

Procedimientos de resolución para el equilibrado de líneas de montaje considerando variables los tiempos de operación. Aplicación en Centros Especiales de Empleo *

Cristóbal Miralles Insa¹, José Pedro García Sabater², Carlos Andrés Romano³, Manuel Cardós Carboneres⁴

- ¹ Ingeniero Industrial; cmiralles@omp.upv.es
² Dr. Ingeniero Industrial; jpgarcia@omp.upv.es
³ Dr. Ingeniero Industrial; candres@omp.upv.es
⁴ Dr. Ingeniero Industrial; mcardos@omp.upv.es

Dpto. de Organización de Empresas
Universidad Politécnica de Valencia.
Camí de Vera, s/n
46022 Valencia

RESUMEN

El problema del equilibrado de líneas se ha tratado tradicionalmente, sin dar demasiada importancia a las distintas habilidades de los trabajadores que ejecutan las tareas. Se considera incluso la simplificación de que el tiempo de operación para cada tarea es constante e independiente del trabajador al que es asignada. Esta simplificación no resulta válida en entornos con alta variabilidad en los tiempos de operación como son los Centros Especiales de Empleo para personas discapacitadas.

En este artículo, partiendo de un breve estado del arte, en que se exponen algunos de los trabajos que incluyen tiempos de operación distintos en función del operario, se presenta un estudio pormenorizado de las características de este tipo de centros, aspectos realistas que necesitan ser tenidos en cuenta al resolver el equilibrado. A partir de este estudio se evidencia la necesidad de modelar matemáticamente el problema incluyendo dichos aspectos, y se presenta un modelo de programación lineal que abre una nueva línea de investigación todavía no explorada. Este modelo se complementa con unos procedimientos que satisfacen otro de los acentuados requerimientos de los CEE: la necesidad de rotación de tareas. Finalmente se plantean una serie de conclusiones y de líneas futuras de investigación.

Palabras clave: *Equilibrado de líneas, tiempos de operación variables, Discapacidad.*

1. Introducción

En el ámbito de la integración socio-laboral de personas con discapacidades, los Centros Ocupacionales y, sobre todo, los Centros Especiales de Empleo (en adelante CEE), han venido adquiriendo una especial relevancia en los últimos años. Según la legislación actual [1], uno de los objetivos de los CEE es realizar un trabajo productivo, participando regularmente en las operaciones del mercado laboral y teniendo como finalidad la realización de un trabajo real

* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación financiado por la Generalitat Valenciana con referencia GV01-441, titulado: “Aplicación de Técnicas de Estudio del Trabajo a los Centros Ocupacionales para personas discapacitadas”

por parte de personas discapacitadas; ofreciendo a cambio una remuneración y servicios de ajuste personal y social de acuerdo con las necesidades de sus trabajadores minusválidos.

1.1 Las líneas de montaje en Centros Especiales de Empleo (CEE)

Las llamadas líneas de producción o de montaje son configuraciones muy frecuentes en los sistemas productivos. Parten de la idea básica de la división del trabajo en un conjunto finito de tareas sencillas, cuyo tiempo de operación es definido, y que mantienen una serie de relaciones de precedencia entre ellas, que deben ser respetadas a la hora del montaje. Así, el problema fundamental de equilibrado de una línea reside en asignar las tareas a una serie de estaciones de trabajo, de tal modo que se respeten dichas relaciones de precedencia y que se optimice cierta medida concreta de eficiencia [2].

Esta tradicional visión mecanicista que divide el trabajo en tareas sencillas tiene conocidos inconvenientes para los trabajadores (rutina, excesiva especialización, embrutecimiento del trabajo...) que, de hecho, han propiciado el desarrollo de diversas técnicas de enriquecimiento del trabajo [3] que intentan minimizarlos. En cambio, en los CEE esta clásica división del trabajo en tareas sencillas resulta, paradójicamente, una perfecta herramienta para conseguir cierta autonomía por parte de personas discapacitadas; siendo por ello las líneas de montaje una configuración muy habitual en estos centros de trabajo. De hecho, un adecuado equilibrado de la línea no sólo puede conseguir hacer “invisibles” ciertas discapacidades, sino que, con una apropiada asignación progresiva de tareas (con mecanismos de rotación), se puede incluso contribuir a la recuperación terapéutica de algunas capacidades.

Sin embargo, el problema clásico del equilibrado de líneas de montaje se ha abordado tradicionalmente sin dar mucha importancia a la diversidad existente en las habilidades y características de los trabajadores que ejecutan las tareas. Incluso se considera la simplificación de que el tiempo necesario para llevar a cabo una tarea es constante a lo largo del tiempo e independiente del trabajador al que se le asigna. Si en cualquier empresa esta excesiva simplificación puede resultar problemática, en los CEE, entorno real en que se ha inspirado la presente investigación, este problema se acentúa de modo considerable. En dicho entorno, la aplicación de las técnicas clásicas de balance de líneas resulta insuficiente debido a la complejidad que se añade al problema cuando se consideran nuevos condicionantes como: tiempos de operación variables según la persona que desarrolle las tareas, existencia de habilidades limitadas, absentismo laboral, ritmos de aprendizaje distintos, diferentes grados de motricidad, altas necesidades de rotación de puestos para evitar monotonía o como medida terapéutica... Así, aunque el campo inicial de investigación y de aplicación de las herramientas que aquí se proponen sean los CEE, campo prototípico de la diversidad humana, los resultados que se alcanzan pueden y deben ser extensibles a empresas con trabajadores ordinarios en las que se pretenda efectuar un equilibrado de líneas más ajustado a la realidad, más humano y, en definitiva, más completo.

El artículo queda estructurado del siguiente modo: en el siguiente apartado se desarrolla un breve estado del arte en que se exponen algunos de los trabajos que incluyen variabilidad en los tiempos de operación. A continuación se presenta un estudio de los aspectos específicos existentes en las líneas de montaje de CEE, aspectos realistas que necesitan ser tenidos en cuenta al resolver el equilibrado. En el siguiente apartado se presenta el modelo matemático del problema que incluye dichos aspectos; modelo realista cuya resolución abre una nueva

línea de investigación todavía no explorada, y que se complementa con unos procedimientos heurísticos que satisfacen otro de los acentuados requerimientos de los CEE: la necesidad de rotación de tareas en los puestos de trabajo. Finalmente se plantean una serie de conclusiones y líneas futuras de investigación.

2. Variabilidad en los tiempos de operación

Una gran parte de los modelos de equilibrado de líneas de montaje se basan en tiempos de operación fijos e independientes del operario al que se le asigne la tarea. Esta simplificación se justifica sólo en aquellos casos en los que la variación esperada del tiempo de las operaciones es suficientemente pequeña. Esto, como se ha dicho, no resulta válido en entornos de gran diversidad en las habilidades manuales de los operarios como los CEE, y tampoco lo es en muchos entornos de líneas de montaje manuales con trabajadores “ordinarios”. A pesar de no ser ésta una línea de investigación muy explorada, algunos autores se han acercado a ella, pero desde otras ópticas algo distintas al caso que nos ocupa. Así por ejemplo [4] propone una heurística de resolución del problema de equilibrado de líneas de montaje considerando niveles de rendimiento variables en los operarios de la misma. En [5] se aborda el diseño de una línea del tipo “unpaced”, considerando que existen diferencias en las habilidades de los operarios y que se pueden utilizar horas extras cuando al final del día no se ha cubierto la cuota de producción establecida. En [6] se estudia un caso en el que existen operarios genéricamente más o menos veloces (independientemente de la tarea asignada) pero parten de disponer de las líneas ya equilibradas y se limitan a rotar temporalmente a los operarios. Asimismo, en [7] se habla de operarios más o menos veloces a ubicar, pero dentro de una configuración específica TSS (*Toyota Swen System*) en la que son los operarios los que se mueven transportando consigo el producto a las diferentes estaciones en que sufren las sucesivas operaciones. Más recientemente, [8] presentan un modelo para el equilibrado de líneas de montaje que considera duraciones de las tareas dependientes del tipo de estación, y que engloba varias de las situaciones industriales encontradas, pero que sólo permite diferenciar entre dos tipos de operarios: expertos e inexpertos.

3. Características del entorno real de los CEE

Después de analizar las líneas de montaje de los CEE que participan en nuestro proyecto de investigación, pueden establecerse algunas características comunes a todos ellos. Así, el problema específico de balance de líneas que debe modelarse reúne en un mismo entorno productivo los siguientes condicionantes a tener en cuenta:

1. Suele haber una gran diferencia entre las medias deterministas que pudiéramos obtener (a partir de registros históricos o estimaciones) de cada tarea en función de qué operario la ejecute. Estos tiempos suelen ser conocidos incluso para nuevos trabajadores, ya que éstos suelen tener un periodo previo de prácticas.
2. En muchos casos ese tiempo de operación no sólo es alto, sino que directamente el operario por su tipo de discapacidad está imposibilitado para hacer según qué tareas. Esto es muy usual cuando se trata de discapacidades físicas o sensoriales.
3. Aparte de la diferencia entre operarios, la propia variabilidad de un operario discapacitado suele ser más alta de lo normal. Es decir, no hay operarios

genéricamente más o menos veloces que asignar como en [8]. En vez de eso, los trabajadores pueden ser muy lentos, o incluso incapaces, para algunas tareas, pero muy eficientes ejecutando otras. Además también tienen variaciones de rendimiento estacional muy agudas que deben ser controladas para proporcionar datos de entrada fiables al sistema.

4. Las curvas de aprendizaje son también de pendientes distintas dependiendo de cada persona y de sus circunstancias particulares.
5. La deseable rotación de puestos de trabajo como método de enriquecimiento del trabajo, aquí puede llegar a ser en ciertos casos imprescindible para la mejora, cuando no simple mantenimiento, de las capacidades de algunos operarios (por ejemplo la mejora de la motricidad fina mediante diversificación de los trabajos manuales a realizar). En cambio para otros casos lo aconsejable puede que sea lo contrario (por ejemplo en ciertos trastornos psíquicos la rutina en el trabajo es recomendada por los psicólogos como estímulo para el establecimiento de ciertos hábitos de conducta [9]).
6. Las rotaciones o reasignaciones radicales de tareas no son recomendables. Es preferible efectuar rotaciones progresivas de tareas dependiendo de cada operario (además así se evitan curvas de aprendizaje demasiado pronunciadas).
7. El objetivo primario en los CEE, y que no debe olvidarse, es que sus trabajadores consigan una constante evolución en sus capacidades que les lleve a una integración real en empresas ordinarias. Por tanto es relativamente usual que un trabajador que evolucione muy positivamente deje el CEE para ir a una empresa ordinaria justo cuando alcanza su mejor rendimiento. Estos casos obligan a un rediseño de la asignación de puestos existente hasta ese momento en la línea.
8. El absentismo está muy presente, ya que las personas discapacitadas suelen estar más expuestas a problemas de salud, tanto física como psicológica.
9. Además, todo CEE debe mantener un servicio de apoyo psicológico, que implica un seguimiento y control de cada trabajador, para el que éste deberá abandonar su puesto con una periodicidad que dependerá de su discapacidad. Ésta y las dos anteriores características recalcan más, si cabe, la necesidad de una herramienta de apoyo al encargado de asignar y reasignar las distintas tareas a las personas en la línea en función de los trabajadores disponibles en cada momento (es decir, de equilibrarla).

Como conclusión se puede concluir que los CEE son instituciones que compiten en mercados reales y que por tanto, para su propia supervivencia, deben ser eficientes; pero que a la vez deben promover la integración socio-laboral de las personas discapacitadas que allí trabajan, teniendo en cuenta sus limitaciones y procurando una evolución positiva en sus capacidades. Por tanto una buena herramienta de equilibrado de líneas para este entorno concreto de trabajo debería ser capaz de combinar ambos objetivos (que no deben ser vistos como contradictorios sino como complementarios) y por tanto debería simultáneamente:

- Procurar la máxima eficiencia de la línea en función de las personas disponibles en cada momento y de sus capacidades.
- Respetar y tener en cuenta todas las limitaciones expuestas; ofreciendo dentro de lo posible la mejora de las capacidades individuales de los trabajadores.

Este doble objetivo se aborda en dos fases separadas que a continuación se exponen.

4. Primera fase: modelado y resolución

Según nuestra experiencia, el principal problema que encontramos a priori (problema que no sólo se da en CEE), suele ser la gran dificultad para mantener un exhaustivo registro histórico y control de la evolución de las capacidades de cada operario para efectuar cada tarea. Sin este control, obviamente, resulta vano cualquier intento de modelado y resolución del problema real, ya que son necesarios muchos datos de entrada personalizados sobre ritmos de trabajo de cada operario para cada tarea. Así pues, y presuponiendo que dicho control existe, la situación más común es, como en el clásico SALBP-2, la de tener unos recursos disponibles (pero esta vez heterogéneos en cuanto a tiempos de operación) a los que se deben asignar tareas con el objetivo de optimizar cierto criterio productivo (minimizar el tiempo de ciclo). Esta asignación, además de respetar las clásicas relaciones de precedencia entre tareas, deberá respetar ciertas incompatibilidades tarea-operario (por ejemplo cuando por criterios terapéuticos no se aconseja, o cuando simplemente el trabajador es incapaz de ejecutarla); así como ciertas asignaciones definidas a priori (cuando así es recomendado, o simplemente cuando esa persona es la única capaz de ejecutar esa tarea). La nomenclatura empleada para definir completamente el problema será la siguiente:

<u>DATOS:</u>	
N	Conjunto de tareas ($i, j = 1 \dots N$)
H	Conjunto de operarios disponibles para ejecutar una o más tareas en una estación ($h, g = 1 \dots H$)
S	Conjunto de estaciones ($s, k = 1 \dots H$). Se definen sólo para poder mantener las precedencias
P_j	Conjunto de tareas que preceden inmediatamente a la tarea j en el diagrama de precedencias
I	Conjunto de parejas ig tarea-operario incompatibles
R	Conjunto de parejas ih tarea-operario que deben asignarse a priori
p_{hi}	Tiempo de operación (process time) para la tarea i cuando el operario h la ejecuta
\bar{W}	Carga de trabajo en todas las estaciones en un equilibrado ideal (definido para la rotación)
<u>VARIABLES:</u>	
x_{shi}	Variable binaria: 1 sii la tarea i se asigna al trabajador h en la estación s
y_{sh}	Variable binaria: 1 sii el trabajador h se asigna a la estación s
W_s	Carga de trabajo (Workload) asignada a la estación s ($W_s = \sum_{i=1}^N p_{hi} \cdot x_{shi} \quad \forall s \in S$)
C	Tiempo de Ciclo obtenido
$E(i)$	Índice de la estación más adelantada a la que un sucesor inmediato de i ha sido asignada
$L(i)$	Índice de la estación más atrasada a la que un predecesor inmediato de i ha sido asignada

Tabla 1: Nomenclatura empleada

$$[MIN] z = C \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{shi} = 1; \quad i = 1 \dots N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{hi} \cdot x_{shi} \leq C; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} = 1; \quad \forall h \in H \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} = 1; \quad \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{shi} \leq M \cdot y_{sh}; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} S \cdot x_{shi} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} S \cdot x_{shj} \quad \forall i, j / i \in P_j \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} x_{shi} = 1; \quad \forall (i, h) \in R \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s \in S} x_{shi} \geq 1; \quad \forall h \in H \quad (9)$$

con:

$$x_{shi} \in [0, 1] \forall s \in S, h \in S, i = 1 \dots N$$

$$y_{sh} \in [0, 1] \forall s \in S, h \in S$$

$$M > \sum_{i=1}^N p_{hi}$$

Donde:

- La función objetivo (1) minimiza el tiempo de ciclo
- Con el conjunto de restricciones (2) cada tarea i se asigna a una única estación s y operario h .
- (3) implica que cada operario h asignado a una estación s puede tener varias tareas siempre que no supere el tiempo de ciclo C (si un operario h por su discapacidad u otra razón no puede/debe realizar una tarea concreta i , basta con penalizar su tiempo de operación de esa tarea con $p_{hi} = \infty$; y así evitamos restricciones adicionales)
- Con (4) y (5), combinadas con (6), se introduce la variable y_{sh} . Esta variable obliga a que un operario sea asignado a una única estación y viceversa. Como, tanto y_{sh} como el tiempo de ciclo son variables, se han definido (3) y (6) de forma separada para evitar que se multipliquen, lo cual llevaría a un modelo no lineal.
- (7) es debido a las relaciones de precedencia entre las parejas de tareas i, j donde i es predecesora de j .
- (8) fija las relaciones tarea-trabajador $(i, h) \in R$ que son relaciones a priori por distintas causas ya explicadas.
- Con (9) se garantiza que, incluso si hay mucha diferencia entre el más lento y el más rápido, a todos los trabajadores se les asignará alguna tarea.

La incompatibilidad (o inseparabilidad) entre tarea y estación no se ha modelado porque no existe en el entorno real, ya que se trata de tareas manuales a equilibrar pero no en estaciones preestablecidas. Si por ejemplo hubiese gran maquinaria en una determinada estación, en ese caso la tarea sí debería ir asociada a la estación a priori mediante una restricción adicional. Esto, en principio, no sucederá porque estamos precisamente equilibrando para situar tareas en “estaciones-operario”.

5. Segunda fase: rotación y alisado de la carga

Los CEE tienen una gran necesidad de rotación de puestos de trabajo debido a sus especiales circunstancias. Según se ha explicado, deben diseñarse mecanismos de rotación progresiva de tareas que se hagan de acuerdo a las necesidades de los trabajadores, incluso si se pierde cierta eficiencia productiva (es decir, si por ello se aumenta el tiempo de ciclo). Debido a la gran cantidad de variables definidas en el modelo, éste se ha testado con datos reales tomados de CEE participantes en el proyecto, pero sólo para casos de pocas tareas y pocos trabajadores. Una vez resuelto el modelo, y dada una solución óptima, cualquier cambio en esta asignación obviamente hace empeorar el tiempo de ciclo (sólo si existen múltiples soluciones óptimas puede que esto no sea así). Por tanto, es necesario definir un criterio distinto al tiempo de ciclo para efectuar las rotaciones.

Dado que la heterogeneidad de los datos de entrada lleva en muchas ocasiones a asignaciones con carga de trabajo desigual, un buen criterio para realizar las rotaciones puede ser el de tender hacia un reparto equivalente de carga de trabajo en las distintas estaciones. De este modo se consigue: por un lado que las personas discapacitadas trabajen en distintas tareas de modo progresivo contribuyendo a mejorar sus capacidades según los comentados objetivos organizacionales de los CEE. Por otro lado el reasignar las tareas con el objetivo de tender hacia una carga equivalente de trabajo nos garantiza, en cierto modo, que la eficiencia de la línea no decrecerá excesivamente [10]; ya que ninguna estación adquirirá demasiada carga como para representar un cuello de botella muy diferenciado respecto a las demás estaciones.

5.1 Rotación de puestos y alisado de la carga en la literatura

No existen demasiadas referencias en la literatura que aborden de forma práctica el problema del diseño de mecanismos de rotación en líneas de montaje en un caso como éste; quizás porque generalmente se considera que los tiempos de operación no varían al reasignar una tarea a un trabajador distinto. En este marco se han diseñado algunas técnicas, aplicadas con relativo éxito en plantas automovilísticas suecas, bajo el término de *Reflective Production* acuñado en [11], que procuran una extensión horizontal de las funciones del operario que minore la rutina y la fatiga en el puesto y contribuya a mejorar la calidad y flexibilidad. En [12] se cuantifica el aumento de dicha calidad y flexibilidad de la línea, a pesar de la pérdida de eficiencia transitoria que pueda suponer el aprendizaje de una nueva tarea. Algunas referencias más trabajan en esta línea, pero ninguna de ellas especifica mecanismos concretos de rotación aplicables al caso especial de los CEE.

Sin embargo sí se han desarrollado diversos procedimientos para equilibrar líneas ordinarias teniendo como objetivo el asignar una carga de trabajo equivalente en las estaciones (p.ej.

[13], [14]o [15]).Éstas han sido buenas referencias para adaptar ciertos evaluadores de reparto de carga que permiten diseñar procedimientos específicos de rotación para nuestro caso.

5.2 Procedimiento de rotación diseñado

Supongamos que tenemos perfectamente equilibrada una línea de montaje en un CEE. En una asignación perfecta, en lo que a reparto de carga de trabajo entre estaciones se refiere, no habría tiempos ociosos y se daría una carga ideal en todas las estaciones igual a:

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{h \in H} P_{hi}}{N^2} \quad (10)$$

Por lo que un buen criterio lineal para evaluar la carga de trabajo en una asignación no ideal puede ser la suma de desviaciones absolutas respecto a dicha media ideal:

$$MAD = \sum_{s \in S} |W_s - \bar{W}| \quad (11)$$

Tomando ese criterio como válido, se ha diseñado un procedimiento de rotación de tareas que, según lo expuesto, debe ejecutarse preferentemente de forma progresiva, para así evitar el penalizar con curvas de aprendizaje demasiado pronunciadas. Para este procedimiento, el encargado de reasignar las tareas deberá definir antes cual será la temporización más adecuada para dichas rotaciones, atendiendo a criterios terapéuticos, productivos o de otro tipo. Así, de acuerdo a dicha planificación, o cuando sea eventualmente conveniente, dicho encargado evaluará para el correspondiente operario h (en la estación s) qué reasignación factible de sus tareas minimiza la suma de desviaciones absolutas, MAD, definida. Una vez elegida la mejor, se efectuará dicha reasignación de la tarea i al operario g (en la estación k) y permanecerá así hasta nueva rotación; o hasta que una de los múltiples circunstancias explicadas provoque un cambio en cuanto a los recursos (operarios) disponibles que obligue a un nuevo equilibrado.

A continuación se expone el esquema básico del procedimiento de rotación de tareas diseñado en base al MAD como evaluador del reparto de carga:

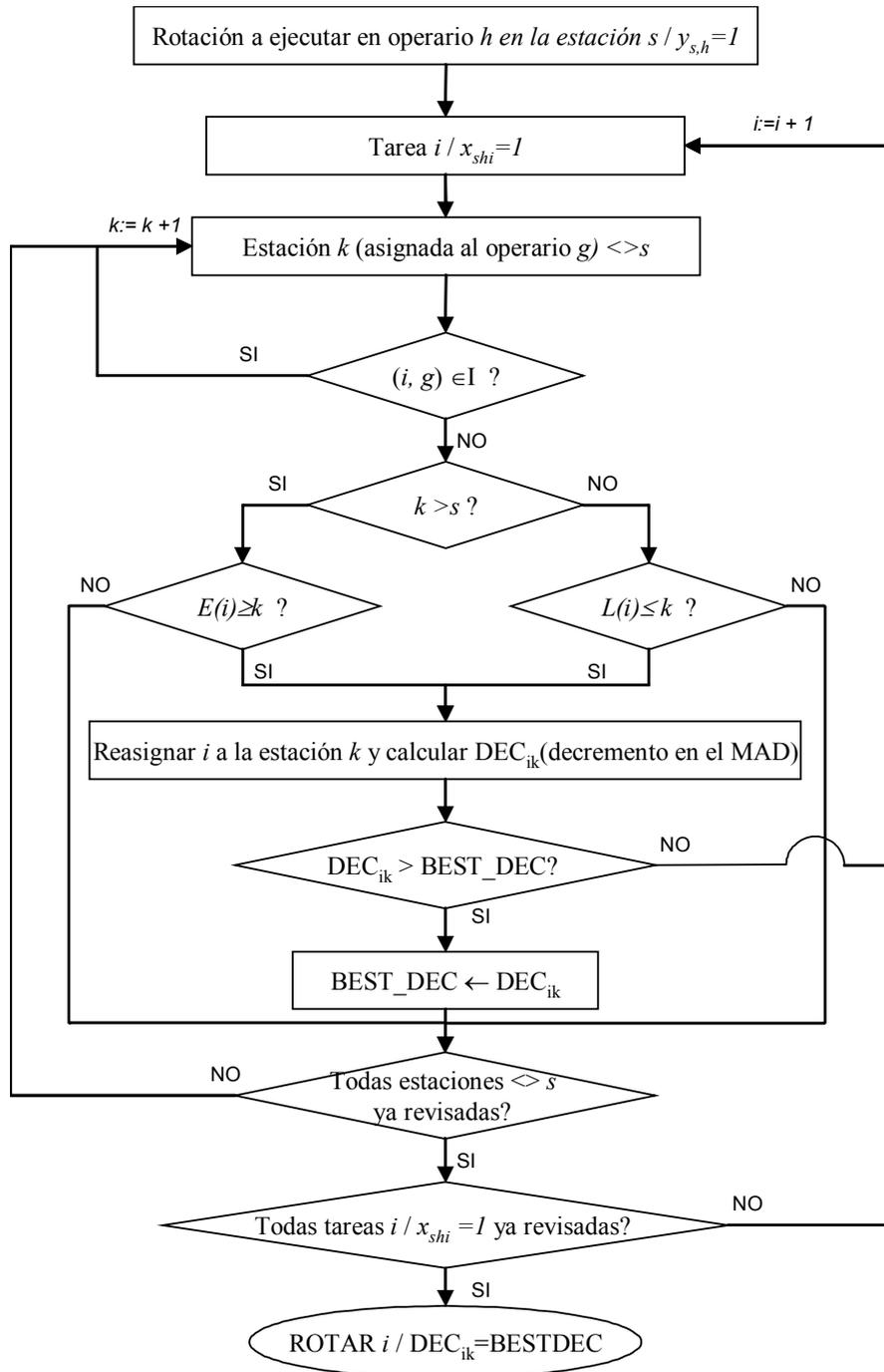


Figura 1: Procedimiento de rotación de tareas

En la figura 2 podemos ver esquemáticamente cómo lo que hace el procedimiento es buscar iterativamente para cada tarea i asignada a h , y para cada estación candidata k , cual es la mejor reasignación; chequeando previamente el cumplimiento de relaciones de precedencia e incompatibilidad.

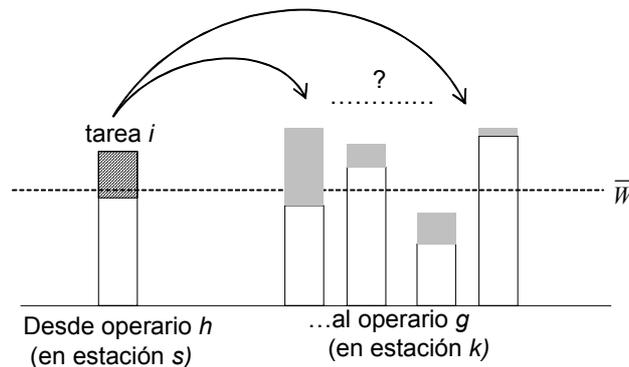


Figura 2: Esquema básico del procedimiento

El método evalúa para cada reasignación potencial el decremento experimentado en el MAD, quedándose con el mejor (BEST_DEC). Como una misma tarea tiene tiempos de procesamiento distintos para cada operario, dependiendo de las relaciones entre W_s , W_k , \bar{W} , p_{hi} y p_{gi} , el algoritmo puede evaluar fácilmente cual sería el decremento de MAD en cada caso mediante la siguiente tabla:

$W_s \backslash W_k$	$> \bar{W}$		$\leq \bar{W}$		
	$\geq \bar{W}$	$W_s - p_{hi} \geq \bar{W}$	$p_{hi} - p_{gi}$	$W_s - p_{hi} \geq \bar{W}$	$W_s + p_{gi} \geq \bar{W}$
				$(p_{hi} - p_{gi}) + 2(\bar{W} - W_k)$	$p_{hi} + p_{gi}$
	$W_s - p_{hi} < \bar{W}$	$2(W_s - \bar{W}) - (p_{hi} + p_{gi})$	$W_s - p_{hi} < \bar{W}$	$2(W_s - W_k) - (p_{hi} + p_{gi})$	$(p_{gi} - p_{hi}) - 2(\bar{W} - W_s)$
$< \bar{W}$	MAD no mejora en ningún caso		$W_s + p_{gi} \geq \bar{W}$	$W_s + p_{gi} < \bar{W}$	
			$2(\bar{W} - W_k) - (p_{hi} + p_{gi})$		$p_{hi} - p_{gi}$

Tabla 2: Decremento del MAD para cada caso

En esta tabla puede verse como hay potenciales estaciones k de destino en que ni siquiera es necesario evaluar MAD (cuando $W_s < \bar{W}$ y $W_k > \bar{W}$), porque nunca conviene dicha reasignación; y otras en que siempre conviene ya que nunca habrá decrementos negativos de MAD (o sea, que el MAD será menor en todo caso).

6. Conclusiones

Este artículo aborda el problema de las líneas de montaje en CEE, un entorno de especiales características que ofrece una gran variabilidad en los tiempos de operación de las tareas, así

como otras circunstancias particulares que han sido analizadas. Después de una necesaria fase de observación de la realidad, se ha establecido una revisión bibliográfica de los trabajos que más se aproximan al problema analizado. Visto que ninguna de las referencias abordaba el problema concreto existente en los CEE, se ha caracterizado como un nuevo problema en que, además de asignar cada tarea a una estación, se debe elegir qué operario se sitúa en cada estación, existiendo grandes variaciones entre operarios. Se puede ver como una extensión del problema clásico SALBP-2, pero con recursos disponibles heterogéneos (trabajadores discapacitados) con características muy concretas, a los cuales se deben asignar tareas con el objetivo de minimizar el tiempo de ciclo. Al resolver el modelo exacto presentado se consigue dicho objetivo, respetando además las clásicas relaciones de precedencia entre tareas, así como ciertas incompatibilidades y asignaciones tarea-operario definidas a priori. El modelo matemático desarrollado es complementado con un procedimiento que resuelve con criterio coherente la rotación progresiva de tareas, tan necesaria en este entorno; así como en otros entornos ordinarios de gran rutina en el trabajo en donde podría ser aplicado.

Por último, cabe señalar que la diversidad existente en los tiempos de operación en líneas de CEE, aunque minorada, también está presente en líneas de montaje con operarios sin discapacidad. Por ello, todos los resultados alcanzados pueden y deben ser extensibles a estas líneas ordinarias consiguiendo así efectuarse un equilibrado más ajustado a la realidad.

Agradecimientos

Agradecer a la Generalitat Valenciana por la dotación del proyecto “Aplicación de Técnicas de Estudio del Trabajo a los Centros Ocupacionales para personas discapacitadas” en que se desarrolla éste y otros trabajos relacionados.

También dar un sincero agradecimiento a los Centros Especiales de Empleo que más han colaborado en la recopilación de datos para este trabajo: ADAPTA, ESPURNA, CEEME, ALCER-TURIA, EL RENAIXER y SERVIDISCA

Referencias

- [1] Artículo 42 de la L.I.S.M.I. (*Ley de Integración Social del MI*nválido)
- [2] Ghosh, S. y R.J. Gagnon (1989), “A comprehensive Literature Review and Analysis of the Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems”, *International Journal of Production Research* 27, 637-670
- [3] Marín, J. A., M. Pardo y T. Bonavia (2002), “The Impact of Training and Ad Hoc Teams in Industrial Settings”. *6th International Workshop on Teamworking (IWOT 6)*. Mälmo (Sweden).
- [4] Mansoor, E.M. (1968), “Assembly Line Balancing: A heuristic Algorithm for Variable Operator Performance Levels”, *Journal of Industrial Engineering* 19, 618.
- [5] Doerr, K.; T.D. Klastorin y M.J. Magazine (2000), “Synchronous Unpaced Flow Lines with Worker Differences and Overtime Cost”, *Management Science* 46, 421-435.
- [6] Hopp, W.J.; Tekin E. y M.P. Van Oyen (2001), “Benefits of skill chaining in Production Lines with Cross Trained workers”. WorkSmart Laboratory Technical Report.

- [7] Bartholdi, J.J. y D. Eisenstein (1996), "A Production Line that Balances Itself", *Operations Research* 44, 21-33.
- [8] Corominas, A.; R. Pastor. y J. Plans (2003), "Línea de montaje con tiempos dependientes del tipo de operario" 27 Actas Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. 2789-2795.
- [9] Jurado de los Santos, P. (1999), "La transición escuela/trabajo y la evaluación de personas con discapacidad", Ediciones Aljibe, Madrid.
- [10] Smunt, T.L. y W.C. Perkins (1985), "Stochastic unpaced line design: review and further experimental results", *Journal of Operations Management* 5, 351-373.
- [11] Ellegard, K.; D. Jonsson; T. Engström; M.I. Johansson y L. Medbo (1992), "Reflective Production in the Final Assembly of Motor Vehicles", *International Journal of Operations&Production Management* 12, 117-133.
- [12] Nembhard, D.A. y B. Norman (2003), "Worker Efficiency and Responsiveness in Cross-Trained Teams", Working paper. Submitted to Management Science.
- [13] Rachamadugu, R. y B. Talbot (1991), "Improving the Equality of Workload assignments in Assembly Lines" *International Journal of Production Research* 29, 619-633.