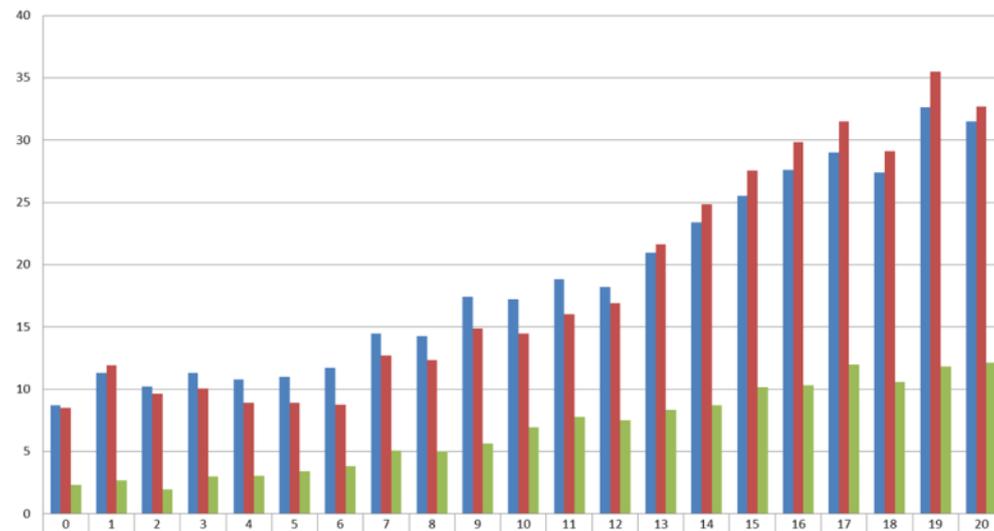


Figura 1.10. Evolución del nivel de bloqueo de unas mesas características en función del FLM de O1

Por otro lado, se ve claramente en la figura 1.11 que a partir de 7-8, la producción de PPM se estabiliza a un nivel muy alto (superior a la producción esperada con la mezcla prevista).

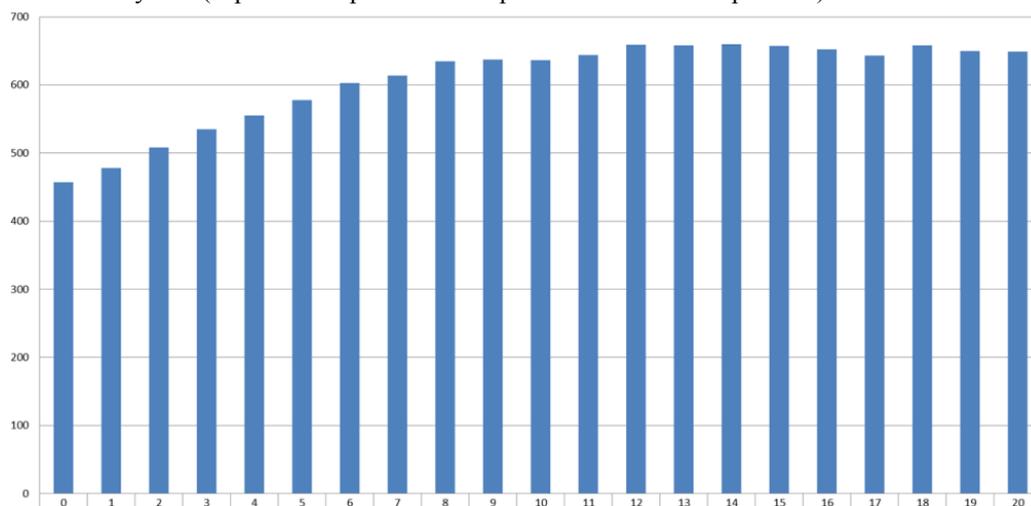


Figura 1.11. Evolución del nivel de bloqueo de unas mesas características en función del FLM de O1

De acuerdo a estos gráficos se ve que los valores admisibles de FLM para O1 son:

- Aceptables a partir de 7 en cuanto a la producción de PPM. En valores más altos, PPM dispone realmente de una capacidad extra de capacidad.
- Mejores para valores altos para evitar distorsionar el mix de producción
- Asumibles hasta un valor de 16 para evitar generar demasiados recirculados. Sin embargo, hay que destacar que se estima que la capacidad de extracción del ASRS es del orden de 2300 unidades al día. El nivel de producción que se quiere alcanzar a medio plazo es del orden de 2100 unidades al día, entonces, cuando más bajo sea el valor de las unidades recirculadas, menos riesgo de perder capacidad productiva existirá. Como este factor es condicionante, valores superiores a 12 implican el riesgo de perder capacidad productiva.

Por estos motivos, los valores de FLM de O1 aceptables están en el rango 7-12 unidades. El mismo procedimiento de análisis se ha realizado para los demás FLM y se ha obtenido los intervalos presentes en la tabla 1.8 a continuación.

Tabla 1.8. Intervalo de FLM aceptables para el mix considerado

Operación	Intervalo de FLM "aceptable"
O3	[5 - 14]
O1	[7 - 12]
O4	[7 - 11]
O2	[7 - 15]
O6	[2 - 4]
O5	99

En una segunda fase, se ha lanzado un experimento masivo en *SIMIO*® usando el *add-on Opt-Quest* para intentar encontrar los valores de FLM que maximicen la producción de la planta PPM manteniendo un mix de producción alto y minimizando los recirculados.

El número total de escenarios es de 8100 pero sin embargo, se ha decidido ejecutar solamente un conjunto de 500 experimentos (solamente el 6% de todos los escenarios posibles) ya que el módulo *Opt-Quest* intenta buscar el mejor escenario por sensibilidad. Además obtener exactamente el mejor escenario no es necesario, lo importante es encontrar un rango de valores. Los resultados se presentan en la tabla 1.9 a continuación.

Tabla 1.9. Mejores escenarios ordenados según la capacidad productiva de PPM conseguida

Scenario	FLM O3	FLM O1	FLM O4	FLM O2	FLM O6	FLM O5	Nivel de producción de PPM durante 3 días	Desviación de Mezcla	Recirculado de <i>By-pass</i>	Recirculado de PPM
Scenario440	11	11	7	15	4	99	1917,2	32,1874	4,33333	112,27
Scenario30	10	11	11	14	4	99	1913,07	32,7509	3,6	109,2
Scenario100	11	11	10	14	3	99	1911,33	32,5299	3,6	100,2
Scenario173	12	11	7	14	2	99	1910,8	33,6469	3,13333	115,27
Scenario175	11	11	9	14	3	99	1909,6	32,5081	3,66667	101,2
Scenario309	13	11	7	14	2	99	1908,2	33,732	3,2	118,2
Scenario423	12	11	7	15	4	99	1905,87	32,6419	4,4	113,07
Scenario464	13	11	8	14	3	99	1903,73	34,0902	3,53333	107,87
Scenario31	12	11	11	14	3	99	1903	32,689	3,86667	104,13
Scenario133	9	11	9	14	3	99	1902,33	33,1188	4,13333	105,13
Scenario42	12	12	11	14	4	99	1901,8	32,5446	3,8	145,67
Scenario16	13	12	11	14	4	99	1900,6	32,7366	3,86667	147,8
Scenario63	13	12	8	14	2	99	1900,13	33,1363	4,13333	146,33
Scenario361	12	11	7	14	3	99	1899,07	33,2187	3	116,53
Scenario342	14	9	9	15	3	99	1899	31,8083	3,2	80
Scenario86	10	11	10	14	3	99	1899	33,4436	3,66667	109,07
Scenario450	13	11	7	14	3	99	1897,8	33,3138	3,53333	116,8
Scenario53	10	11	9	14	3	99	1897,73	33,4333	3,73333	109,27
Scenario11	11	12	11	13	2	99	1897	33,2936	3,46667	133,73
Scenario14	11	12	7	11	2	99	1896,33	38,0849	3,8	121,67
Scenario226	13	9	9	15	3	99	1896,27	31,811	3,26667	80,6
Scenario28	14	12	11	14	4	99	1895,93	32,7951	3,93333	149,93
Scenario228	10	12	10	13	3	99	1894,87	31,5485	4,06667	143,93

Una estimación de los FLMs a implementar según la simulación se presenta en la tabla 1.10 y en la misma tabla se pueden comparar a los calculados mediante métodos analíticos.

Tabla 1.10. Estimación del mejor valor de FLM para el mix considerado según la simulación y los métodos analíticos

Operación	Estimación del mejor valor de FLM por Operación	Valores según cálculos analíticos
O3	12	8
O1	11	13
O4	9	4
O2	14	10
O6	3	2
O5	99	14

Como se puede apreciar en la tabla 1.10. existen diferencias entre los valores calculados de manera analítica y los obtenidos en la simulación. Sin embargo, para la operación O1 que es la más importante, esta diferencia no es significativa, e incluso se sobreestima el valor de O1 en el cálculo analítico. También se ve que, salvo en el caso de O1, siempre los FLMs simulados son superiores a los valores teóricos y esto demuestra que no son relevantes con la mezcla considerada.

Impacto de los fallos maquinas

Con el fin de ver si los MTTR y la disponibilidad de máquina tienen impacto en los FLMs, se ha considerado la posibilidad de simular unos MTTR de 15, 20 y 25 minutos así como unos MTBF de 1, 2 y 3 días. Se presentan los 10 mejores resultados obtenidos para 3 casos ({MTTR = 15 min ; MTBF = 3 días}, { MTTR = 25 min ; MTBF = 1 día }, { MTTR = 15min ; MTBF = 1 día}) en las tablas 1.11 a 1.13.

Tabla 1.11. Mejores FLM con MTTR = 15min y MTBF=3 días

Scenario	FLM O3	FLM O1	FLM O4	FLM O2	FLM O6	FLM O5	Prod. PPM durante 3d.	Desviación de Mezcla	Recirculado de By-pass	Recirculado de PPM
Escenario329	13	18	14	17	3	5	3669	8,63332	5,6	42,2
Escenario604	13	18	15	17	3	5	3669	8,63332	5,6	42,2
Escenario93	17	19	16	17	3	5	3663,2	8,95628	7,6	47,4
Escenario165	18	19	16	17	3	5	3663,2	8,95628	7,6	47,4
Escenario236	18	19	15	17	3	5	3663,2	8,95628	7,6	47,4
Escenario44	20	20	20	20	4	5	3662,8	8,74746	7,2	52,2
Escenario532	15	17	9	17	3	5	3658,8	9,02182	5,4	35,8
Escenario42	20	18	20	18	4	5	3654,4	8,88454	4,6	51,2
Escenario45	18	18	17	18	4	5	3654,4	8,88454	4,6	51,2
Escenario64	19	19	16	17	1	5	3652,8	8,95498	6,2	46,8

Promedio	17,1	18,5	15,8	17,5	3,1	5				
Desviación estándar	2,46	0,81	2,96	0,92	0,83	0				

Tabla 1.12. Mejores FLM con MTTR = 25min y MTBF=1 día

Scenario	FLM O3	FLM O1	FLM O4	FLM O2	FLM O6	FLM O5	Prod. PPM durante 3d.	Desviación de Mezcla	Recirculado de By-pass	Recirculado de PPM
Escenario11	9	15	4	19	4	5	3521,4	14,06	3,8	93,2
Escenario156	19	18	11	18	2	5	3481,4	15,21	5,4	167
Escenario518	17	14	18	14	1	5	3476,6	18,24	2,2	101
Escenario535	18	14	13	13	1	5	3475,4	17,18	2,8	114,2
Escenario490	19	16	16	14	2	5	3464,6	16,30	5,2	136,8
Escenario168	14	16	13	16	2	5	3453,6	16,57	6,8	128,6
Escenario697	9	19	16	17	4	5	3447,2	15,11	8	170,2
Escenario337	20	17	8	14	1	5	3445	14,74	5,8	168
Escenario262	17	18	4	13	4	5	3443,2	14,58	3	121,8
Escenario173	7	17	6	19	3	5	3433,8	14,36	7,4	150,2

Promedio	14,9	16,4	10,9	15,7	2,4	5
Desviación estándar	4,59	1,62	4,89	2,28	1,2	0

Tabla 1.13. Mejores FLM con MTTR = 15min y MTBF=1 día

Scenario	FLM O3	FLM O1	FLM O4	FLM O2	FLM O6	FLM O5	Nivel de producción de PPM durante 3 días	Desviación de Mezcla	Recirculado de By-pass	Recirculado de PPM
Escenario99	13	20	6	14	3	5	3598,8	9,66	5,4	67,2
Escenario650	19	20	6	16	2	5	3588,6	10,47	8	77,4
Escenario78	8	18	6	15	3	5	3582,8	10,09	5,4	86,8
Escenario57	8	18	5	18	4	5	3580,4	10,36	5,6	71,2
Escenario542	8	15	19	17	1	5	3559,6	10,96	4,6	48,6
Escenario117	16	20	6	13	3	5	3556,8	10,97	6,4	102,6
Escenario698	12	16	5	10	1	5	3554,8	11,70	4,4	50
Escenario250	20	14	10	15	2	5	3544,4	12,67	3,4	46,8
Escenario13	19	18	10	12	3	5	3538,6	10,29	4,6	69,4
Escenario791	15	16	3	12	1	5	3538,4	13,83	3,2	38

Promedio	13,8	17,5	7,6	14,2	2,3	5
Desviación estándar	4,51	2,06	4,32	2,36	1,00	0

Se observa que cuando la frecuencia de los fallos disminuye (manteniéndose constante la disponibilidad), los FLMs a considerar deben crecer. Esta relación tiene que ver con que no se producen bloqueos ligados a paradas no planificadas y por tanto protegerse de ellos no es rentable.

Conclusiones

En este trabajo se propone un modo para secuenciar unidades en entorno de mezcla de modelos basado en un esquema *Pull*. A diferencia de los sistemas tradicionales este procedimiento alimenta al sistema de fabricación en función de la presencia de unidades, y por tanto, en función del requerimiento del cliente.

Se ha utilizado para ilustrar el problema un caso real en una empresa de montaje de automóviles. Los niveles de referencia que se utilizan para definir cuándo alimentar la línea se han calculado utilizando modelos analíticos y de simulación. Estos últimos se han demostrado más eficientes puesto que permiten considerar situaciones que de otro modo no hubiera sido posible considerar.

Acknowledgments

El presente trabajo forma parte del Proyecto CORSARI MAGIC (Ref. DPI2010-18243) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España dentro del programa de Proyectos de Investigación Fundamental no orientada.

References

- Bautista, J., & Cano, A. (2011). Solving mixed model sequencing problem in assembly lines with serial workstations with work overload minimisation and interruption rules. *European Journal of Operational Research*, 210(3), 495-513.
- Bautista, J., Cano, A., & Alfaro, R. (2012). Modeling and solving a variant of the mixed-model sequencing problem with work overload minimisation and regularity constraints. an application in nissan's barcelona plant. *Expert Systems with Applications*, 39(12), 11001-11010.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*, 192(2), 349-373.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.013>
- Drexl, A., Kimms, A., & Matthießen, L. (2006). Algorithms for the car sequencing and the level scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 9(2), 153-176.
- Garcia-Sabater, J. P., Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. J. (2012). A two-stage sequential planning scheme for integrated operations planning and scheduling system using MILP: The case of an engine assembler. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(2), 171-209.
- Maheut, J., Besga, J. M., Uribechebarria, J., & Garcia-Sabater, J. (2014). A decision support system for modelling and implementing the supply network configuration and operations scheduling problem in the machine tool industry. *Production Planning & Control*, 25(8), 679-697.
doi:10.1080/09537287.2013.798087
- Valero Herrero, M., & Molina Morte, P. (2012). CSP dinámico: Un algoritmo dinámico para la resecuenciación en un almacén de líneas en paralelo. *Working Papers on Operations Management*, 4(1)

Study of the configuration of a pre-assembly plant using maximum fill levels of units' options
Maheuta, J.; Morant Llorca, J. y Garcia-Sabater, J.P.

Valero-Herrero, M., García-Sabater, J. P., Hernández, J. R. C., & Maheut, J. (2011). Planteamiento dinámico del problema de secuenciación en líneas de montaje con mezcla de modelos. V International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, 288-296.