

# Equilibrado robusto de una línea de motores mixtos con atributos temporales, espaciales y ergonómicos

Joaquín Bautista<sup>1</sup>, Manuel Chica<sup>2</sup>, Oscar Cordon<sup>2</sup>, Sergio Damas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IOC-ETSEIB-Nissan Chair, Universidad Politécnica de Catalunya, España

<sup>2</sup>Instituto Andaluz Interuniversitario DaSCI (Data Science and Computational Intelligence), Universidad de Granada, España  
Emails: joaquin.bautista@upc.edu, manuelchica@ugr.es, ocordova@decsai.ugr.es, sdamas@ugr.es

**Resumen**— Partiendo de los modelos TSALBP-ergo (*Time and Space Assembly Line Balancing Problem with Ergonomic Risk*), proponemos 9 métricas para medir la robustez de un equilibrado de línea según sus atributos temporales, espaciales y contingentes. La versión robusta de TSALBP-ergo considera diversos planes de demanda e incluye funciones que miden los excesos de cargas temporales, espaciales y de riesgo ergonómico en las estaciones de la línea de montaje. Las métricas propuestas son útiles como funciones objetivo en problemas de optimización o se pueden emplear como indicadores del nivel de robustez de una línea. La nueva versión r-TSALBP-ergo pone a disposición del decisor nuevas soluciones de equilibrado más eficientes y robustas ante una demanda incierta.

**Keywords**—Líneas de ensamblado; Demanda incierta; Riesgo Ergonómico; Optimización robusta.

## I. INTRODUCCIÓN

El diseño de una línea de montaje presenta tres vertientes como mínimo: (i) establecer el número de estaciones y decidir qué operaciones se realizarán en cada puesto de trabajo en función de la demanda, (ii) ofrecer una distribución en planta que contemple tanto el espacio requerido por el producto y sus componentes como los espacios adicionales para el desempeño correcto del trabajo de los operarios, y (iii) evitar que el reparto de cargas de trabajo entre estaciones genere lesiones físicas a los trabajadores a medio-largo plazo.

Dentro del sector de Automoción de los países de la OCDE, las líneas de montaje de modelos mixtos están capacitadas para ensamblar distintos tipos de producto, como es el caso de las plantas de motores que usan la misma instalación para fabricar distintas versiones de motores para vehículos SUVs, furgonetas y camiones.

El ensamblado de estos tipos de producto está constituido por tareas semejantes que presentan características comunes; no obstante, cada tipo de producto requiere piezas específicas, distintas formas de aplicar el trabajo, distintas herramientas y distintas habilidades y esfuerzo de los operarios. Obviamente, esta distinción se da tanto entre tipos de producto de la misma familia (v.g.- dos versiones de la familia SUVs) como entre productos de distintas familias (v.g. SUVs o camiones). En estos casos, el ensamblado de un motor requiere unas 400 tareas que pueden agregarse en unas 150 operaciones básicas ya sea por conveniencia o condicionantes de tipo tecnológico.

Brevemente, una línea de montaje es un sistema productivo constituido por un conjunto de estaciones de trabajo a las que se asigna de manera exclusiva una serie de tareas. Cada tarea requiere un tiempo de proceso (función de la actividad de los

operarios), un esfuerzo físico (según la categoría del riesgo ergonómico), y un espacio para el producto y sus componentes, la instrumentación y los recursos humanos. La definición de las tareas es el resultado de concebir la fabricación de un producto complejo como la superposición de las mismas, dando lugar a un problema denominado equilibrado de líneas de montaje (ALB: Assembly Line Balancing) [1], [2]. Las soluciones se basan en distribuir eficientemente las tareas entre estaciones, cumpliendo un conjunto de restricciones.

El problema de equilibrado de líneas en su versión simple denominado SALBP [3] (Simple Assembly Line Balancing Problem), consiste en repartir óptimamente las tareas entre las estaciones, respetando las restricciones de precedencia entre ellas, siguiendo dos criterios de optimización: (i) minimizar el número de estaciones de trabajo, dado un tiempo de ciclo de fabricación (SALBP-1), y (ii) maximizar la tasa de producción de la línea, dado un número fijo de estaciones de trabajo (SALBP-2).

TSALBP [4] (Time and Space Assembly Line Balancing Problem) es una extensión natural de SALBP más próxima a situaciones industriales realistas. En efecto, TSALBP incorpora adicionalmente atributos espaciales relacionados tanto con el espacio disponible para distribuir en planta las estaciones de trabajo como con el espacio requerido para ejecutar las tareas y para albergar los componentes de montaje del producto. TSALBP presenta 8 variantes que resultan de considerar las combinaciones de 3 criterios de optimización:  $m$  (número de estaciones),  $c$  (tiempo de ciclo) y  $A$  (área lineal disponible de las estaciones).

Por su parte, TSALBP-ergo [5] (Time and Space Assembly Line Balancing Problem with Ergonomic Risk) es una familia de problemas que incorpora a TSALBP el concepto de Riesgo Ergonómico tanto en la función objetivo como en restricciones adicionales en las estaciones de trabajo de la línea de montaje. Obviamente, TSALBP-ergo presenta 16 variantes al considerar las combinaciones de 4 criterios de optimización: los 3 criterios de TSALBP más  $R$  (riesgo ergonómico).

En este contexto, la flexibilidad en la fabricación es una propiedad importante de cara a que las grandes compañías puedan responder a cambios de su entorno económico. Entre dichos cambios está el de la variación de la demanda de sus productos. Esta variación puede ser tanto global, afectando al tiempo de ciclo de la línea, como parcial, afectando al mix de producción y a los atributos de las tareas (tiempos de proceso, áreas requeridas y riesgos ergonómicos).

La variación del mix de producción, representada a través de planes de producción diarios, obliga a reequilibrar la línea.



Esta alteración conduce normalmente a la reconfiguración de algunos o todos los puestos de trabajo, llegando a veces a ser necesaria nueva obra civil.

Para evitar cambios notables en la distribución en planta de la línea, se puede recurrir a la implantación de soluciones que sean lo más robustas posibles ante la variación de la demanda [6]-[8].

En este trabajo proponemos métricas para TSALBP-ergo, como extensión a [7], que permiten incorporar a los modelos el concepto de solución robusta [9] mediante restricciones y funciones objetivo. Para ello, las restricciones y las funciones objetivo contienen toda la información de un conjunto de referencia de planes de demanda (también llamados escenarios) que alteran los valores de los atributos temporales, espaciales y de contingencia de las tareas. Esto nos conduce a la definición de funciones de robustez temporal, espacial y de riesgo que miden las sobrecargas de tiempo, espacio y riesgo ergonómico en las estaciones, así como el grado de factibilidad del conjunto de planes de demanda.

El resto del texto sigue la siguiente estructura. La Sección II describe sucintamente la robustez en problemas ALB. En la Sección III describimos las condiciones de TSALBP-ergo ante una demanda incierta. En la Sección IV formalizamos y modelamos el problema objeto de estudio. En la Sección V presentamos algunos ejemplos ilustrativos. Por último, en la Sección VI recogemos nuestras conclusiones.

## II. ROBUSTEZ EN LOS PROBLEMAS DE EQUILIBRADO DE LÍNEAS

Una forma de hallar soluciones robustas en ALBP consiste en buscar configuraciones que se ajusten a todos los escenarios posibles o, en su defecto, que ofrezcan un desempeño eficiente en todos ellos [10], [7], [11]. En [12] se presenta un modelo robusto para ALB y un programa dinámico que minimiza el tiempo de ciclo de la línea considerando el peor escenario entre los posibles. En [13], se consideran diversos escenarios que caracterizan la demanda inestable en una línea de modelos mixtos.

Otra forma de considerar la incertidumbre y la robustez en ALB es suponer que los tiempos de proceso de las tareas no son deterministas sino que están contenidos en intervalos de valores y se obtienen a partir de una función de distribución conocida. En esta vía se encuentra el trabajo [14], enfocado al SALBP-E, en el que se acotan los tiempos de proceso por intervalos y se busca un compromiso entre la minimización de la función objetivo y los valores de un ratio de estabilidad. En [15] se presentan dos modelos robustos de ALB que consideran la incertidumbre con intervalos de valores de los tiempos de proceso de las operaciones.

## III. TSALBP-ERGO SUJETO A UNA DEMANDA INCIERTA

En nuestro ideario, las tareas en TSALBP-ergo poseen una serie de atributos elementales. Dichos atributos, por su distinta naturaleza, los agrupamos aquí en 3 categorías o clases: (i) temporales, (ii) espaciales y (iii) contingentes. Estos atributos elementales están vinculados a cada operación básica de forma individual.

Son atributos temporales de una tarea: el tiempo de proceso medido a actividad normal y el factor de actividad que se establece para equilibrar la línea. Por su parte, son atributos espaciales de una tarea: el área requerida por los operarios para

ejecutar cómodamente la operación, las dimensiones de los contenedores de piezas relacionadas con la operación, así como el espacio ocupado por herramientas y robots para llevar a cabo el montaje. Finalmente, son atributos contingentes de una tarea: el factor y la categoría de riesgo que supone al operario realizar una tarea, y el tiempo de exposición del operario a dicha tarea.

Cuando la línea fabrica un único tipo de producto, los datos que precisamos para resolver un problema de equilibrado son:

1. El conjunto de operaciones ( $J: j = 1, \dots, |J|$ ) con sus atributos elementales: tiempo de proceso  $t_j: j \in J$ , área lineal requerida  $a_j: j \in J$ , categoría de riesgo  $\chi_j: j \in J$ , y riesgo ergonómico  $R_j: j \in J$ .
2. El conjunto de estaciones de trabajo ( $K: k = 1, \dots, |K|$ )
3. Las restricciones de precedencia, incompatibilidad entre tareas y las restricciones que afectan a los atributos de la línea: número de estaciones ( $m$ ), tiempo de ciclo ( $c$ ), área disponible en cada estación ( $A$ ) y riesgo ergonómico permisible ( $R$ ).

Cuando la línea es de modelos mixtos, los atributos elementales dependen de las tareas y productos, por tanto, teniendo en cuenta el conjunto de tipos de producto ( $I: i = 1, \dots, |I|$ ), los atributos temporales, espaciales y contingentes adoptan respectivamente las formas siguientes:  $t_{ji}, a_{ji}, R_{ji}: j \in J \wedge i \in I$ .

Para simplificar, aquí supondremos  $R_{ji} = \chi_j t_{ji}$  ( $j \in J \wedge i \in I$ ), es decir: el riesgo  $R_{ji}$  depende del tiempo de proceso  $t_{ji}$  y de la categoría de riesgo  $\chi_j$  de la tarea  $j \in J$  (considerando solo un factor de riesgo del conjunto de factores  $\Phi$  ( $\varphi = 1, \dots, |\Phi|$ ))

Lógicamente, una línea de modelos mixtos debe atender a diversos planes de demanda de productos que simbolizamos mediante el conjunto de escenarios  $E$ . No obstante, es común realizar el equilibrado de la línea en función de un plan de demanda  $\varepsilon \in E$ , que definimos mediante el vector de demanda  $\vec{d}_\varepsilon = (d_{1\varepsilon}, \dots, d_{|I|\varepsilon})$  o a través del vector mix de producción  $\vec{\lambda}_\varepsilon = (\lambda_{1\varepsilon}, \dots, \lambda_{|I|\varepsilon})$  - donde  $d_{i\varepsilon}$  es el número de unidades del tipo de producto  $i \in I$  contenidas en el plan de demanda  $\varepsilon \in E$ , y  $\lambda_{i\varepsilon}$  es la proporción del modelo  $i \in I$  en el plan  $\varepsilon \in E$ . Aquí se cumple:  $\vec{\lambda}_\varepsilon = \vec{d}_\varepsilon / D_\varepsilon$  con  $D_\varepsilon = \sum_{i \in I} d_{i\varepsilon}$ .

Normalmente, el equilibrado de la línea se efectúa con los valores promediados de los atributos de las tareas en función de un mix de producción. Por tanto, dado un mix de producción  $\vec{\lambda}_\varepsilon$  ( $\varepsilon \in E$ ), los tiempos de proceso, las áreas lineales y los riesgos ergonómicos de las tareas se determinan como en (1), (2) y (3), respectivamente:

$$\bar{t}_{j\varepsilon} = \sum_{i=1}^{|I|} t_{ji} \lambda_{i\varepsilon}, \forall j \in J \wedge \forall \varepsilon \in E \quad (1)$$

$$\bar{a}_{j\varepsilon} = \sum_{i=1}^{|I|} a_{ji} \lambda_{i\varepsilon}, \forall j \in J \wedge \forall \varepsilon \in E \quad (2)$$

$$\bar{R}_{j\varepsilon} = \sum_{i=1}^{|I|} R_{ji} \lambda_{i\varepsilon}, \forall j \in J \wedge \forall \varepsilon \in E \quad (3)$$

Así, dado un mix de producción de referencia  $\vec{\lambda}_{\varepsilon_0}$  ( $\varepsilon_0 \in E$ ), se dice que la línea de modelos mixtos está equilibrada cuando todas las tareas del conjunto  $J$  han sido repartidas coherentemente entre las estaciones de trabajo del conjunto  $K$ . Esto supone que a todo puesto de trabajo  $k \in K$  se asigna en

exclusiva un grupo de tareas que se denomina carga de trabajo  $S_k$ , respetando, en el reparto, todas las restricciones que afectan a las estaciones. Por tanto, se cumple:

$$\bigcup_{k \in K} S_k = J \wedge (S_k \cap S_{k'} = \emptyset, \forall k \neq k') \quad (4)$$

$$\sum_{j \in S_k} \bar{t}_{j\epsilon_0} \leq c, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in S_k} \bar{a}_{j\epsilon_0} \leq A, \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in S_k} \bar{R}_{j\epsilon_0} \leq R, \forall k \in K \quad (7)$$

La condición (4) representa la partición completa del conjunto de tareas  $J$  entre las estaciones del conjunto  $K$ , y las restricciones (5), (6) y (7) corresponden respectivamente a los límites que establecen el tiempo de ciclo  $c$ , el área lineal disponible  $A$  y el riesgo ergonómico permisible  $R$ , sobre los valores de los atributos que resultan tras la asignación de tareas a las estaciones de trabajo ( $\forall k \in K$ ).

#### IV. INCORPORANDO ROBUSTEZ AL TSALBP-ERGO

Llamamos r-TSALB-ergo a la versión robusta de TSALB-ergo. Aquí estableceremos las restricciones del nuevo modelo para un número fijo de estaciones de trabajo, y propondremos un conjunto de métricas para la robustez de configuraciones de líneas de montaje (soluciones:  $\zeta$ ) en r-TSALB-ergo, frente al conjunto de planes de demanda (E).

##### A. Parámetros y variables

- $I$  Conjunto de tipos de producto ( $I: i = 1, \dots, |I|$ )
- $J, P_j$  Conjunto de tareas ( $J: j = 1, \dots, |J|$ ) y Conjunto de tareas precedentes a la tarea  $j \in J$  ( $P_j \subseteq J$ )
- $K$  Conjunto de estaciones de trabajo ( $K: k = 1, \dots, m$ )
- $E$  Conjunto de planes de demanda ( $\epsilon \in E$ )
- $c, \gamma_c, \Delta_c$  Tiempo de ciclo, flexibilidad temporal y tiempo de proceso adicional en toda estación  $k \in K$ . Se define ventana temporal así:  $c + \Delta_c = (1 + \gamma_c)c$
- $A, \gamma_A, \Delta_A$  Área lineal disponible, flexibilidad espacial y área lineal adicional en toda estación  $k \in K$ . Se define ventana espacial así:  $A + \Delta_A = (1 + \gamma_A)A$
- $R, \gamma_R, \Delta_R$  Riesgo ergonómico admisible en toda estación  $k \in K$ , flexibilidad contingente y riesgo adicional en cada estación. Se define ventana de contingencia o de riesgo así:  $R + \Delta_R = (1 + \gamma_R)R$
- $\bar{t}_{j\epsilon}$  Tiempo de proceso promedio de la tarea  $j \in J$  en función del mix de productos en el plan de demanda  $\epsilon \in E$  – ecuación (1) -
- $\bar{a}_{j\epsilon}$  Área lineal promedio requerida por la tarea  $j \in J$  en función del mix de productos en el plan de demanda  $\epsilon \in E$  – ecuación (2) -
- $\chi_j, \bar{R}_{j\epsilon}$  Categoría de riesgo y riesgo ergonómico promedio asociado a la tarea  $j \in J$  en función del mix de productos en el plan de demanda  $\epsilon \in E$  – ecuación (3) – Supondremos  $\bar{R}_{j\epsilon} = \chi_j \bar{t}_{j\epsilon} \quad \forall j \in J \wedge \forall \epsilon \in E$

- $x_{jk}$  Variable binaria que vale 1 si la tarea  $j \in J$  se asigna a la estación  $k \in K$ , y vale 0 en caso contrario.
- $y_{k\epsilon}^c$  Variable binaria que vale 1 si el tiempo de la carga de la estación  $k \in K$ , correspondiente al plan de demanda  $\epsilon \in E$  y a la configuración de referencia  $\zeta_0$  de la línea, es mayor que el tiempo de ciclo – i.e.  $t_\epsilon(S_k) > c$  – y vale 0 en caso contrario.
- $y_{k\epsilon}^A$  Variable binaria que vale 1 si el área lineal de la carga de la estación  $k \in K$ , para el plan de demanda  $\epsilon \in E$  y la configuración de referencia  $\zeta_0$  de la línea, es mayor que el área lineal disponible – i.e.  $a_\epsilon(S_k) > A$  – y vale 0 en caso contrario.
- $y_{k\epsilon}^R$  Variable binaria que vale 1 si el riesgo ergonómico de la carga de la estación  $k \in K$ , para el plan de demanda  $\epsilon \in E$  y la configuración  $\zeta_0$  de la línea, es mayor que el riesgo ergonómico permisible – i.e.  $R_\epsilon(S_k) > R$  – y vale 0 en caso contrario.
- $Y^c$  Variable entera que representa el número de veces que  $t_\epsilon(S_k) > c$  ( $\forall \epsilon \in E, \forall k \in K$ ):  $Y^c = \sum_{\forall \epsilon \forall k} y_{k\epsilon}^c$
- $Y^A$  Variable entera que representa el número de veces que  $a_\epsilon(S_k) > A$  ( $\forall \epsilon \in E, \forall k \in K$ ):  $Y^A = \sum_{\forall \epsilon \forall k} y_{k\epsilon}^A$
- $Y^R$  Variable entera que representa el número de veces que  $R_\epsilon(S_k) > R$  ( $\forall \epsilon \in E, \forall k \in K$ ):  $Y^R = \sum_{\forall \epsilon \forall k} y_{k\epsilon}^R$

##### B. Restricciones para el modelo r-TSALBP-ergo con número fijo de estaciones de trabajo

$$x_{jk} \in \{0,1\}, (\forall j \in J, k \in K) \quad (8)$$

$$y_{k\epsilon}^c \in \{0,1\}, (\forall k \in K, \epsilon \in E) \quad (9)$$

$$y_{k\epsilon}^A \in \{0,1\}, (\forall k \in K, \epsilon \in E) \quad (10)$$

$$y_{k\epsilon}^R \in \{0,1\}, (\forall k \in K, \epsilon \in E) \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} = 1, (\forall j \in J) \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jk} \geq 1, (\forall k \in K) \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} k(x_{ik} - x_{jk}) \leq 0, (\forall i \in P_j \subseteq J) \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} \bar{t}_{j\epsilon} x_{jk} \leq (c + \Delta_c y_{k\epsilon}^c), (\forall k \in K, \epsilon \in E) \quad (15)$$

$$\sum_{j \in J} \bar{a}_{j\epsilon} x_{jk} \leq (A + \Delta_A y_{k\epsilon}^A), (\forall k \in K, \epsilon \in E) \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J} \bar{R}_{j\epsilon} x_{jk} \leq (R + \Delta_R y_{k\epsilon}^R), (\forall k \in K, \epsilon \in E) \quad (17)$$

Las condiciones (8)-(11) permiten forzar la integridad de las variables de decisión del modelo. Las igualdades (12) sirven para asignar cada tarea a una y solo una estación de trabajo. Las restricciones (13) obligan a que toda estación tenga al menos una tarea asignada. Las restricciones (14) aseguran la satisfacción de las precedencias entre tareas. Finalmente, las restricciones (15)-(17) limitan respectivamente el valor de los atributos temporales, espaciales y contingentes, en cada estación y en cada plan de demanda.



## C. Métricas para la robustez en TSALBP-ergo

(mr.1) Proporción de planes del conjunto E satisfechos por la solución  $\zeta_0$ , según la limitación del tiempo de ciclo c.

$$r_c^1 = 1 - \frac{1}{|E|} \sum_{\varepsilon=1}^{|\mathcal{E}|} \max_{k \in K} y_{k\varepsilon}^c \quad (18)$$

(mr.2) Proporción de estaciones sin sobrecarga de trabajo. Es decir, proporción de estaciones de la línea con tiempo de carga menor o igual que el tiempo de ciclo c.

$$r_c^2 = 1 - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{|\mathcal{K}|} \max_{\varepsilon \in E} y_{k\varepsilon}^c \quad (19)$$

(mr.3) Proporción del tiempo de proceso adicional concedido ( $\Delta_c$ ) que no emplea la solución  $\zeta_0$ , Es igual a 1 cuando  $r_c^1 = 1$  o  $r_c^2 = 1$ .

$$r_c^3 = 1 - \frac{1}{\Delta_c Y^c} \sum_{\forall \varepsilon, k} \max \left\{ 0, \sum_{\forall j} \bar{t}_{j\varepsilon} x_{jk} - c \right\} : Y^c > 0, \quad (20)$$

si  $Y^c = 0 \Rightarrow r_c^3 = 1$

(mr.4) Proporción de planes del conjunto E satisfechos por la solución  $\zeta_0$ , según el área lineal disponible A.

$$r_A^1 = 1 - \frac{1}{|E|} \sum_{\varepsilon=1}^{|\mathcal{E}|} \max_{k \in K} y_{k\varepsilon}^A \quad (21)$$

(mr.5) Proporción de estaciones que requieren un área lineal menor o igual que el área lineal disponible A.

$$r_A^2 = 1 - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{|\mathcal{K}|} \max_{\varepsilon \in E} y_{k\varepsilon}^A \quad (22)$$

(mr.6) Proporción del área lineal adicional concedida ( $\Delta_A$ ) que no emplea la solución  $\zeta_0$ . Es igual a 1 cuando  $r_A^1 = 1$  o  $r_A^2 = 1$ .

$$r_A^3 = 1 - \frac{1}{\Delta_A Y^A} \sum_{\forall \varepsilon, k} \max \left\{ 0, \sum_{\forall j} \bar{a}_{j\varepsilon} x_{jk} - A \right\} : Y^A > 0, \quad (23)$$

si  $Y^A = 0 \Rightarrow r_A^3 = 1$

(mr.7) Proporción de planes del conjunto E satisfechos por la solución  $\zeta_0$ , según la limitación del riesgo R.

$$r_R^1 = 1 - \frac{1}{|E|} \sum_{\varepsilon=1}^{|\mathcal{E}|} \max_{k \in K} y_{k\varepsilon}^R \quad (24)$$

(mr.8) Proporción de estaciones sin sobre-riesgo ergonómico: proporción de estaciones cuyo riesgo ergonómico no excede al riesgo permisible R.

$$r_R^2 = 1 - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{|\mathcal{K}|} \max_{\varepsilon \in E} y_{k\varepsilon}^R \quad (25)$$

(mr.9) Proporción del riesgo ergonómico adicional concedido ( $\Delta_R$ ) que no emplea la solución  $\zeta_0$ . Es igual a 1 cuando  $r_R^1 = 1$  o  $r_R^2 = 1$ .

$$r_R^3 = 1 - \frac{1}{\Delta_R Y^R} \sum_{\forall \varepsilon, k} \max \left\{ 0, \sum_{\forall j} \bar{R}_{j\varepsilon} x_{jk} - R \right\} : Y^R > 0, \quad (26)$$

si  $Y^R = 0 \Rightarrow r_R^3 = 1$

## V. EJEMPLOS ILUSTRATIVOS

## A. Datos y condiciones

Adoptamos un caso de estudio de la línea de producción de motores mixtos de la fábrica de Barcelona de Nissan Motor Ibérica, evaluando la robustez de soluciones ante un conjunto de planes de demanda en un entorno industrial.

Los 7 planes seleccionados para este artículo ( $\varepsilon \in E$ ) tienen una demanda diaria de 270 motores; los detalles se recogen en la Tabla I.

TABLA I. DEMANDAS DIARIAS POR TIPO DE MOTOR Y PLAN ( $d_{i,\varepsilon}$ ) PARA LAS INSTANCIAS CATEGÓRICAS NISSAN-9ENG.I ( $\varepsilon \in E$ ).

$i \in I$	$\varepsilon = 1$	$\varepsilon = 2$	$\varepsilon = 3$	$\varepsilon = 6$	$\varepsilon = 9$	$\varepsilon = 12$	$\varepsilon = 18$
$p_1$	30	30	10	50	70	24	60
$p_2$	30	30	10	50	70	23	60
$p_3$	30	30	10	50	70	23	60
$p_4$	30	45	60	30	15	45	30
$p_5$	30	45	60	30	15	45	30
$p_6$	30	23	30	15	8	28	8
$p_7$	30	23	30	15	8	28	8
$p_8$	30	22	30	15	7	27	7
$p_9$	30	22	30	15	7	27	7
SUVs	90	90	30	150	210	70	180
Vans	60	90	120	60	30	90	60
Truck	120	90	120	60	30	110	30
Total	270	270	270	270	270	270	270

En la línea se fabrican hasta 9 tipos de motores distintos ( $p_1, \dots, p_9$ ) con diferentes destinos y características de montaje: los tres primeros tipos son para vehículos SUVs; los tipos  $p_4$  y  $p_5$  son para furgonetas (vans); y los cuatro últimos se destinan a camiones comerciales (trucks) de medio tonelaje. Para una demanda equilibrada (idéntica demanda para los 9 tipos) y un tiempo de ciclo de 3 minutos, la línea consta de 21 estaciones en serie con una longitud media de 4 metros cada una. El número de tareas elementales para fabricar un motor asciende a 380 y su agrupación da lugar a 140 tareas de montaje. En [5],[16] se pueden consultar los tiempos de proceso  $\bar{t}_{j\varepsilon}$ , las áreas lineales  $\bar{a}_{j\varepsilon}$ , las categorías de riesgo  $\chi_j$  y los conjuntos de precedencias  $P_j$  de las 140 tareas de montaje.

## B. Resultados

Aquí analizamos cuatro configuraciones de línea mediante la aplicación de las métricas de robustez (mr.1-mr.9):

- Dos configuraciones de línea,  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$ , con 18 estaciones, 180s de ciclo, 5,5 metros de área lineal por estación, 500 ergo-s de riesgo permitido y con coeficientes de flexibilidad ( $\gamma_c, \gamma_A, \gamma_R$ ) iguales al 5%. Las soluciones  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  se han obtenido mediante un IDEA adaptativo [7] y se muestran en las Tablas II y III.
- Dos configuraciones de línea,  $\zeta_3$  y  $\zeta_4$ , con 25 estaciones, 170s de ciclo, 3,5 metros de área lineal disponible por estación, 320 ergo-s de riesgo permitido y con coeficientes de flexibilidad ( $\gamma_c, \gamma_A, \gamma_R$ ) iguales al 5%. Las soluciones  $\zeta_3$  y  $\zeta_4$  se muestran en las Tablas IV y V y se han obtenido mediante un algoritmo GRASP [16], cuyo desempeño ha sido contrastado con PLEM.

TABLA II. CONFIGURACIÓN  $\zeta_1$  (18, 5,5, 500, 5%) IDEA ADAPTATIVO

$k$	$j \in S_k$ : carga de las estaciones										
1	1	7	8	9	11						
2	3	4	5	10	13	14					
3	6	12	16	17	19	20	21				
4	15	18	22	23	24	25	26	27	28		
5	2	29	30	31	32	34	36				
6	33	35	37	38	39	40	41	43			
7	42	44	45	46	47	48	49	59	60		
8	50	51	52	53	54	55	56	57	58		
9	61	62	63	64	65	66	67	70			
10	68	69	71	72	73	74	75				
11	76	77	78	79	80	81	82	83	84	86	
12	85	87	88	89	90	91	92	99			
13	93	94	95	96	98	100	101	103			
14	102	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113
	114	115									
15	116	117	118	119	120	131					
16	121	122	123	128	132	134	135	136			
17	97	124	125	126	127	129	137	138	139		
18	130	133	140								

TABLA III. CONFIGURACIÓN  $\zeta_2$  (18, 5,5, 500, 5%) IDEA ADAPTATIVO

$k$	$j \in S_k$ : carga de las estaciones										
1	1	3	7	10	11						
2	4	5	8	9	13	14	18				
3	6	12	15	16	17	20					
4	22	23	24	25	28	29	30	31	32	34	
5	2	33	35	36	37	38					
6	39	40	41	42	43	44	45				
7	46	47	48	49	52	53	54	55	56		
8	50	51	57	58	59	60	61	62			
9	63	64	65	66	67	68	69	71	72		
10	70	73	74	75	76	77	78				
11	21	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
12	19	26	90	91	92	98					
13	27	94	95	99	100	101	102	103	104	108	109
	110	111									
14	107	112	113	114	115	116	117	118			
15	105	106	119	120	121	122	123	124			
16	79	93	128	131	132	134	135	136			
17	96	97	125	126	127	129	137	138	139		
18	130	133	140								

En las Tablas VI-IX mostramos los resultados resaltables para las cuatro configuraciones. Debemos hacer notar que las cuatro configuraciones son fuertemente robustas en atributos espaciales:  $y_{k\epsilon}^A = 0 (\forall k \in K, \epsilon \in E)$ .

La configuración  $\zeta_1$ . (Tabla VI) es fuertemente robusta en tiempo y en cuanto a riesgo ergonómico solo hay sobrecarga en las estaciones 7 y 12, en los 7 planes, por debajo del 5% de flexibilidad concedida. La configuración  $\zeta_2$  (Tabla VII) es casi fuertemente robusta en tiempos; en riesgo solo hay exceso en la estación 7 por debajo del 5% de flexibilidad concedida.

Por su parte, las configuraciones  $\zeta_3$  y  $\zeta_4$ , aun siendo semejantes, tienen distintas propiedades (Tablas VIII y IX). En efecto,  $\zeta_4$  es fuertemente robusta en riesgo y  $\zeta_3$  casi también lo es. En cuanto al tiempo de carga, tanto  $\zeta_3$  como  $\zeta_4$  exceden levemente el tiempo de ciclo.

A modo de resumen, la Tabla X recoge los valores de las 9 métricas para las 4 configuraciones  $\zeta_1 - \zeta_4 (\forall \epsilon \in E)$ .

TABLA IV. CONFIGURACIÓN  $\zeta_3$  (25, 3,5, 320, 5%) GRASP\_MAX

$k$	$j \in S_k$ : carga de las estaciones										
1	1	10									
2	13	14	11	3	9	18					
3	17	15	21	20	19						
4	5	4	6	16							
5	26	27	25	23	22	7					
6	24	28	29	30	8						
7	31	32	36	33	35	37	34				
8	39	40	38	43	41	59					
9	42	44	45	46	48						
10	49	47	50	54	55	53					
11	56	52	51	60	57	64					
12	58	61	62	63	66	67					
13	70	65	68	71	72						
14	73	69	74	76							
15	79	75	77	78	81	80	82				
16	83	84	85	86	88	87	89				
17	90	91	99	92							
18	98	100	101	102	94	103					
19	106	104	108	105	113	109	111	115	114	112	107
20	12	2	116	118							
21	119	120	117	131	132	134	135				
22	121	136	93	95	122						
23	123	124	125	126	127	96	129				
24	128	137	130	133	97						
25	138	139	140	110							

TABLA V. CONFIGURACIÓN  $\zeta_4$  (25, 3,5, 320, 5%) GRASP\_MED. SE MUESTRA LAS CARGA DE LAS ESTACIONES 9,10 Y 16-21. LAS CARGAS RESTANTES SON IDÉNTICAS A LAS DE LA CONFIGURACIÓN  $\zeta_3$ .

$k$	$j \in S_k$ : carga de las estaciones										
9	42	44	45	46	47						
10	49	48	50	54	55	53					
16	83	84	85	86	88	87	91				
17	90	89	99	92							
18	98	100	101	106	103						
19	102	104	108	105	113	109	111	115	114	112	94
20	12	2	116	119							
21	107	118	120	117	131	132	134	135			

TABLA VI. TIEMPOS DE CARGA Y RIESGO DE CARGA PARA LAS ESTACIONES SATURADAS O SOBRECARGADAS DE LA CONFIGURACIÓN  $\zeta_1$ .

Tiempos de carga $t(S_k)$								
$k \setminus \epsilon$	1	2	3	6	9	12	8	
3	178,0	178,2	177,3	179,1	180,0	177,8	179,6	
12	180,0	179,6	179,5	179,8	179,9	179,7	179,6	
17	180,0	179,6	179,5	179,6	179,7	179,7	179,4	
max	180,0	179,6	179,5	179,8	180,0	179,7	179,6	
$\Delta_{max}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Riesgos de carga $R(S_k)$								
$k \setminus \epsilon$	1	2	3	6	9	12	18	
7	510,0	511,3	511,3	511,2	511,2	510,9	511,8	
12	520,0	518,8	518,4	519,3	519,3	519,1	518,9	
max	520,0	518,8	518,4	519,3	519,3	519,1	518,9	
$\Delta_{max}$	20,00	18,83	18,43	19,31	19,31	19,11	18,92	



TABLA VII. TIEMPOS DE CARGA Y RIESGO DE CARGA PARA LAS ESTACIONES SATURADAS O SOBRECARGADAS DE LA CONFIGURACIÓN  $\zeta_2$ .

Tiempos de carga $t(S_k)$							
$k \setminus \varepsilon$	1	2	3	6	9	12	18
15	180,0	179,9	179,8	180,0	180,1	179,9	180,0
17	180,0	179,6	179,6	179,5	179,5	179,7	179,3
max	180,0	179,9	179,8	180,0	180,1	179,9	180,0
$\Delta_{max}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
Riesgos de carga $R(S_k)$							
$k \setminus \varepsilon$	1	2	3	6	9	12	18
7	510,0	511,1	511,1	510,9	510,9	510,8	511,5
max	510,0	511,1	511,1	510,9	510,9	510,8	511,5
$\Delta_{max}$	10,00	11,09	11,13	10,94	10,94	10,83	11,46

TABLA VIII. TIEMPOS DE CARGA Y RIESGO DE CARGA PARA LAS ESTACIONES SATURADAS O SOBRECARGADAS DE LA CONFIGURACIÓN  $\zeta_3$ .

Tiempos de carga $t(S_k)$							
$k \setminus \varepsilon$	1	2	3	6	9	12	18
25	170,0	170,8	171,5	170,0	169,4	170,8	170,1
max	170,0	170,8	171,5	170,0	169,4	170,8	170,1
$\Delta_{max}$	0,00	0,78	1,45	0,03	0,00	0,82	0,08
Riesgos de carga $R(S_k)$							
$k \setminus \varepsilon$	1	2	3	6	9	12	18
20	320,0	320,1	319,9	320,2	320,2	320,0	320,3
max	320,0	320,1	319,9	320,2	320,2	320,0	320,3
$\Delta_{max}$	0,00	0,09	0,00	0,20	0,20	0,01	0,32

TABLA IX. TIEMPOS DE CARGA Y RIESGO DE CARGA PARA LAS ESTACIONES SATURADAS O SOBRECARGADAS DE LA CONFIGURACIÓN  $\zeta_4$ .

Tiempos de carga $t(S_k)$							
$k \setminus \varepsilon$	1	2	3	6	9	12	18
21	170,0	170,7	170,9	170,7	170,5	170,5	171,0
25	170,0	170,8	171,5	170,0	169,4	170,8	170,1
max	170,0	170,8	171,5	170,7	170,5	170,8	171,0
$\Delta_{max}$	0,00	0,78	1,45	0,66	0,54	0,82	0,97
Riesgos de carga $R(S_k)$							
$k \setminus \varepsilon$	1	2	3	6	9	12	18
20	320,0	318,9	318,8	319,0	319,0	319,3	318,5
max	320,0	318,9	318,8	319,0	319,0	319,3	318,5
$\Delta_{max}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

TABLA X. VALORACIÓN SEGÚN MÉTRICAS DE ROBUSTEZ -  $(mr. 1 - mr. 9)$  - DE LAS 4 CONFIGURACIONES DE LÍNEA  $\zeta_1 - \zeta_4$  ( $\forall \varepsilon \in E$ )..

	$r_c^1$	$r_c^2$	$r_c^3$	$r_R^1$	$r_R^2$	$r_R^3$	$r_A^{1,2,3}$
$\zeta_1$	1,00	1,00	1,00	0,00	0,89	0,91	1,00
$\zeta_2$	0,86	0,89	0,99	0,00	0,94	0,93	1,00
$\zeta_3$	0,29	0,96	0,97	0,29	0,96	1,00	1,00
$\zeta_4$	0,14	0,92	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00

VI. CONCLUSIONES

Hemos definido 9 métricas de robustez para el problema TSALBP-ergo basándonos en trabajos previos para TSALBP. Nuestra propuesta, r-TSALBP-ergo, será útil en las siguientes circunstancias: (i) una línea de productos mixtos como sistema productivo, (ii) un ensamblado complejo con adiestramiento y especialización de los operarios y con tiempos de ciclo grandes (0.5'-15'), (iii) productos de grandes dimensiones (motores,

carrocerías, vehículos, etc.), (iv) lista de materiales compleja y con elevado número de componentes grandes y pesados, (v) estaciones largas (300cm-1000cm), (vi) valores de los atributos temporales, espaciales y de riesgo estables o con variabilidad controlada, y (vii) demanda variable de los productos.

En trabajos futuros, propondremos metaheurísticas y otros procedimientos híbridos, asistidos por la PLEM, para resolver diversas variantes del r-TSALBP-ergo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Gobierno de España) con el proyecto TIN2014-57497-P (FHI-SELM2).

REFERENCIAS

- [1] Battaia, O., Dolgui, A., 2013. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics* 142, 259–277.
- [2] Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., 2008. Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics* 111, 509–528.
- [3] Scholl, A., Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 666–693.
- [4] Bautista, J., Pereira, J., 2007. Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 177, 2016–2032.
- [5] Bautista, J., Batalla-García, C., Alfaro-Pozo, R. 2016. Models for assembly line balancing by temporal, spatial and ergonomic risk attributes. *European Journal of Operational Research* 251, 814–829.
- [6] Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J., 2013. A robustness information and visualization model for time and space assembly line balancing under uncertain demand. *International Journal of Production Economics* 145, 761–772.
- [7] Chica, M., Bautista, J., Cordon, O., Damas, S. 2016. A multiobjective model and evolutionary algorithms for robust time and space assembly line balancing under uncertain demand. *Omega* 58, 55–68.
- [8] Chica, M., Bautista, J., de Armas, J. 2018. Benefits of robust multiobjective optimization for flexible automotive assembly line balancing. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10696-018-9309-y>
- [9] Beyer, H., Sendhoff, B., 2007. Robust optimization - a comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 196, 3190–3218.
- [10] Xu, W., Xiao, T., 2011. Strategic robust mixed model assembly line balancing based on scenario planning. *Tsinghua Science & Technology* 16, 308–314.
- [11] Simaria, A.S., Zanella de Sá, M., Vilarinho, P.M., 2009. Meeting demand variation using flexible u-shaped assembly lines. *International Journal of Production Research* 47, 3937–3955.
- [12] Dolgui, A., Kovalev, S., 2012. Scenario based robust line balancing: Computational complexity. *Discrete Applied Mathematics* 160, 1955–1963.
- [13] Li, J., Gao, J., 2014. Balancing manual mixed-model assembly lines using overtime work in a demand variation environment. *International Journal of Production Research* 52, 3552–3567.
- [14] Gurevsky, E., Battaia, O., Dolgui, A., 2012. Balancing of simple assembly lines under variations of task processing times. *Annals of Operations Research* 201, 265–286.
- [15] Hazir, Ö., Dolgui, A., 2013. Assembly line balancing under uncertainty: Robust optimization models and exact solution method. *Computers & Industrial Engineering* 65, 261–267.
- [16] Bautista-Valhondo, J., Alfaro-Pozo, R. 2018. A Case Study at the Nissan Barcelona factory to minimize the ergonomic risk and its standard deviation in a mixed-model assembly line. *Progress in Artificial Intelligence*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13748-018-0153-9>