

Sequencing rules in the Mixed Model Assembly Line Sequencing Problem

Reglas de secuenciación en el problema de secuenciación en línea de montaje con mezcla de modelos

Julien Maheut^a, José Pedro Garcia-Sabater^b

^aJulien Maheut (Universidad Europa de Valencia, C/General Elio 2, 46010 Valencia, julienphilip-ped.maheut@uem.es), ^bJosé P. Garcia-Sabater (ROGLE, Dpt. De Organización de Empresas, Universitat Politècnica de València, jpgarcia@upv.es)

Recibido: 2015-02-02 Aceptado: 2015-07-15

Abstract

The Sequencing problem of Mixed-Model Assembly Line is discussed in the literature considering constraints in form of sequencing rules. The designed algorithms pretend not to violate those rules because rules violation adversely affects the activity on the assembly line. In most part of the literature, these rules refer to physical considerations of the line or are related to workload concerns. In this paper, a novel classification of the different existing and known sequencing rules and practical examples of the industrial practice are introduced.

Keywords: Car Sequencing Problem, Sequencing Rules, Automotive Industry, Mixed-Model Assembly Line.

Resumen

El problema de secuenciación de unidades en el caso de líneas de montaje con mezcla de modelo es un problema tratado en la literatura donde se suele considerar restricciones en forma de reglas. Los algoritmos de resolución pretenden no-violar dichas reglas puesto que la violación afecta negativamente a la actividad en la línea de montaje. Estas reglas hacen referencia en la mayor parte de la literatura a consideraciones físicas de la línea o están relacionadas con la carga de trabajo. Se propone en este trabajo clasificar las diferentes reglas existentes y conocidas en la realidad industrial y se introducen ejemplos prácticos conocidos.

Palabras clave: Problema de Secuenciación de Coches, Reglas de Secuenciación, Automóvil, Línea de ensamblaje con Mezcla de Modelos.

Introduction

El problema *Car Sequencing Problem* (CSP) consiste básicamente en definir el orden en el cual un conjunto de unidades tiene que entrar en una línea de ensamblaje de mezcla de modelos (Valero-Herrero, García-Sabater, Hernández, & Maheut, 2011). Cuando las unidades entran en una planta de montaje final, se pueden diferenciar por sus necesidades de montaje (Weiner, 1985), es decir las opciones que se montan en la parte exterior (también denominada de *Trim*) o la interior (denominada de *Chasis*).

Algunas de las opciones pueden suponer la necesidad de esfuerzos adicionales en algunos puestos de trabajo (Solnon, Cung, Nguyen, & Artigues, 2008). Por ejemplo porque el tiempo de ciclo de la operación es superior al tiempo de takt de la línea. Esta circunstancia se puede dar porque no todas las unidades llevan estas operaciones con mucha carga de trabajo. Algunas de estas operaciones pueden ser las de montaje de los techos solares, el montaje del aire acondicionado, los motores híbridos, etc.

Si la aparición de las opciones en la secuencia no se hace de forma alisada, se podría generar una acumulación de modelos necesitando la misma operación y podría generar problemas en la línea (bloqueo de la línea necesidad puntual de mano de obra, retrabajos, etc.).

Con el fin de evitar estos problemas, el problema de secuencia de coches plantean reglas de secuenciación de tipo $L:M$ para evitar que más de L coches de M coches consecutivos tengan la opción considerada (Fliedner & Boysen, 2008).

La literatura se enfoca en desarrollar los métodos de resolución para encontrar mejores soluciones o soluciones en tiempos más cortos (Boysen, Scholl, & Wopperer, 2012; Boysen, Fliedner, & Scholl, 2009; Solnon et al., 2008). Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura trabajos que intentan estudiar las reglas existentes en la industrial, clasificarlas según dimensiones específicas y que explican la necesidad de considerar estas reglas en el problema de secuenciación de unidades homogéneas.

En este trabajo se propone una revisión breve de la utilización de reglas de secuenciación presente en la literatura y se propone una novedosa clasificación de las reglas existentes en la práctica industrial para la secuenciación de unidades. Se ilustrará cada dimensión de la clasificación con ejemplos conocidos de varias empresas del sector del automóvil.

El resto del artículo se presente de este modo. En primer lugar se revisa la literatura sobre las reglas consideradas en el problema de secuencia de coches. Después, se plantea una nueva clasificación de las reglas según 6 dimensiones. Y por último, se propone unas conclusiones y unas futuras líneas de investigación.

Revisión de la literatura

En la literatura, el problema de secuenciación de unidades suele considerar reglas de tipo $L:M$ para un atributo, donde se intenta no asignar más de L unidades con el atributo considerado en una ventana de M unidades consecutivas. Este tipo de reglas, se suele asociar a consideraciones de carga máxima como dicen Bautista et al. (Bautista, Pereira, & Adenso-Díaz, 2008a). Cuando una regla de este tipo se ve violada, se trata de un problema de sobre asignación (*upper over-assignment* (UOA)).

Aunque no es frecuente en la literatura, en el caso de no violar la regla, se puede considerar que hay escasa asignación inferior de la opción (*upper under-assignment of option*) si hay menos de L unidades con el atributo considerado en una ventana de L unidades consecutivas (Bautista, Pereira, & Adenso-Díaz,

Maheut, J. and Garcia-Sabater, J.P.

2008b). Esto se puede utilizar con el objetivo de modular la asignación de las opciones en los segmentos a lo largo del tiempo.

La violación de una regla puede tener diferentes efectos. El más grave de ellos sería que puede provocar el paro o bloqueo de la línea con pérdida de capacidad (incluso en ese caso puede suponer pérdida de capacidad para un número más o menos grande de trabajadores y por tanto recuperable o no). En otros casos simplemente puede suponer la asignación extra de un recurso determinado para compensar el esfuerzo adicional considerado o simplemente el malestar de la mano de obra que ve tensionado su puesto de trabajo.

Sin embargo, no todas las reglas existentes tienen que ver con consideraciones de nivelación de carga. En ocasiones las reglas de secuenciación deben incluir aspectos relacionados con el uso adecuado de recursos. Un ejemplo se da en el uso de transportadores de capacidad limitada (por ejemplo los que “se llevan las puertas”) que si el coche es de 4 puertas se llevan dos unidades (la delantera y la trasera de cada lado respectivamente) pero si el coche es de 2 puertas sólo se podrían llevar dos unidades, salvo que el coche siguiente también fuera de dos puertas.

En otras ocasiones hay un cierto setup (por ejemplo ir a coger una herramienta) que debe evitarse que ocurra con demasiada frecuencia.

Las líneas de montaje y en concreto las de automóviles, trabajan en entornos lean, y por tanto tienen una necesidad de consumo regular de componentes (Bard, Shtub, & Joshi, 1994). Si este consumo no se puede regular la cantidad de stock en línea que hay que tener es mucho mayor que si el consumo (es decir la demanda para el eslabón anterior) es regular. Este efecto en el eslabón anterior se ve incrementado en entornos Just-On-Time o de entrega sincronizada: En estos entornos las líneas que alimentan a la línea de montaje, son de algún modo, parte de la línea de montaje, trabajando al mismo ritmo que esta. A efectos de carga de trabajo, y sufren el mismo “stress” cuando se violan las reglas a ellos asociadas. Sin embargo la natural existencia de ciertos buffers (aunque simplemente sean para el transporte de las unidades) hace que reglas ligadas al mismo punto no tengan, en general el mismo efecto. Dichos proveedores que sirven de modo sincronizado, requieren una cierta cantidad de tiempo para poder fabricar y suministrar el submontaje desde que conocen el siguiente producto que va a ser ensamblado (Wagner & Silveira-Camargos, 2012). Para garantizar de ese “tiempo extra” las fábricas se han dotado de almacenes reguladores, que a su vez pueden servir para mejorar la calidad de la secuencia, puesto que permiten que entre en juego no sólo la secuencia sino también la temporización (el scheduling).

Por otro lado, la violación de una regla no siempre supone un problema para la planta. En un entorno real es también relevante saber cual es el tiempo que existe antes de que la violación de la regla se note en la planta. No es lo mismo violar una regla para una opción que se monta al principio de la línea de montaje u violar una cuya ubicación física está al final de la línea. De hecho, el tiempo entre la generación de la violación en la secuencia y la violación efectiva en el puesto de trabajo es fundamental para la gestión de los recursos, puesto que en algunos casos se podrían aportar trabajadores de apoyo. Sin embargo si la limitación está ligada a recursos (por ejemplo un robot) la violación de la regla implicaría no acabar la tarea. En esos casos la regla se puede relajar físicamente incorporando alguna posición de apoyo, antes o después, para evitar el bloqueo ligado a la regla. El número de posiciones de apoyo y la saturación de las estaciones previas o posteriores pueden hacer que la regla se puede expresar de modo diferente.

Propuesta de Clasificación de las Reglas en el caso de la secuenciación de vehículos

Un modo utilizado para programar operaciones en entornos de fabricación en líneas de montaje con mezcla de modelos se suelen utilizar reglas (también denominadas restricciones). Dichas reglas en la literatura se limitan, salvo contadas excepciones, a reglas de separación en la aparición de opciones ligadas a cargas de trabajo variables.

Aunque ese es un modo muy generalizado de expresar las necesidades, la experiencia de los autores permite indicar que existe otras reglas que convendría tener en cuenta en el momento de diseñar una sistema para la programación de producción en estos entornos. Con el fin de clasificar, caracterizar para poder considerar en la realidad estas reglas, se propone a continuación una clasificación, probablemente no-exhaustiva, que permitirá para caracterizar las reglas.

La propuesta aquí presentada considera las siete características siguientes: (1) el Origen de la Regla; (2) Sistema de Gestión de las Reglas; (3) la Naturaleza de la Regla; (4) la Penalización asociada a la violación de la Regla; (5) el Criterio de Aplicación; (6) la Disponibilidad de las unidades a secuenciar y (7) la Gestión de las violaciones.

El Origen de la Regla

Las reglas o restricciones de secuenciación pueden tener diferentes orígenes.

Los equipos de manutención (*Handling Equipment*) pueden ser una limitación relevante en la secuencia. Por ejemplo los sistemas que transportan piezas en secuencia. En algunos casos, su número es limitado en el sistema o simplemente no cabrían si no fueran convenientemente utilizados.

En algunas ocasiones las reglas de secuenciación deben tener en cuenta la disponibilidad de material. Supóngase el hecho de que se conoce en un momento determinado que se está produciendo un *stock-out* de un determinado componente. Tiene sentido retener las unidades que van a requerir dicho componente mientras no se pueda restablecer el suministro. Los *holds* se pueden clasificar según el nivel de criticidad del componente afectado en el montaje. Un componente crítico es necesario para seguir con el montaje de una unidad. La falta de un componente no-crítico tendría un coste suplementario en el proceso de ensamblaje de la unidad, pero no impediría que esta siguiera su trayecto en la línea de montaje.

En ocasiones puede ser necesario que una unidad, o conjunto de ellas, sea programada dentro de una ventana horaria (por ejemplo porque requiere un seguimiento especial en su montaje por un equipo concreto). En algunas empresas estas peticiones se denominan *Hot Pick Request* (HPR).

Los casos de costes de setup en una línea de montaje son escasos, pero no inexistentes. Por ejemplo, dos unidades necesitaran el uso de herramientas específicas para una determinada opción y otro juego de herramientas para otra opción, se podría colocar en la misma estación en la misma operación. En ese caso el secuenciador debería tener en cuenta que dos unidades consecutivas con las opciones consideradas no sería un problema, siempre que fueran de la misma opción, pero sí lo serían en caso de ser diferentes.

En ocasiones los contratos de trabajo o las condiciones del mismo han sido pactados de tal manera que la frecuencia de realización de algunas operaciones no puede superar una cierta cantidad. Este tipo de reglas se pueden considerar no tienen que ver con la secuencia concreta, sino con el programa de trabajo al que dan lugar.

Maheut, J. and Garcia-Sabater, J.P.

Pueden existir reglas físicas en la línea. Por ejemplo en el caso de que haya líneas en paralelo es posible que algunas unidades (por su tamaño o por las operaciones que llevan aparejadas) no puedan ser consideradas en el momento de programar la producción para una línea en particular.

En ocasiones es necesario establecer criterios que garanticen una cierta regularidad en la en la aparición de opciones, y por tanto de consumo de componentes.

Por último se han dejado para el final las reglas más típicas que son las que originan las cargas de trabajo diferentes para opciones diferentes en una determinada estación. Este tipo de reglas se podrían clasificar en tres grupos. El primer grupo serían aquellas reglas que para poder montar la unidad habría que incorporar una persona al equipo de trabajo, y en caso de no incorporarse se generaría un “hueco” en el proceso. El segundo grupo lo constituirían aquellas reglas ligadas a situaciones de carga de trabajo en que al ser sobrepasadas pueden redundar en problemas de calidad. Por último están las reglas en las que se desea regular la carga de trabajo porque favorece el bienestar del trabajador.

El Sistema de Gestión de las Reglas

Se pueden encontrar en la industria diferentes sistemas para recoger y clasificar las reglas existen.

La literatura presenta habitualmente reglas clasificadas según un esquema jerárquico. Este sistema puede clasificar las reglas según niveles (0,1,2,3; high,medium,low) dónde se intentará respetar primero las reglas de un nivel más importante antes de intentar respetar reglas de más bajo nivel. En estos sistemas, se buscaría el conjunto de soluciones que minimiza las violaciones al nivel superior y en caso de empate entre varias soluciones, se compararía las soluciones en empate comparando las violaciones a niveles inferiores. Su opuesto consistiría pues en un sistema sin jerarquía dónde todas las reglas pertenecen a una misma dimensión, un mismo nivel y que la mejor secuencia sea la que maximice o minimice un objetivo. Otra forma de clasificar las reglas para facilitar su gestión consiste en asignarlas un impacto estimado (Low, Medium, High). O también, se puede clasificar según el “dueño” de la regla, es decir la planta que sufre la regla (Carrocería, Almacén, Pintura, *Trim*, *Chasis*, Proveedor, etc.) o incluso en función de los departamentos que los crean (MP&L, Mantenimiento, etc.).

La gestión de las reglas es altamente dependiente, por otro lado, del objetivo de los diferentes stakeholders. El objetivo más frecuente suele ser un objetivo de minimización de puntos dónde existe unos puntos asociados a la violación de una regla y el objetivo consiste en minimizar los puntos totales asociados a la secuencia calculada. Sin embargo, otros objetivos de minimización se puede considerar: la minimización del número de reglas violadas, o la minización del número de coches que violan reglas. En otros casos, el objetivo

Por otro lado, los objetivos de unos stakeholders puede ser la maximización de las unidades producidas o el equilibrio de carga.

La Naturaleza de la Regla

La naturaleza de las reglas se pueden definir según dos aspectos importantes: su consistencia y su temporalidad asociada.

La consistencia de las reglas se pueden referir a si son reglas duras, semi-duras o blandas. Las reglas duras suelen ser reglas físicas, reglas que no se pueden en ningún caso violar en el plazo de planificación. Las reglas blandas son aquellas que suelen considerarse para mejorar aspectos productivos pero que no

tienen necesidad de ser mantenidas si no se pueden cumplir. Por fin, las reglas semi-duras son aquellos que se pueden violar si se avisa a las áreas consideradas para evitar problemas de producción.

Por otro lado, la naturaleza de las reglas puede venir dado por su temporalidad, o dicho de otra forma, su persistencia en el tiempo. Una regla puede ser estática, es decir constante en el tiempo en cuanto a su presencia y sus parámetros. Una regla dinámica es aquella que puede dejar de existir en casos determinados y cuyos parámetros pueden evolucionar a lo largo del tiempo en función de una situación dada. Otro tipo de regla, reglas temporales pueden existir. Son aquellas por ejemplo que existen solamente durante una ventana temporal dada.

La penalización asociada a la violación de la regla

En la industria, las reglas de secuenciación se suelen llamar “restricciones”, haciendo referencia a algo que no se pueda y/o deba hacer. Así al indicar que una restricción se debe cumplir, se estaría diciendo que si no es posible encontrar una solución que no viole una determinada restricción, el programa de producción ligado a esta secuencia no se debiera producir. En general sin embargo se puede utilizar el *adagio*: “*las restricciones están para cumplirse siempre, siempre que se puedan cumplir*” que se atribuye, quizá erróneamente, a un alto cargo de una empresa ensambladora de automóviles de la región de Valencia.

Las restricciones de este modo se usan como reglas que permiten evaluar la calidad de una secuencia en función de que hayan respetado en la medida de lo posible dichas reglas. Una secuencia que no viole ninguna regla (en caso de existir) estaría entre el conjunto de las mejores soluciones. Pero es posible que dicha mejor secuencia no exista, o incluso que no dispongamos de herramientas para encontrarla. En el caso de que se acepte la posibilidad de ejecutar el programa de trabajo que establece una secuencia, pese a que no respete determinadas reglas, habría que definir qué programa de trabajo es mejor que otro.

Para ello se pueden definir pesos que indican la penalización ligada a la regla no respetada. Una secuencia sería mejor que otra si acumulara menos puntos de penalización que otra..

Es importante definir la penalización y se propone una clasificación en función de tres factores: el lugar de aplicación de la penalización, la dimensión de la penalización y la medición de la penalización.

En general, la penalización se puede medir en dos lugares: donde se genera la secuencia y donde afecta la regla. En el primer caso se trata de valorar la secuencia calculada cuando se genera, es decir es el resultado directo de la aplicación. Sin embargo, esta secuencia calculada no tiene por qué ser la que realmente ocurrirá en el lugar dónde se aplica. En algunos casos, existen la posibilidad de que la secuencia se altere debido a líneas en paralelo, a retrabajos, a decisiones de sistemas de información, a paradas de líneas o a buffer de reordenación.

La penalización asociada a la violación de una regla o restricción se puede medir de diferentes formas según el nivel de solape de las ventanas de análisis.

Se pueden considerar tres tipos de ventanas de análisis:

- a. Ventanas de unidades. Se suelen distinguir las ventanas fijas, las ventanas móviles y las ventanas dobles (o compuestas). En las ventanas fijas, cada ventana analizada es independiente entre sí, no compartiendo ninguna unidad. En la ventanas móviles, se considera que las unidades pueden contribuir a violar varias veces la misma regla. En las ventanas dobles, las violaciones para un mismo atributo se suele medir en dos ventanas de tamaño distinto.

Maheut, J. and Garcia-Sabater, J.P.

- b. Ventanas de tiempo. En las ventanas temporales, se suele limitar el número de unidades pasando por un área determinado durante una ventana temporal dada. Este criterio, se podría considerar por ejemplo para permitir que algunas maquinas tengan tiempo de hacer un auto-mantenimiento.
- c. Ventanas de Posiciones. En este tipo de ventana, se suele limitar el número de unidades determinadas entre dos posiciones fijas. Un caso industrial se presenta en (cita) dónde se aplican niveles máximos de presencia de modelos (llamados *Fill levels Maximums*) entre el caso de una línea de montaje dónde existen líneas en paralelo y ruteos dependientes de los modelos. El caso opuesto de fijar unos niveles mínimos de presencias de unos atributos dados se podría dar.

En este último caso además en el momento de medir el no cumplimiento de una regla se ha de decidir si una unidad sin opción puede violar una determinada regla. Es decir si una regla es de no más de 1 de 3, pero las dos últimas unidades tienen la opción aunque la tercera unidad no tuviera la opción, también la regla quedaría violada.

Las penalizaciones pueden ser también binarias o ponderadas. Es decir ¿una regla de no más de 1 de 5 se penaliza igual cuando hay 2 de 5 que cuando hay 4 de 5?

Por fin, la violación se puede medir en base a diferentes dimensiones: un ratio de desviación, un coste, un peso o en cantidades de unidades de producción perdida. Se pueden utilizar diferentes ratios para medir la desviación respecto a lo previsto: Desviación contra el plan previsto (Build-To-Day), Desviación respecto al consumo regular de componentes o aparición regular de opciones, una desviación contra un Build-To-Order.

Otra dimensión de la penalización es medirla en unidades monetarias en función del coste que supone violar una regla. Cuando estimar el coste de penalización o que no se quieren considerar, se puede asociar un peso asociado a la violación.

Por último, una manera de penalizar es asociar una pérdida de producción a la violación de una regla.

El Criterio de aplicación

La regla se puede aplicar a diferentes factores propios o característica del coche como son las opciones a montar en la unidad, el color de pintura, los componentes de la unidad. En ocasiones algunas reglas tienen en cuenta más de una característica simultáneamente.

Se puede también decir aplicar una regla a una Área determinada de montaje. Esto es relevante en el caso de líneas en paralelo con modelos mixtos que no disponen de la misma configuración y de las mismas reglas. También se puede aplicar a zonas de almacenamiento, a puestos de trabajos determinados o a maquinas dadas.

La Disponibilidad de las unidades a secuenciar

Las reglas se suelen considerar en función de unas consideraciones de operación en la línea. Sin embargo, la posible violación de las reglas depende de la disponibilidad de las unidades a secuenciar. Se pueden distinguir dos situaciones básicas: que el conjunto de unidades a secuenciar sea conocido y fijo al principio para todo el proceso de secuenciación, y que el conjunto de unidades a secuenciar vaya variando al

mismo tiempo que el proceso de secuenciación. Se denominará disponibilidad estática al primer caso y disponibilidad dinámica al segundo caso.

La disponibilidad dinámica puede ser en sí misma de diferentes tipos: en función de las unidades físicamente disponibles (por ejemplo las unidades que están en líneas de acumulo exigen que la primera haya sido secuenciada antes de la segunda). También se puede dar un caso simple en el que en cualquier momento, nuevas unidades entran en un almacén de tipo ASRS y así hay que considerar las nuevas unidades entrantes. Otro caso de disponibilidad dinámica es que la cantidad de unidades disponibles puede cambiar instantáneamente debido a los *Holds* descritos previamente.

Gestión de las violaciones

Es posible que el número de reglas de un sistema y los demás factores que influyen en la generación de la secuencia permita respetar todas las reglas, y, en ese caso, el proceso de secuenciación debe centrarse en encontrar la permutación que respete las reglas. Pero en un entorno industrial real, y en función del número y tipología de stakeholders, en el caso de que se cumplan todas las reglas posibles, es muy razonable esperar que se soliciten más. Hasta el momento en que habrá que decidir no respetar una regla.

Lo que recibe el nombre de “violar una regla”, “qué regla violar” y “qué hacer cuando se viola una regla” depende de un conjunto de factores relacionados:

- a) La importancia del stakeholder afectado
- b) El efecto de la violación de la regla en el sistema
- c) El tiempo desde que se conoce que se violará una determinada regla y el momento en el que efectivamente se observará el efecto de la violación.
- d) El modo en el que se “*will overcome*” la violación de la regla y la capacidad de mantener la “solución” en el tiempo
- e) La capacidad de parar la secuenciación a la espera de una mejor unidad.

Violar una regla es siempre una situación negativa en la que muchos factores hacen su “pequeña aportación”. Dada la natural capacidad del ser humano para “asignar culpas” y la evidente relación entre la violación de la regla y la persona que controla el proceso de secuenciación (no siendo las otras relaciones tan evidentes, aunque mucho más directas), la violación de una regla puede ser vista como algo dramático. En ese caso el proceso se orientará a reducir los “gritos de quien más grite”.

Si violar la regla afecta a la producción en la planta (por ejemplo conduciendo a una parada larga del sistema), antes de violarla probablemente habría que parar el proceso de secuenciación (si es posible) hasta recibir autorización para ello.

En ocasiones, si se conoce con suficiente antelación cuándo se va a violar una regla es posible plantear soluciones de contención (por ejemplo asignando recursos extra). En ese caso habría que valorar si es razonable mantener los recursos en la estación de trabajo y permitir que esa determinada regla se viole durante más tiempo, para mejorar las perspectivas.

Cuando una secuencia creada viola un conjunto de reglas, los stakeholders pueden gestionar las violaciones según dos dimensiones básicas: según su capacidad de reacción y según la persistencia deseada de la regla y según la decisión a adoptar.

Por capacidad de reacción, se entiende el aspecto temporal antes de que ocurra el problema. Diferentes tiempos se puede considerar en función de cada regla: el tiempo de takt, el tiempo de Señal para el Pro-

Maheut, J. and Garcia-Sabater, J.P.

veedor en el caso del suministro de piezas (El tiempo que dispone el proveedor para entregar el producto) o a efectos internos, el tiempo hasta que la violación sea efectiva en un puesto de trabajo. Todos estos tiempos justo con la posibilidad de utilizar operarios multi-función para apoyar en los sitios que se verán afectados.

Otra dimensión relevante para la gestión de las reglas es la persistencia de la violación. En general, siempre se intenta evitar violar una regla. Sin embargo, en determinados casos, si se viola una vez, es interesante anular la regla durante una ventana de tiempo, ya que se habrá puesto los recursos necesarios para que la regla no sea una.

Diferentes decisiones se pueden tomar cuando se va a violar una regla. Se puede hacer un hold y bloquear los coches en el almacén para impedir que se secuencien. Otra manera consiste en alisar la producción de los modelos durante una ventana de horas para que no se genere un hold pero que se siga consumiendo estos coches. Siempre que se puede, se puede añadir unos recursos extras o incluso, se podría no hacer nada.

Conclusión

En este artículo, se presenta una novedosa propuesta para definir y clasificar las reglas utilizadas para la secuenciación de unidades. La propuesta consiste en caracterizar las reglas aplicadas en la industrial según siete dimensiones distintas. En cada dimensión estudiada, se propone unos criterios así como unos ejemplos industriales que apoyan la clasificación y que demuestra que la mayor parte de la literatura plantea reglas sencillas, muy alejadas de la realidad industrial.

References

- Bard, J., Shtub, A., & Joshi, S. (1994). Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length. *The International Journal of Production Research*, 32(10), 2431-2454.
- Bautista, J., Pereira, J., & Adenso-Díaz, B. (2008a). A beam search approach for the optimization version of the car sequencing problem. *Annals of Operations Research*, 159(1), 233-244.
- Bautista, J., Pereira, J., & Adenso-Díaz, B. (2008b). A GRASP approach for the extended car sequencing problem. *Journal of Scheduling*, 11(1), 3-16.
- Boysen, N., Scholl, A., & Wopperer, N. (2012). Resequencing of mixed-model assembly lines: Survey and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 216(3), 594-604.

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>

Fliedner, M., & Boysen, N. (2008). Solving the car sequencing problem via branch & bound. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1023-1042.

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*, 191(3), 912-927.

doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.04.033>

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.

Wagner, S. M., & Silveira-Camargos, V. (2012). Managing risks in just-in-sequence supply networks: Exploratory evidence from automakers. *Engineering Management, IEEE Transactions On*, 59(1), 52-64.

Weiner, S. A. (1985). Perspectives on automotive manufacturing. *The management of productivity and technology in manufacturing* (pp. 57-72) Springer.