

XXIV CONGRESO NACIONAL DE ACEDE
SEPTIEMBRE 2014, CASTELLÓN

**DISEÑO Y EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE MINIMIZANDO
EL RIESGO ERGONÓMICO**

Joaquín Bautista Valhondo

Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.

Cristina Batalla García

Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.

Rocío Alfaro Pozo

Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.

Datos de contacto:

Joaquín Bautista Valhondo
Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.
Departamento de Organización de Empresa, DOE.
Avda. Diagonal, 647. Barcelona
93 401 17 03
Joaquin.bautista@upc.edu

XXIV CONGRESO NACIONAL DE ACEDE
SEPTIEMBRE 2014, CASTELLÓN

DISEÑO Y EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE MINIMIZANDO EL RIESGO ERGONÓMICO

Joaquín Bautista Valhondo
Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.

Cristina Batalla García
Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.

Rocío Alfaro Pozo
Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.

Resumen

Se establece un sistema de medición del riesgo ergonómico generado por las operaciones requeridas en una línea de montaje. Se formula un modelo matemático para el problema de equilibrado de líneas de ensamblaje, con el objetivo de minimizar el riesgo ergonómico de la línea y considerando el número de puestos de trabajo, además de un conjunto de restricciones de carácter temporal y espacial. Se realiza una aplicación del modelo mediante una experiencia computacional basada en un caso de estudio de la planta de ensamble de motores de Nissan en Barcelona. El experimento mide el impacto generado por el incremento del número de puestos de trabajo sobre el incremento de la calidad ergonómica de los mismos en sintonía con la reducción del riesgo ergonómico de la línea.

Palabras clave:

Operaciones productivas y logísticas; Equilibrado de líneas de producción y montaje; TSALBP; Ergonomía; Riesgo ergonómico.

DISEÑO Y EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE MINIMIZANDO EL RIESGO ERGONÓMICO

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de todas las medidas preventivas que se toman, en los países de la *OCDE* (Organization for Economic Cooperation and Development), para que el diseño de puestos de trabajo, en líneas de producción del sector de automoción, conduzca a las mejores condiciones ergonómicas para el trabajador, es evidente que, por las características propias del tipo de trabajo, hay una serie de factores físicos y psíquicos que pueden acabar perjudicando la salud del trabajador.

La carga física generada por el ensamblaje de componentes en las líneas de motores (Engines) o las posturas requeridas para la fijación de elementos, en el interior de un vehículo, en las líneas de vestido (Trim & Chassis), donde hay una presencia importante de recursos humanos, son factores de carácter general que, aplicados de forma continuada, pueden derivar en una lesión o en una enfermedad.

En automoción y otros sectores industriales, como la construcción, existen diversos métodos para evaluar separadamente cada uno de estos factores de riesgo ergonómico (cargas posturales, movimientos repetitivos o levantamiento de cargas). Entre dichos métodos se encuentran el método *RULA* (Rapid Upper Limb Assessment), y el *REBA* (Rapid Entire Body Assessment) (Hignett y McAtamney, 2000), para la carga postural; el método *NIOSH-equation* (National Institute for Occupational Safety and Health) (Waters et al., 1997) para la evaluación manual de cargas; y el método *OCRA* (Occupational Repetitive Action) (Colombini et al., 2002) para los movimientos repetitivos.

Sin embargo, el diseño ergonómico de los puestos de trabajo no es el único problema que presentan las líneas de montaje. Actualmente, las líneas de producción, en automoción, deben ser capaces de tratar diferentes modelos (p.e. motores para 4x4, motores para furgonetas o para camiones de medio tonelaje) con distintas variantes (diesel, gasolina, cilindrada, etc.) que, aunque similares, pueden suponer operaciones con distinto tiempo de proceso, distinto uso de recursos y distinto consumo de componentes. A este hecho debe sumarse, a la hora de diseñar un sistema productivo orientado al producto, denominado línea de producción, la satisfacción de un conjunto de restricciones asociadas a la tecnología del producto, a las condiciones de la planta de fabricación y a la capacidad productiva que se desee dar al sistema.

En este contexto, aparece un problema clásico de la literatura que, bajo la denominación general *ALBP* (Assembly Line Balancing Problem), tiene por objeto el diseño y la gestión de sistemas productivos orientados al producto y destinados a la fabricación en masa.

Desde el trabajo pionero de Salvenson (1955), dicho problema ha sido extensamente tratado en la literatura científica (Baybars, 1986), existiendo diversas taxonomías recientes sobre el mismo (Becker y Scholl, 2006 o Battaia y Dolgui, 2013).

Como hemos dicho, los problemas de equilibrado de líneas de montaje presentan multitud de variantes y, en esencia y para el caso que nos ocupa, se pueden enunciar como sigue: Dado, por una parte, (1) un conjunto de operaciones o tareas $(J : j = 1, \dots, |J|)$, a las que se puede asociar una serie de atributos temporales (tiempo de proceso de la tarea, $t_j : j = 1, \dots, |J|$), espaciales (área requerida por la tarea, $a_j : j = 1, \dots, |J|$) y ergonómicos (riesgo ergonómico de la tarea: $R_j : j = 1, \dots, |J|$), entre otros; dado, por otra parte, (2) un conjunto, finito o no, de estaciones o puestos de trabajo $(K : k = 1, \dots, |K|)$; y dados, finalmente, (3) un conjunto de ligaduras de precedencia y sucesión entre tareas, restricciones de incompatibilidad, y una serie de limitaciones que afectan a las estaciones en cuanto al tiempo de proceso asignable, al área disponible y al riesgo admisible; el problema de equilibrado de líneas consiste en asignar todas las tareas al conjunto de estaciones, de forma que se respeten todas las restricciones y limitaciones y se alcance la máxima productividad en el sistema.

En los trabajos de la literatura especializada, los atributos empleados con mayor frecuencia son los temporales (tiempos de proceso), limitando el tiempo que puede dedicar cada estación a una unidad de producto (tiempo de ciclo, c). A estos atributos temporales se han ido sumando características sobre el área que requieren los materiales y las herramientas para ejecutar las operaciones en las estaciones - apareciendo nuevas familias de problemas, como el *TSALBP* (Time and Space Assembly Line Balancing Problem, Bautista y Pereira, 2007 y Chica et al., 2010) -, así como limitaciones e indicadores relacionados con el riesgo ergonómico (Otto y Scholl, 2011) y vinculados a la posibilidad de sufrir lesiones por no presentar, los puestos de trabajo, unas condiciones ergonómicas adecuadas cuando se tienen en cuenta las posturas corporales monótonas requeridas a los trabajadores de la línea a lo largo de la jornada laboral.

En esta línea de trabajo, consistente en agregar nuevas cualidades a los problemas de equilibrado de líneas, Bautista, Batalla y Alfaro (Bautista et al., 2012) proponen una extensión de la familia de problemas *TSALBP* mediante la incorporación de restricciones que limitan, inferior y superiormente, el riesgo físico y psíquico generado por la carga de trabajo en las estaciones; dicho riesgo se evalúa a partir de los tiempos de proceso de las operaciones y de un sistema de categorías del riesgo que su ejecución conlleva. En un trabajo posterior (Bautista et al., 2013), se analiza, mediante restricciones, el impacto que supone la reducción del riesgo sobre el incremento del número de puestos de trabajo que precisa la línea para mantener su capacidad de producción.

Partiendo de lo anterior, en el presente trabajo presentamos un modelo de *MILP* (Programación Lineal Entera Mixta) para el equilibrado de la línea de producción mixta de motores, perteneciente a la planta de Nissan localizada en Barcelona. El objetivo del modelo es minimizar el riesgo ergonómico en un

conjunto de escenarios representativo de la variación del número de puestos de trabajo, satisfaciendo una demanda prefijada y, por tanto, manteniendo la capacidad de la línea, y con la posibilidad de limitar la ocupación del sistema productivo, la cual se mide a través de la longitud total de la línea.

2. RIESGO ERGONÓMICO

A la hora de examinar el riesgo ergonómico de una tarea incluida en un trabajo se detecta que los operarios están expuestos a una gran variedad de factores de riesgo. La mayoría de los sistemas de evaluación consideran y evalúan de forma independiente los riesgos asociados a dichos factores.

Los factores de riesgo, de carácter físico, más usuales son: (1) la carga postural, (2) los movimientos repetitivos y (3) la manipulación manual de cargas. Para su evaluación, se encuentran los siguientes métodos de evaluación del riesgo:

- Carga postural: *RULA* (Rapid Upper Limb Assessment), *OWAS* (Ovako Working Analysis System) y *REBA* (Rapid Entire Body Assessment).
- Movimientos repetitivos: *OCRA* (Occupational Repetitive Action), *Check-List OCRA* y *JSI* (Job Strain Index).
- Manipulación manual de cargas: *NIOSH* (National Institute for Occupational Safety and Health), *G-INSHT* (Guía Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo) y *Ergo-IBV* (Instituto de Biomecánica de Valencia).

Nuestra propuesta integra algunos de los métodos anteriores para la evaluación del riesgo ergonómico de cualquier tarea o conjunto de tareas respecto a cualquier factor o conjunto de factores.

Para llevar a cabo dicha integración, se procede de la siguiente forma: (1) se parte de un conjunto de factores de riesgo Φ ($\phi = 1, \dots, |\Phi|$) físicos y/o psíquicos; (2) dada la tarea $j \in J$ ($j = 1, \dots, |J|$) y el factor de riesgo $\phi \in \Phi$ ($\phi = 1, \dots, |\Phi|$), se asocia la categoría de riesgo $\chi_{\phi,j}$ a dicha tarea, en función de dicho factor; (3) se determina el riesgo ergonómico de la tarea $j \in J$, generado por el factor de riesgo $\phi \in \Phi$, multiplicando el tiempo de proceso de la tarea, t_j , por su categoría $\chi_{\phi,j}$, esto es: $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$; y (4) se determina el riesgo ergonómico agregado, tanto de tareas como de factores, sumando, para ello, los riesgos ergonómicos elementales presuponiendo que se cumple el principio de superposición entre ellos.

En nuestra propuesta, la categoría de riesgo $\chi_{\phi,j}$ asociada a una tarea elemental $j \in J$ y a un factor de riesgo $\phi \in \Phi$, adopta valores comprendidos en 4 niveles de riesgo: (L1) Aceptable, $1 \leq \chi_{\phi,j} < 2$; (L2) Leve-moderado, $2 \leq \chi_{\phi,j} < 3$; (L3) Alto, $3 \leq \chi_{\phi,j} < 4$; (L4) Inaceptable, $\chi_{\phi,j} \geq 4$.

Para la mejora de las operaciones productivas desde el punto de vista ergonómico, en la tabla 1 se recogen las acciones correctoras recomendadas en función del nivel de riesgo.

Tabla 1: Descriptor del nivel de riesgo y acción correctora propuesta para cada nivel

Nivel de riesgo	Descriptor	Acción correctora
L1	Aceptable	No se requiere acción por no mostrar ninguna dolencia o riesgo al trabajador
L2	Leve-Moderado	Es recomendable un análisis del puesto por ser necesario, en un futuro, acciones correctivas para su mejora.
L3	Alto	Recomendable un análisis junto con una mejora del puesto de forma inmediata y supervisión médica. Controles periódicos.
L4	Inaceptable	Modificación de inmediato del puesto por presentar dolencias graves al trabajador.

3. MODELO MATEMÁTICO

Proponemos un programa matemático mono-objetivo para resolver un problema de equilibrado de líneas de producción y de montaje. Para el diseño de la línea se tienen en cuenta aspectos temporales y espaciales (modelo derivado de la familia *TSALBP*) y se incluyen, además, aspectos ergonómicos.

El modelo propuesto considera un número conocido y fijo de estaciones, un área lineal disponible en cada puesto de trabajo que ha sido previamente establecida y una tasa de producción constante y conocida que se corresponde con la inversa del tiempo de ciclo.

El problema a resolver consiste en asignar un conjunto de tareas elementales a un conjunto de estaciones de trabajo de forma que el riesgo ergonómico de la línea sea mínimo. Además, en toda asignación factible se deben satisfacer las siguientes condiciones: (1) que se respeten las ligaduras de precedencia que existen entre las tareas, (2) que el tiempo de proceso correspondiente a la carga de trabajo (tareas asignadas), de cualquier estación, no supere al tiempo de ciclo, y (3) que el área lineal requerida por la carga de trabajo, de cualquier estación, sea menor o igual que el área lineal concedida a cada estación o puesto de trabajo.

Las líneas que inmediatamente siguen están dedicadas a la definición de parámetros y variables del modelo $M - \min \bar{R}(\Phi)$, y a la formulación del mismo.

Parámetros

J	Conjunto de tareas elementales ($j = 1, \dots, J $).
K	Conjunto de estaciones de trabajo de la línea ($k = 1, \dots, K $).
Φ	Conjunto de factores de riesgo físicos y psíquicos ($\phi = 1, \dots, \Phi $).
t_j	Tiempo de proceso de tarea j ($j = 1, \dots, J $) a actividad normal.

- a_j Área lineal requerida por la tarea elemental j ($j=1,\dots,|J|$).
- $\chi_{\phi,j}$ Categoría de la tarea j ($j=1,\dots,|J|$) respecto al factor de riesgo ϕ ($\phi=1,\dots,|\Phi|$).
- $R_{\phi,j}$ Riesgo ergonómico de la tarea j ($j=1,\dots,|J|$) generado por el factor de riesgo ϕ ($\phi=1,\dots,|\Phi|$). Aquí se determina así: $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$.
- P_j Conjunto de tareas precedentes inmediatas de la tarea j ($j=1,\dots,|J|$).
- c Tiempo de ciclo. Tiempo concedido a cada estación de trabajo ($k=1,\dots,|K|$) para ejecutar el trabajo asignado a ellas.
- m Número de estaciones de trabajo. En este caso $m = |K|$.
- A Área lineal concedida a cada estación de trabajo ($k=1,\dots,|K|$) para realizar el trabajo asignado a ellas.

Variables

- $x_{j,k}$ Variable binaria que adopta el valor 1 si la tarea j ($j=1,\dots,|J|$) se asigna a la estación de trabajo k ($k=1,\dots,|K|$) y el valor 0 en caso contrario.
- S_k Carga de trabajo de la estación k ($k=1,\dots,|K|$). Es el conjunto de tareas que constituyen la estación $k \in K$.
- R_ϕ Riesgo ergonómico respecto al factor de riesgo ϕ ($\phi=1,\dots,|\Phi|$) permitido a cada estación de trabajo ($k=1,\dots,|K|$) para realizar la carga de trabajo S_k asignada a ellas.
- $\bar{R}(\Phi)$ Riesgo ergonómico medio del conjunto de factores Φ asociado a la línea de producción.

Formulación $M - \min \bar{R}(\Phi)$

$$\min \bar{R}(\Phi) = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_\phi \quad (1.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{\forall k \in K} x_{j,k} = 1 \quad (j=1,\dots,|J|) \quad (1.2)$$

$$\sum_{\forall j \in J} t_j \cdot x_{j,k} \leq c \quad (k=1,\dots,|K|) \quad (1.3)$$

$$\sum_{\forall j \in J} a_j \cdot x_{j,k} \leq A \quad (k=1,\dots,|K|) \quad (1.4)$$

$$R_\phi - \sum_{\forall j \in J} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k=1,\dots,|K|) \wedge (\phi=1,\dots,|\Phi|) \quad (1.5)$$

$$\sum_{\forall k \in K} k(x_{i,k} - x_{j,k}) \leq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (1.6)$$

$$\sum_{\forall k \in K} k \cdot x_{j,k} \leq m \quad (j=1,\dots,|J|) \quad (1.7)$$

$$\sum_{\forall j \in J} x_{j,k} \geq 1 \quad (k=1,\dots,|K|) \quad (1.8)$$

$$x_{j,k} \in \{0,1\} \quad (j=1,\dots,|J|) \wedge (k=1,\dots,|K|) \quad (1.9)$$

En $M - \min \bar{R}(\Phi)$, la función objetivo (1.1) expresa la minimización del riesgo ergonómico de la línea, que corresponde al riesgo ergonómico medio del conjunto de factores Φ . El conjunto de restricciones (1.2), una para cada tarea, obliga a que cada una de ellas sólo pueda estar presente en una de las estaciones de la línea. El conjunto de restricciones (1.3), una para cada estación, limita el tiempo de proceso correspondiente a la carga de trabajo de cada estación, no pudiendo ser éste mayor que el tiempo de ciclo. El conjunto de restricciones (1.4), una para cada estación, impide que el área lineal requerida por la carga de trabajo de cada estación sea superior al área lineal concedida a cada estación. El conjunto de restricciones (1.5), una para cada estación y cada factor de riesgo, sirve para limitar el riesgo ergonómico correspondiente a la carga de trabajo, de cada estación y cada factor de riesgo, a través de una variable que corresponde al máximo riesgo ergonómico permitido, para cada factor, en cualquier puesto de trabajo de la línea. El conjunto de restricciones (1.6), una para cada ligadura de precedencia entre tareas, obliga a que la asignación de tareas a las estaciones de la línea sea coherente con el orden en que deben ejecutarse dichas tareas en los puestos de la línea respetando dichas ligaduras. El conjunto de restricciones (1.7), una para cada tarea, sirve para limitar el número máximo de estaciones que, eventualmente, puede ser una variable. El conjunto de restricciones (1.8), una para cada estación, obliga a que toda estación tenga asignada al menos una tarea. Finalmente, el conjunto de condiciones (1.9), una para cada tarea y cada estación, requiere que las variables de asignación sean binarias.

4. EXPERIENCIA COMPUTACIONAL

El modelo $M - \min \bar{R}(\Phi)$ se ha empleado para realizar una experiencia computacional cuyo objetivo es medir el impacto producido por el incremento del número de puestos de trabajo sobre la reducción del riesgo ergonómico al que están sujetos los trabajadores de la línea. Para ilustrar dicho impacto, se han utilizado los datos correspondientes a un caso de estudio vinculado a una línea de la planta de motores de Nissan en Barcelona (*NSIO*: Nissan Spanish Industrial Operations).

La línea de motores debe satisfacer una demanda global diaria de 270 unidades. Para cumplir con este plan, la planta realiza dos turnos de 8h cada uno, de las cuales son efectivas 6h 45' (por paradas y descansos obligatorios), lo cual se traduce en un tiempo de ciclo $c = 180s$.

Al tratarse de una línea de productos mixtos, en ella se ensamblan diferentes tipos de motores. Para el caso que nos ocupa, hemos considerado 9 tipos de motores agrupados en 3 familias: p_1 , p_2 y p_3 son motores para vehículos 4x4; p_4 y p_5 son para furgonetas (vans); y p_6 , p_7 , p_8 y p_9 se destinan a camiones de medio tonelaje. En este trabajo, supondremos una demanda diaria equitativa de 30 unidades para cada tipo de motor.

El ensamblaje de cualquier tipo de motor (750 piezas y 330 referencias) se realiza a través de 370

tareas elementales, incluida la prueba rápida; dichas tareas elementales se han agrupado en 140 operaciones respetando las ligaduras de precedencia entre tareas y la coherencia en cuanto a la utilización de herramientas y la destreza requerida para su ejecución.

Para la explotación del modelo, se ha empleado el solucionador CPLEX v11.0 en un ordenador MacPro con procesador Intel Xeon 3.0 GHz CPU, memoria 2 GB RAM, y el sistema operativo Windows XP. En todas las ejecuciones realizadas, para obtener la mejor solución se ha limitado el tiempo de CPU a 2 horas.

En el experimento, se hallan 5 configuraciones de línea que corresponden a un número de estaciones comprendido entre 19 y 23 (ambos inclusive), sin considerar el efecto de la limitación de área lineal disponible en las estaciones de trabajo. En los 5 casos, el objetivo ha sido minimizar $\bar{R}(\Phi)$: el riesgo ergonómico de la línea para el conjunto de factores Φ (cargas posturales, movimientos repetitivos y levantamiento de cargas, en este trabajo).

Las características temporales, espaciales y ergonómicas correspondientes a las 140 operaciones de montaje ($j \in J$) para un mix de producción homogéneo entre los 9 tipos de motores (30 unidades por tipo) se recogen en la tabla 2. En la misma tabla se ha anotado también el número de la estación a la que se asigna cada operación en las 5 configuraciones de la línea que corresponden a un número de puestos de trabajo comprendido entre 19 y 23.

Tabla 2: Tiempo de proceso, a actividad normal (t_j), área requerida (a_j), categoría de riesgo ($\chi_{\phi,j}$) y riesgo ergonómico ($R_{\phi,j}$) asociados a cada operación $j \in J$. En las columnas $k_{(m=19,\dots,23)}$ se anota el número de la estación a la que se asigna cada tarea en las configuraciones de línea con $m = 19, \dots, 23$.

$j \in J$	t_j	a_j	$\chi_{\phi,j}$	$R_{\phi,j}$	$k_{(m=19)}$	$k_{(m=20)}$	$k_{(m=21)}$	$k_{(m=22)}$	$k_{(m=23)}$
1	60.00	3	1	60	1	1	1	1	1
2	75.00	2	2	150	11	18	16	13	18
3	20.00	0.5	1	20	2	3	2	2	2
4	60.00	1	1	60	3	3	3	2	3
5	20.00	0.5	1	20	1	2	2	2	2
6	60.00	1.5	1	60	4	4	4	4	4
7	45.00	1	2	90	4	1	1	3	3
8	10.00	0.5	2	20	2	1	4	4	4
9	20.00	0.5	2	40	1	1	1	1	1
10	30.00	0.5	2	60	1	1	1	1	1
11	15.00	0.5	2	30	1	1	2	1	1
12	15.00	0.5	2	30	16	10	11	6	1
13	15.00	1	1	15	1	2	1	1	1
14	10.00	0.5	2	20	1	2	1	1	1
15	8.00	1	2	16	2	2	2	1	1
16	8.00	0.5	2	16	2	3	2	1	3
17	80.00	1	2	160	2	2	2	2	2
18	40.00	0.5	2	80	2	2	3	3	2

Continúa en la siguiente página.

$j \in J$	t_j	a_j	$\mathcal{X}_{\phi,j}$	$R_{\phi,j}$	$k_{(m=19)}$	$k_{(m=20)}$	$k_{(m=21)}$	$k_{(m=22)}$	$k_{(m=23)}$
19	5.00	0.5	2	10	1	3	3	1	3
20	5.00	0.5	2	10	2	3	2	3	3
21	5.00	0.5	2	10	1	3	2	3	3
22	7.00	0.5	2	14	3	3	4	4	4
23	7.00	0.5	2	14	3	4	4	3	4
24	30.00	0.5	2	60	3	3	3	3	4
25	30.00	0.5	2	60	3	3	3	4	3
26	5.00	0.5	2	10	3	3	3	3	3
27	5.00	0.5	2	10	2	3	3	3	3
28	30.00	1	2	60	3	4	4	4	4
29	10.00	0.5	2	20	3	4	4	4	4
30	15.00	1	2	30	4	4	4	4	4
31	10.00	0	2	20	4	4	4	4	5
32	15.00	0.5	2	30	4	4	4	5	5
33	30.00	1	3	90	4	5	5	5	5
34	10.00	0.5	3	30	5	5	4	5	5
35	5.00	0.5	3	15	5	4	5	5	5
36	25.00	1	2	50	5	4	5	5	5
37	15.00	0	3	45	5	5	5	5	5
38	5.00	0.5	3	15	5	5	5	5	6
39	5.00	0.5	3	15	5	5	5	6	6
40	5.00	0.5	3	15	5	5	5	6	6
41	60.00	0.5	3	180	6	6	6	6	6
42	15.00	1.5	3	45	5	5	6	6	7
43	15.00	1.5	3	45	5	5	5	7	6
44	25.00	0.5	3	75	6	7	7	7	7
45	25.00	0.5	3	75	6	6	6	7	7
46	5.00	0.5	3	15	7	7	7	7	7
47	35.00	0.5	3	105	7	7	7	8	8
48	35.00	0.5	3	105	7	7	7	8	8
49	5.00	0.5	3	15	5	5	8	7	7
50	15.00	0.5	3	45	8	9	8	8	9
51	25.00	0	3	75	8	8	9	9	9
52	30.00	0	3	90	8	8	8	9	10
53	15.00	0	3	45	7	8	8	9	9
54	15.00	0	3	45	7	8	8	10	9
55	20.00	0	3	60	8	8	8	9	8
56	10.00	0	3	30	7	9	9	8	10
57	10.00	0.5	3	30	8	9	9	10	10
58	20.00	0.5	2	40	8	9	10	10	10
59	5.00	0	3	15	6	7	9	9	7
60	20.00	0.5	3	60	5	6	9	7	9
61	45.00	1	2	90	9	9	10	10	10
62	30.00	0.5	2	60	9	10	10	10	11
63	30.00	0.5	2	60	9	9	9	11	11
64	10.00	0.5	2	20	9	9	9	10	11

Continúa en la siguiente página.

$j \in J$	t_j	a_j	$\mathcal{X}_{\phi,j}$	$R_{\phi,j}$	$k_{(m=19)}$	$k_{(m=20)}$	$k_{(m=21)}$	$k_{(m=22)}$	$k_{(m=23)}$
65	5.00	0	2	10	10	10	11	11	11
66	10.00	0.5	2	20	9	10	10	11	11
67	15.00	0.5	2	30	9	10	10	11	11
68	60.00	1.5	2	120	10	10	11	11	12
69	10.00	0.5	2	20	10	10	11	11	12
70	30.00	1	2	60	9	11	10	12	11
71	10.00	0.5	2	20	10	10	11	12	12
72	10.00	0.5	2	20	10	11	11	11	12
73	40.00	1.5	2	80	10	11	11	12	12
74	25.00	0.5	2	50	10	11	12	12	13
75	10.00	0.5	2	20	11	11	12	13	13
76	10.00	1	2	20	11	11	12	13	13
77	15.00	0.5	2	30	11	12	12	13	13
78	15.00	0.5	2	30	11	11	12	12	13
79	15.00	0.5	2	30	10	11	12	12	13
80	10.00	0.5	2	20	11	12	12	13	13
81	10.00	1	2	20	11	12	12	13	13
82	10.00	0	2	20	11	12	12	13	13
83	20.00	0.5	2	40	12	12	12	14	13
84	10.00	0	2	20	12	12	12	14	14
85	20.00	0.5	3	60	12	12	13	15	14
86	25.00	0.5	2	50	12	13	13	14	14
87	20.00	0.5	2	40	11	13	13	14	14
88	15.00	0.25	3	45	12	12	13	14	14
89	20.00	0.5	3	60	12	12	14	15	14
90	30.00	0.5	3	90	13	13	13	14	15
91	20.00	0.5	3	60	12	13	14	15	15
92	25.00	0.5	3	75	13	13	14	15	15
93	10.00	0.5	3	30	16	20	21	15	20
94	5.00	0.5	3	15	13	17	20	16	21
95	20.00	0.5	3	60	19	20	21	20	22
96	10.00	0.5	3	30	19	20	21	22	23
97	5.00	0.5	3	15	19	20	21	22	23
98	80.00	0	2	160	13	14	15	16	16
99	30.00	0	3	90	14	14	14	16	16
100	10.00	0.5	2	20	14	14	15	16	16
101	10.00	0.5	2	20	14	14	15	17	17
102	20.00	0.5	2	40	14	15	15	17	17
103	30.00	0.5	2	60	14	15	15	17	17
104	5.00	0	3	15	14	15	16	17	17
105	30.00	0.5	2	60	15	17	18	17	21
106	25.00	0.5	2	50	14	15	17	17	20
107	5.00	0	3	15	14	17	18	19	19
108	5.00	0	2	10	14	15	16	17	17
109	5.00	0.5	2	10	14	15	16	18	17
110	5.00	0	2	10	15	16	20	18	20

Continúa en la siguiente página.

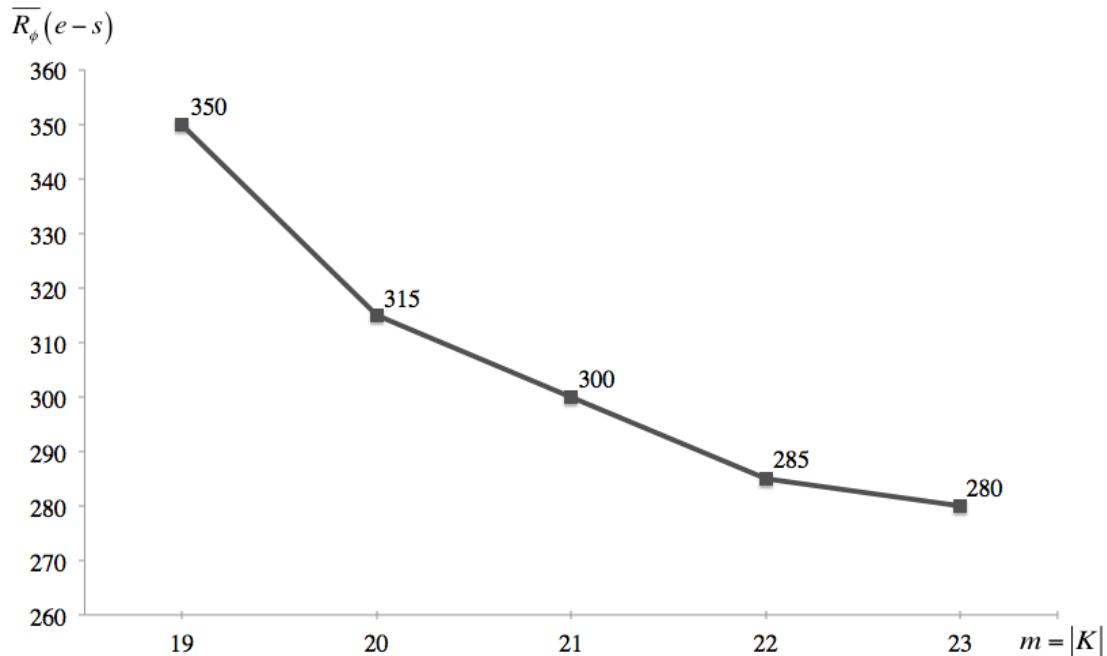
$j \in J$	t_j	a_j	$\chi_{\phi,j}$	$R_{\phi,j}$	$k_{(m=19)}$	$k_{(m=20)}$	$k_{(m=21)}$	$k_{(m=22)}$	$k_{(m=23)}$
111	10.00	0	2	20	14	15	17	18	17
112	10.00	0	2	20	15	16	17	18	17
113	15.00	0.5	2	30	15	15	16	17	17
114	20.00	0	2	40	15	15	16	18	18
115	20.00	0	2	40	15	15	16	18	17
116	45.00	1	2	90	15	16	17	18	18
117	20.00	0.5	2	40	16	16	18	19	19
118	25.00	0	2	50	15	16	17	18	19
119	25.00	0	2	50	16	17	17	19	19
120	20.00	0.5	2	40	16	17	18	19	20
121	45.00	1.5	2	90	17	17	19	19	21
122	15.00	0.5	1	15	17	17	19	20	21
123	10.00	0.5	1	10	17	17	20	20	21
124	10.00	0	1	10	17	18	20	20	21
125	20.00	1	1	20	17	18	20	20	21
126	30.00	0.5	2	60	17	18	20	20	21
127	10.00	0.5	2	20	17	19	20	21	22
128	25.00	0.5	2	50	16	19	19	19	20
129	30.00	0.5	2	60	17	18	20	21	22
130	30.00	0.75	2	60	18	19	20	21	22
131	40.00	0.5	2	80	16	16	18	20	19
132	25.00	1	1	25	16	16	18	20	19
133	25.00	0.5	1	25	19	19	20	21	22
134	20.00	0.5	1	20	18	17	18	21	19
135	15.00	0.5	1	15	18	18	18	21	20
136	20.00	0.5	1	20	18	19	19	21	20
137	30.00	0.5	2	60	18	19	19	22	20
138	30.00	0.5	2	60	18	19	19	21	23
139	15.00	1	2	30	18	20	21	22	23
140	120.00	0	1	120	19	20	21	22	23

Por otra parte, en la Ilustración 1 se muestra el efecto que provoca el aumento del número de estaciones de la línea sobre el decremento del riesgo ergonómico de ésta, que se corresponde con el promedio de los riesgos ergonómicos máximos permitidos a cada estación de trabajo y para cada factor de riesgo.

En efecto, cuando la línea dispone de 19 estaciones de trabajo, el riesgo máximo permitido a cualquier estación es de 350 *e-s* (ergo-segundos), lo que supone una categoría de riesgo de 1.94 (nivel L1 muy cercano a nivel L2) y, por tanto, aunque el valor de esta categoría está dentro de los límites del nivel Aceptable, es recomendable un análisis del riesgo de las operaciones con el fin de llevar a cabo acciones correctoras para su mejora. Esta recomendación se debe a que una variación de los tiempos de proceso, debida por ejemplo a una variación del mix de producción, podría ocasionar un cambio de nivel de riesgo. En la ilustración, también podemos ver que el riesgo límite de la línea disminuye a medida que aumenta el número de puestos de trabajo, obteniendo un riesgo límite de 315 *e-s*

(categoría 1.75) con 20 estaciones, de 300 $e-s$ (categoría 1.66) con 21, de 285 $e-s$ (categoría 1.58) con 22 y de 280 $e-s$ (categoría 1.56) con 23 estaciones.

Ilustración 1: Riesgo ergonómico límite de la línea en función del número de puestos de trabajo



Finalmente, la tabla 3 muestra las características temporales, espaciales y ergonómicas de los puestos de trabajo para las 5 configuraciones de línea con un número máximo de estaciones comprendido entre 19 y 23.

A la vista de su contenido (ver tabla 3), podemos afirmar que ante el incremento del número de puestos de trabajo, se produce un decrecimiento monótono de los valores medios y mínimos del tiempo de proceso de la carga de las estaciones; concretamente, con 19 estaciones el tiempo de carga mínimo es de 115 s mientras que con 23 estaciones es de 75 s . Este hecho, se traduce en una descompensación en la carga de trabajo entre los operarios más saturados y menos saturados que deberá ser compensada mediante la rotación de puestos de trabajo, si se quiere mantener la misma tasa de producción, o mediante un nuevo equilibrado de la línea reduciendo el tiempo de ciclo.

En cuanto al área lineal requerida por las estaciones, al no estar limitada, en este experimento, aunque el modelo lo permita, observamos que los valores máximos superan los 6 metros en todos los casos y alcanza los 8 metros cuando se dispone de 22 estaciones. Este hecho sugiere nuevos equilibrados de la línea limitando dicha área y estudiar el impacto que dicha limitación produce sobre el riesgo ergonómico.

Table 3: Tiempo de proceso $t(S_k)$, área lineal requerida $a(S_k)$ y riesgo ergonómico $R_\phi(S_k)$ de las cargas de trabajo de las estaciones $S_k : k \in K$, en función de las 5 configuraciones de línea $m = 19, \dots, 23$.

k	$m = 19$			$m = 20$			$m = 21$			$m = 22$			$m = 23$		
	$t(S_k)$	$a(S_k)$	$R_\phi(S_k)$	$t(S_k)$	$a(S_k)$	$R_\phi(S_k)$	$t(S_k)$	$a(S_k)$	$R_\phi(S_k)$	$t(S_k)$	$a(S_k)$	$R_\phi(S_k)$	$t(S_k)$	$a(S_k)$	$R_\phi(S_k)$
1	180	7.5	265	180	6	300	180	6.5	285	171	8	267	173	7.5	271
2	176	5	332	173	4.5	311	161	5	282	180	3	260	160	2.5	280
3	179	5	298	180	6	280	175	4	290	142	4.5	284	168	5.5	276
4	175	5	320	177	6.5	299	174	6.5	298	172	5.5	284	169	6	278
5	125	7.5	350	105	6.5	315	105	5.5	290	105	4	275	110	3.5	280
6	115	1.5	345	105	1.5	315	100	2.5	300	100	3.5	285	90	3.5	270
7	115	1.5	345	105	2	315	100	2	300	95	4	285	80	3.5	240
8	120	1.5	340	105	0	315	100	1	300	95	1.5	285	90	1	270
9	170	4.5	340	140	3.5	315	110	2	290	95	0	285	90	1	270
10	175	5.5	350	155	4.5	310	150	4	300	130	3	285	115	2	280
11	175	6.5	350	155	6	310	150	5	300	140	4	280	130	3.5	260
12	130	2.75	335	130	3.75	315	150	5.5	300	135	4.5	270	130	4.5	260
13	140	1.5	340	120	2.5	315	110	2.25	285	140	5.5	280	140	5.5	280
14	155	3	350	130	1	290	95	1.5	285	120	2.25	285	110	2.25	275
15	170	2	340	155	2.5	315	150	2	300	95	2.5	285	75	1.5	225
16	180	4	345	170	3	315	145	3	295	125	1	285	120	0.5	270
17	170	5	285	175	4.5	315	140	1.5	280	140	3	285	130	2.5	265
18	160	4.25	265	180	4.5	315	175	4	295	140	1.5	280	140	3	280
19	180	2	250	170	3.75	295	165	4	295	140	3	285	160	2.5	280
20				180	3	285	175	4.75	290	170	4.5	280	150	3.5	275
21							180	3	285	180	4.25	280	165	5	280
22										180	2.5	255	115	2.75	225
23													180	2.5	255
Media	157.4	4.0	323.4	149.5	3.8	307.3	142.4	3.6	292.6	135.9	3.4	279.3	130.0	3.3	267.2
Min	115	1.5	250	105	0	280	95	1	280	95	0	255	75	0.5	225
Max	180	7.5	350	180	6.5	315	180	6.5	300	180	8	285	180	7.5	280

Respecto al riesgo ergonómico, vemos que la mejor situación para riesgos medio, máximo y mínimo de la línea, se da cuando se tienen 23 estaciones, con unos valores de 267.2 *e-s*, 280 *e-s* y 225 *e-s*, respectivamente. No obstante, la configuración de línea más equilibrada, entre las 5 estudiadas, corresponde a 21 estaciones de trabajo, con un rango de valores de a 20 *e-s* y una desviación estándar igual a 6.9 *e-s*.

Finalmente, las 5 configuraciones de la línea presentan una categoría de riesgo máximo por debajo de 2 (de 1.9 a 1.6), por lo que podemos concluir que se trata de líneas de producción con un riesgo entre aceptable y moderado; la categoría del riesgo medio para las cinco líneas está comprendida entre 1.5 y 1.8 para 23 y 19 estaciones, respectivamente.

5. CONCLUSIONES

El diseño ergonómico es fundamental para los puestos de trabajo en cualquier sistema productivo. Cuando dichos puestos corresponden a módulos o estaciones de una línea de producción es necesario tener en cuenta, no sólo la seguridad de los trabajadores (medida a través del riesgo), sino también un

conjunto de restricciones que afectan al número de puestos (m), al ciclo repetitivo de la carga de trabajo (c) y al área disponible en cada puesto (A).

En este trabajo, tomando como punto de partida la familia *TSALBP*, se ha propuesto un modelo de equilibrado de líneas con el objetivo de minimizar el riesgo ergonómico y respetando, además, restricciones que consideran aspectos temporales y espaciales.

A través de un caso de estudio, procedente de la planta de motores de Nissan en Barcelona, proponemos, sin variar la capacidad de producción de la planta, una progresiva reducción de la categoría del riesgo de la línea mediante la creación de nuevos puestos de trabajo.

En trabajos futuros, mediremos el impacto generado por la limitación del área lineal disponible en las estaciones, estableceremos la forma de redistribuir cargas entre las estaciones de una configuración de línea a corto y medio plazo, y estudiaremos si son económicamente compensables el ahorro socio-sanitario que supone la reducción del riesgo (lesiones) con los costes debidos a la creación de nuevos puestos de trabajo.

6. REFERENCIAS

Battaia, O., Dolgui, A., 2013. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches, *International Journal of Production Economics* 142, 259-277.

Bautista, J., Batalla, C., Alfaro, R., 2012. Incorporating Ergonomics Factors into the *TSALBP*, *Proceedings (CD), International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2012) Rodas (Grecia)*.

Bautista, J., Batalla, C., Alfaro, R., Cano-Pérez, A., 2013. Extended Models for *TSALBP* with Ergonomic Risk Constraints, *IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control (MIM 2013) Saint Petersburg (Rusia)*.

Bautista, J., Pereira J., 2007. Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research* 177(3), 2016-2032.

Baybars, I., 1986. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem, *Management Science* 32, 909-932.

Becker, C., Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research* 168, 694-715.

Chica, M., Cerdón, O., Damas, S., Bautista, J., 2010. Multiobjective constructive heuristics for the 1/3 variant of the time and space assembly line balancing problem: ACO and random greedy search, *Information Sciences* 180(18), 3465-3487.

Colombini, D., Occhipinti, E., Grieco, E., 2002. Risk Assessment and Management of Repetitive

Movements and Exertions of Upper Limbs Job Analysis, Ocrs Risk Indices, Ocrs Risk Indices, Prevention Strategies and Design Principles, Elsevier Ergonomics Book Series 2, ISBN: 978-0-08-044080-4.

Hignett, S., McAtamney, L., 2000. Rapid Entire Body Assessment (REBA), *Applied Ergonomics* 31, 201-205.

Otto, A., Scholl, A., 2011. Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing, *European Journal of Operational Research* 212(2), 277-286.

Salveson, M.E., 1955. The assembly line balancing problem, *Journal of Industrial Engineering* 6, 18-25.

Waters, T. R., Baron, S. L., Kemmlert, K., 1997. Accuracy of measurements for the revised NIOSH lifting equation, *Applied Ergonomics* 29(6), 433-438.