

MAEB

Mérida-Almendralejo
4 al 6 de Febrero de 2015

2015

X Congreso Español sobre Metaheurísticas,
Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados
MAEB 2015

Actas del X Congreso Español
sobre Metaheurísticas,
Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados

MAEB 2015

Editadas por:

Francisco Chávez de la O
Rafael M. Luque Baena
Francisco Luna
Francisco Fernández de Vega

Mérida - Almendralejo
4, 5 y 6 de febrero de 2015

Edita: Francisco Chávez de la O, Rafael M. Luque-Baena, Francisco Luna, Francisco Fernández de Vega
Centro Universitario de Mérida
Universidad de Extremadura

Derechos reservados

© Los autores

Diseño de cubierta: Cayetano Cruz García

ISBN: 978-84-697-2150-6

Comité Organizador

Cayetano Cruz García
Universidad de Extremadura

Josefa Díaz Álvarez
Universidad de Extremadura

Francisco Chávez de la O
Universidad de Extremadura

Francisco Fernández de Vega
Universidad de Extremadura

Francisco Luna
Universidad de Extremadura

Rafael M. Luque-Baena
Universidad de Extremadura

Comité Director

Enrique Alba
Universidad de Málaga

Abraham Duarte
Universidad Rey Juan Carlos

Francisco Fernández de Vega
Universidad de Extremadura

José Antonio Gámez
Universidad de Castilla-La Mancha

Francisco Herrera
Universidad de Granada

J. Ignacio Hidalgo
Universidad Complutense de Madrid

César Hervás
Universidad de Córdoba

Rafael Martí
Universidad de Valencia

Juan Julián Merelo
Universidad de Granada

José A. Moreno
Universidad de La Laguna

Luciano Sánchez
Universidad de Oviedo

Comité de Programa

Jesús Aguilar, Universidad Pablo de Olavide
Enrique Alba, Universidad de Málaga
Carlos Andrés Romano, U. Politécnica de Valencia
Ada Álvarez, Universidad Autónoma de Nuevo León
Ramón Álvarez-Valdés, Universidad de Valencia
Lourdes Araujo, Universidad Nacional a Distancia
Jaume Bacardit, University of Nottingham
Julio R. Banga, CSIC
Joaquín Bautista, Universidad Politécnica de Cataluña
José Manuel Benítez, Universidad de Granada
Christian Blum, Universidad Politécnica de Cataluña
Rafael Caballero, Universidad de Málaga
Vicente Campos, Universitat de València
Jorge Casillas, Universidad de Granada
Pedro A. Castillo Valdivieso, Universidad de Granada
Francisco Chicano, Universidad de Málaga
Francisco Chávez, Universidad de Extremadura
Carlos A. Coello Coello, CINVESTAV - IPN
Ángel Corberán, Universidad de Valencia
Oscar Cerdón, Universidad de Granada
Carlos Cotta, Universidad de Málaga
Antonio Córdoba, Universidad de Sevilla
Bernabé Dorransoro, Universidad de Luxemburgo
Abraham Duarte, Universidad Rey Juan Carlos
Richard Duro, Universidad da Coruña
Adenso Díaz, Universidad de Oviedo
José Egea, Universidad Politécnica de Cartagena
Francisco Javier Elorza, U. Politécnica de Madrid
Antonio J. Fernández, Universidad de Málaga
Francisco Fernández, Universidad de Extremadura
Miguel Frade, Instituto Politécnico de Leiria
Mario García, Instituto Politécnico de Tijuana
Maribel García Arenas, Universidad de Granada
Eduardo García Pardo, Universidad Rey Juan Carlos
Carlos García, Universidad de Córdoba
Nicolás García, Universidad de Córdoba
Salvador García, Universidad de Jaén
Raúl Giraldez, Universidad Pablo de Olavide
José Luís González-Velarde, Inst. Tec. de Monterrey
Antonio González, Universidad de Granada
Pedro González, Universidad de Jaén
José Antonio Gutiérrez, Universidad de Córdoba
José Antonio Gámez, U. de Castilla-La Mancha
Juan A. Gómez Pulido, Universidad de Extremadura
Francisco Herrera, Universidad de Granada
Cesar Hervás, Universidad de Córdoba
José Ignacio Hidalgo, U. Complutense de Madrid
María José del Jesús, Universidad de Jaén
Ángel A. Juan, Universitat Oberta de Catalunya
Manuel Laguna, Universidad de Colorado
Dario Landa Silva, University of Nottingham
Helena Ramalinho Lourenco, U. Pompeu Fabra
José Antonio Lozano, Universidad del País Vasco
Manuel Lozano, Universidad de Granada
Francisco Luna, Universidad de Málaga
Gabriel J. Luque, Universidad de Málaga
Rafael M. Luque-Baena, Universidad de Extremadura
Luís Magdalena, European Centre for Soft Computing
Rafael Martí, Universitat de València
Francisco Martínez, Universidad de Córdoba
Belén Melián, Universidad de La Laguna
Alexander Mendiburu, Univ. del País Vasco
Julián Molina, Universidad de Málaga
J. Marcos Moreno, Universidad de La Laguna
José A. Moreno, Universidad de La Laguna
Antonio J. Nebro, Universidad de Málaga
Julio Ortega, Universidad de Granada
Domingo Ortiz, Universidad de Córdoba
Luis de la Ossa, Universidad de Castilla-La Mancha
José Otero, Universidad de Oviedo
Joaquín Pacheco, Universidad de Burgos
Juan J. Pantrigo, Universidad Rey Juan Carlos
Francisco Parreño, Universidad de Castilla-La Mancha
David Pelta, Universidad de Granada
Antonio Peregrín, Universidad de Huelva
José Miguel Puerta, U. de Castilla-La Mancha
Cynthia Pérez, Tecnológico de Sinaloa
M. Elena Pérez, Universidad de Valladolid
Juan R. Rabuñal, Universidad da Coruña
Ignacio Requena, Universidad de Granada
José Riquelme, Universidad de Sevilla
Jose Luís Risco-Martín, U. Complutense de Madrid
Víctor Rivas, Universidad de Jaén
Rubén Ruiz, Universidad Politécnica de Valencia
Roger Ríos, Universidad Autónoma de Nuevo León
Sancho Salcedo, Universidad de Alcalá
Roberto Santana, Universidad Politécnica de Madrid
Antonio Sanz Montemayor, U. Rey Juan Carlos
Thomas Stütze, Université Libre de Bruxelles
Yago Sáez, Universidad Carlos III de Madrid
Ana María Sánchez, Universidad de Granada
Luciano Sánchez, Universidad de Oviedo
Leonardo Trujillo, Instituto Tecnológico de Tijuana
Ángel Udías, Universidad Rey Juan Carlos
Miguel A. Vega Rodríguez, U. de Extremadura
Sebastián Ventura, Universidad de Córdoba
José Luís Verdegay, Universidad de Granada
Gabriel Villa, Universidad de Sevilla
Pedro Villar, Universidad de Granada
Juan Villegas, Universidad Autónoma Metropolitana
Gabriel Winter, U. de las Palmas de Gran Canaria
Amelia Zafra, Universidad de Córdoba

Presentación

El presente volumen contiene los trabajos presentados en el X Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB'15), celebrado en Mérida y Almendralejo, los días 4, 5 y 6 de febrero de 2015.

En esta edición, se recogen 97 trabajos, que han sido cuidadosamente revisados por un amplio comité de programa internacional, y que muestran las líneas más actuales de investigación en el dominio.

Esta décima edición de MAEB ha permitido volver a Mérida, punto de inicio de esta serie de congresos que se han venido celebrando bianualmente desde el año 2002, y que desde entonces ha recorrido la geografía Española.

MAEB es hoy una referencia como lugar de encuentro e intercambio de conocimientos y experiencias entre investigadores del área de las metaheurísticas, los algoritmos evolutivos y bioinspirados, y ha llegado a consolidarse como uno de los más exitosos congresos nacionales del área TIC.

Los miembros del comité de organización quieren expresar el más sincero agradecimiento a todos los autores, ponentes, organizadores de sesiones especiales, miembros del comité de programa, comité director y asistentes en general, así como a todas las instituciones colaboradoras que han permitido que esta nueva edición sea una realidad.

Damos la bienvenida a todos, deseando que esta edición de MAEB nos enriquezca científicamente y nos brinde la oportunidad de conocer un poco más de cerca Extremadura y algunas de sus ciudades más significativas.

EL COMITÉ ORGANIZADOR

Algoritmos GRASP para el equilibrado de líneas con riesgo ergonómico mínimo

Joaquín Bautista¹, Rocío Alfaro¹, Cristina Batalla¹, Sara Llovera¹

¹ETSEIB, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, 08028 Barcelona, Spain
joaquin.bautista@upc.edu, rocio.alfaro@upc.edu, cristina.batalla@upc.edu, sara.maria.llovera@upc.edu

Resumen - Se presenta un problema de equilibrado de líneas de montaje con ciclo compatible y número fijo de estaciones con el objetivo de minimizar el máximo riesgo ergonómico presente en las estaciones de trabajo. Tras la formulación de un modelo matemático para el problema, se proponen procedimientos GRASP para su resolución. Los procedimientos incorporan un algoritmo greedy para regularizar el riesgo ergonómico así como diferentes tipos de mejora local. Después, se realiza una experiencia computacional sobre un caso de estudio de la planta de motores de Nissan en Barcelona, considerando diferentes diseños de línea en relación al número de puestos de trabajo. Los resultados ofrecidos por GRASP se comparan con los mejores obtenidos para dicho caso mediante la Programación Lineal Entera Mixta.

Palabras clave – GRASP, Equilibrado de líneas de producción, Riesgo ergonómico.

1. INTRODUCCIÓN

La idea de que en manufactura muchos trabajos son moderados en consumo energético es falsa: la mayoría de los trabajos suponen un gasto físico y psíquico muy alto por parte del trabajador.

El gasto físico es básico en la actividad laboral, dando lugar a múltiples riesgos sobre la salud de los trabajadores.

Los trastornos músculo-esquelético relacionados con el trabajo suelen ser causantes de accidentes y enfermedades; por ello, es conveniente reconocer y evaluar todos los factores de riesgo que afectan física y psíquicamente al trabajador para adoptar medidas de control y de supresión.

La ergonomía se preocupa del examen de las condiciones laborales, en cuanto a riesgos derivados de las características del trabajo, con el propósito de conseguir eficacia, confort y seguridad.

En algunos sectores industriales y en especial el de automoción, además de los factores ergonómicos, existen aspectos que interfieren en el desarrollo de la actividad laboral.

El sector de automoción es referente en sistemas productivos orientados al producto, cuyo paradigma recibe el nombre de línea de montaje.

En el diseño de líneas de montaje aparece un problema clásico que recibe el nombre de problema de equilibrado [1].

Los problemas de equilibrado de líneas son muy variados [2]; aquí los enunciaremos así: dado un conjunto de tareas ($J: j=1..|J|$) con sus atributos temporales (tiempo de proceso: $t_j: j \in J$), espaciales

[3] (área requerida: $a_j: j \in J$), y ergonómicos [4] (riesgo ergonómico de tarea: $R_j: j \in J$); (2) dado un conjunto de estaciones de trabajo ($K: k \in K$); y (3) dado un conjunto de ligaduras de precedencia entre tareas y otras restricciones, un equilibrado de líneas consiste en asignar todas las tareas al conjunto de estaciones respetando restricciones y limitaciones y alcanzando la máxima productividad del sistema. En el presente trabajo abordamos un problema de equilibrado de líneas con limitación del tiempo de ciclo y con el objetivo de minimizar el riesgo ergonómico máximo de las estaciones.

Por su parte, los algoritmos GRASP [5] han sido ampliamente utilizados como métodos de resolución de problemas de optimización combinatoria, siendo muy diversas sus aplicaciones [6]. El caso que nos ocupa es un claro ejemplo en el que las cualidades de GRASP invitan a su utilización: primero, porque un equilibrado de líneas supone una secuencia de decisiones sobre la ordenación de un conjunto de tareas (idea que encaja con el proceso de decisión de GRASP); y segundo, por tratarse de procedimientos altamente competitivos, en tiempo de computación, frente a otras metaheurísticas y/o métodos exactos como la programación lineal entera mixta (PLEM), asumiendo una ligera pérdida en la calidad de las soluciones.

Nuestra propuesta contiene lo siguiente: (1) un modelo matemático para el equilibrado de líneas con mínimo riesgo ergonómico, (2) procedimientos GRASP con lista restringida de tamaño variable, (3) un estudio experimental con un caso de una línea de motores de Nissan BCN, comparando los resultados de GRASP con los mejores obtenidos por la PLEM.

El texto que sigue se estructura así: en la sección II se recogen los conceptos básicos sobre riesgo ergonómico, se ilustra su repercusión sobre el equilibrado de líneas a través de un ejemplo y se propone una unificación para su medida a partir de distintos métodos consolidados; en la sección III se formula un modelo matemático, $M - \min \bar{R}(\Phi)$, para el problema objeto de estudio; la sección IV se destina a la descripción del procedimiento GRASP adaptado al problema; en la sección V se describe la experiencia computacional en la que se mide el impacto positivo generado por el incremento del número de puestos de trabajo sobre la reducción del riesgo ergonómico de la línea (representado por la

estación con mayor riesgo); finalmente, la sección VI se destina a destacar las principales conclusiones de este estudio.

II. RIESGO ERGONÓMICO

A. Ejemplo ilustrativo

Entendemos aquí por riesgo ergonómico como la función que valora el daño que puede provocar sobre las personas la ejecución de un trabajo durante un tiempo. Para nosotros, dicha función presenta al menos dos componentes: la naturaleza de las tareas y el tiempo de exposición a ellas.

La naturaleza de una tarea está sujeta a distintos elementos: la fuerza que requiere, la postura que hay que asumir para ejecutarla, el grado de adecuación de las herramientas, la exposición a condiciones no naturales (vibraciones), el ambiente (temperatura, humedad y luminosidad), entre otros. Es evidente, que la combinación de estos elementos se convierte en un factor de riesgo para el trabajador.

En la literatura, encontramos algunos trabajos previos sobre el tratamiento del riesgo ergonómico en problemas de equilibrado de líneas [4,7,8]. Es obvio que la limitación de dicho riesgo supone, como en otros casos, un incremento inevitable del número de estaciones de trabajo.

Para ilustrar lo anteriormente dicho, se aplican 3 variantes del problema (SALBP-1 [9], TSALBP-1 [3] y TSALBP-1- σ [7]) sobre el ejemplo siguiente.

Ejemplo.1 - Se tiene un conjunto de 8 tareas con sus ligaduras de precedencia (ver Fig.1). Cada tarea tiene asociados tres valores (separados por “/” en la Fig.1): tiempo, espacio requerido y riesgo.

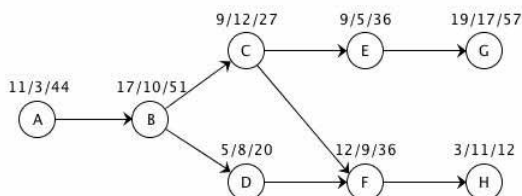


Fig. 1. Grafo orientado de tareas. Los atributos temporales, espaciales y de riesgo se separan mediante “/”.

La primera limitación corresponde al tiempo de ciclo ($c=20s$), y da lugar a un número de estaciones $m=5$ (ver Fig.2).

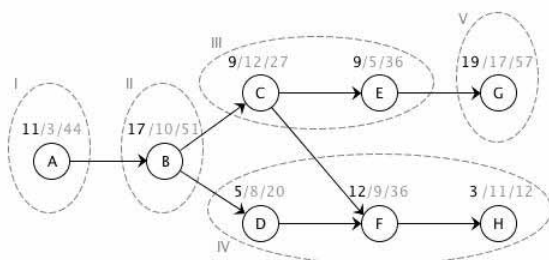


Fig. 2. Solución para la versión SALBP-1 del problema con tiempo de ciclo $c=20$: $m=5$.

La segunda limitación (añadida sobre la anterior) corresponde al área disponible ($A=20dm$) y da lugar a un número de estaciones $m=6$ (ver Fig.3).

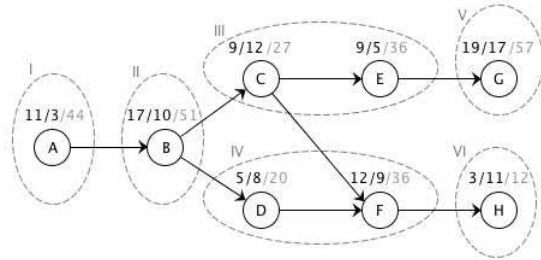


Fig. 3. Solución para la versión TSALBP-1 del problema con tiempo de ciclo $c=20$ y área disponible $A=20$: $m=6$.

La tercera limitación (añadida a las anteriores) corresponde al riesgo ergonómico que se admite como máximo ($R_{max}=60 e-s$) y da lugar a un número de estaciones $m=7$ (ver Fig.4).

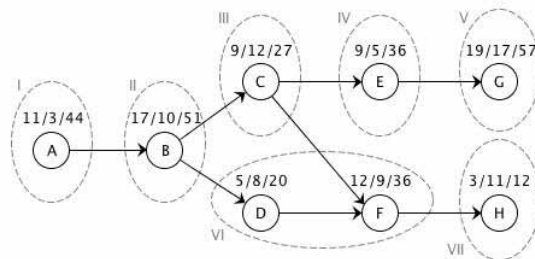


Fig. 4. Solución para la versión TSALBP-1- σ del problema ($c=20$, $A=20$ y $R_{max}=60$): $m=7$.

B. Unificación de métodos de medida

En los últimos años se han realizado numerosos estudios que vinculan la naturaleza de las tareas con las dolencias y enfermedades que pueden sufrir los trabajadores que las ejecutan.

La variedad de factores de riesgo a los que se encuentran expuestos los trabajadores propicia, por una parte, la proliferación y diversidad de métodos de medida del riesgo y, por otra, la falta de consenso a la hora de adoptar un único sistema de medida.

Entre los factores físicos a considerar para la evaluación del riesgo, este trabajo se centra en los siguientes: (1) *manipulación manual de cargas* (son actividades que conllevan el levantamiento, empuje, agarre, desplazamiento, tracción o colocación de un objeto por parte de un único trabajador o varios trabajadores), (2) los *movimientos repetitivos* (son actividades que entrañan la realización de esfuerzos rápidos y repetitivos en un grupo osteomuscular, generando fatiga, sobrecarga y dolor) y (3) *carga postural* (son posturas forzadas o inadecuadas que sobrecargan la estructura osteomuscular).

La literatura ofrece múltiples métodos capaces de evaluar de forma individual los factores de riesgo ergonómico descritos anteriormente, no obstante, no existe un consenso general en qué métodos son los más adecuados para cada factor ni en el alcance corporal de cada método ni en la escala empleada para medir el riesgo ni en la forma de integrarlos.

En nuestra propuesta se ha elegido un método de medida para cada uno de los tres factores con el propósito de integrarlos y ofrecer un solo valor del riesgo ergonómico asociado a una tarea.

La *manipulación manual de cargas* la medimos con el método NIOSH-equation (National Institute for Occupational Safety and Health) [10].

Los riesgos relacionados con los *movimientos repetitivos* se miden mediante el método OCRA (Occupational Repetitive Action) [11].

Y los riesgos correspondientes a *carga postural* se miden a través del método RULA (Rapid Upper Limb Assessment) [12].

Para la integración de métodos, se procede así: (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 según dicho factor; (3) se determina el riesgo ergonómico de la tarea $j \in J$, generado por el factor $\phi \in \Phi$, multiplicando el tiempo de proceso de la tarea, t_j , por su categoría $\chi_{\phi,j}$, i.e. $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$; y (4) se determina el riesgo ergonómico agregado (por factores), sumando los riesgos ergonómicos elementales. Asumimos, por tanto, el principio de superposición de factores de riesgo ergonómico.

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: (L1) Aceptable, $1 \leq \chi_{\phi,j} < 2$; (L2) Leve-moderado, $2 \leq \chi_{\phi,j} < 3$; (L3) Alto, $3 \leq \chi_{\phi,j} < 4$; y (L4) Inaceptable, $\chi_{\phi,j} \geq 4$.

La Tabla I recoge las acciones correctoras que recomendamos en función del nivel de riesgo.

Nivel	Descriptor	Acción correctora
L1	Aceptable	Sin acción. No supone dolencia o riesgo al trabajador
L2	Leve-Moderado	Analizar estación. Mejorar estación en plazo corto-medio.
L3	Alto	Analizar y mejorar puesto de trabajo de inmediato. Supervisión médica. Control periódico.
L4	Inaceptable	Modificación radical y de inmediato del puesto de trabajo.

III. MODELO PARA EL EQUILIBRADO DE LÍNEAS CON RIESGO ERGONÓMICO MÍNIMO

Se presenta un modelo para el equilibrado de líneas de montaje con las características siguientes: (1) número fijo de estaciones, (2) restricciones de tiempo (tiempo de ciclo) y espacio (área disponible), y (3) minimización del riesgo ergonómico máximo.

El texto que inmediatamente sigue está dedicado a la definición de parámetros y variables del modelo $M - \min \bar{R}(\Phi)$, y a su formulación.

Parámetros:

J	Conjunto de tareas elementales ($j = 1, \dots, J $).
K	Conjunto de estaciones de la línea ($k = 1, \dots, K $).
Φ	Conjunto de factores de riesgo físicos y psíquicos ($\phi = 1, \dots, \Phi $).
t_j	Tiempo de proceso de la tarea $j \in J$ a actividad normal.
a_j	Área lineal requerida por la tarea $j \in J$.
$\chi_{\phi,j}$	Categoría de la tarea $j \in J$ respecto al factor de riesgo $\phi \in \Phi$.
$R_{\phi,j}$	Riesgo ergonómico de la tarea $j \in J$ generado por el factor de riesgo $\phi \in \Phi$: $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$
P_j	Conjunto de tareas precedentes inmediatas de la tarea $j \in J$.
c	Ciclo: tiempo concedido a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.
m	Número de estaciones de trabajo: $m = K $.
A	Área lineal concedida a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.

Variables:

$x_{j,k}$	Variable binaria que adopta el valor 1 si la tarea $j \in J$ se asigna a la estación $k \in K$, y vale 0 en caso contrario.
S_k	Carga de trabajo de la estación $k \in K$, i.e. conjunto de tareas constituyentes de $k \in K$.
R_ϕ	Riesgo ergonómico máximo admisible respecto al factor de riesgo $\phi \in \Phi$ en toda estación $k \in K$ para realizar la carga de trabajo S_k .
$\bar{R}(\Phi)$	Promedio de riesgos ergonómicos máximos del conjunto de factores Φ asociados a la línea.

Formulación: $M - \min \bar{R}(\Phi)$

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

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^{|K|} x_{j,k} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_{j,k} x_{j,k} \leq c \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_{j,k} x_{j,k} \leq A \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$R_\phi - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall \phi \in \Phi \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{|K|} k(x_{i,k} - x_{j,k}) \leq 0 \quad \forall \{i, j\} \subseteq J : i \in P_j \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^{|K|} k \cdot x_{j,k} \leq m \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_{j,k} \geq 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_{j,k} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (9)$$

En el modelo $M - \min \bar{R}(\Phi)$, (1) es la función objetivo que expresa la minimización del promedio de riesgos ergonómicos máximos admisibles para los factores $\phi \in \Phi$; las restricciones (2), asignan

cada tarea a una sola estación; (3) limitan el tiempo de carga de cada estación al tiempo de ciclo; (4) limitan, en cada estación, el área requerida por sus cargas, al área disponible; (5) definen los riesgos máximos admisibles en toda estación y para todo factor $\phi \in \Phi$, a partir de los riesgos generados por las cargas de todas estaciones; (6) establecen las ligaduras de precedencia entre las tareas; (7) limitan la asignación de tareas a un número fijo de estaciones; (8) impiden que haya estaciones vacías; y (9) definen como binarias las variables $x_{j,k}$ de asignación.

IV. ALGORITMOS GRASP PARA EL PROBLEMA

Esta sección recoge las características básicas del procedimiento GRASP aplicado al problema de equilibrado de líneas de montaje de ciclo compatible y minimización del riesgo ergonómico máximo.

A. Preliminares

La complejidad de los problemas de equilibrado de líneas con dimensiones industriales recomienda el uso de procedimientos heurísticos.

En la literatura especializada podemos encontrar numerosas aplicaciones de heurísticas destinadas a la resolución de problemas de equilibrado de líneas mono-objetivo [2] y multi-objetivo [13,14].

En cuanto a la variante del problema que nos ocupa, existen pocas referencias [15,16] al tratarse de un planteamiento reciente; en dichos trabajos, se emplea la Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) para su resolución.

GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) es una metaheurística multiarranque [5,6] provista de dos fases: (1) Fase constructiva de una solución inicial, para la que es usual emplear un procedimiento Greedy no determinista; y (2) Fase de mejora de la solución inicial, cuyo propósito es alcanzar un óptimo local en un vecindario concreto. La aplicación consecutiva de ambas fases recibe el nombre de iteración. Tras ejecutar una serie de iteraciones, GRASP ofrece una solución final, que obviamente es la mejor que resulta entre todas las iteraciones.

La Fase constructiva requiere un procedimiento generador de soluciones con 2 características: ser soluciones aceptables respecto a la función objetivo y ser soluciones representativas de diversas regiones del espacio a explorar.

Para garantizar la diversidad de soluciones suele emplearse el azar, de forma que, en una secuencia de decisiones vinculada a una solución parcial, las alternativas elegibles, entre una lista restringida de candidatas, RCL , se someten a un sorteo. La lista RCL puede contener todas las alternativas posibles o una selección de ellas atendiendo a los mejores valores respecto a una función (cota, índice, etc.) en consonancia con la función global que describe el objetivo del problema a resolver.

Resolver un problema de optimización mediante GRASP supone:

- (i) Definir el procedimiento Greedy y el proceso aleatorio empleado en el proceso de elección entre alternativas candidatas.
- (ii) Definir el vecindario de una solución y la forma de explorarlo.
- (iii) Definir el criterio de final del algoritmo en base al tiempo o al número de iteraciones.

GRASP procede según el esquema de la Figura.5.

1. Inicio_GRASP

2. Para toda iteración ($iter = 1, \dots, Iter_{max}$), Hacer:

2.1. $Sol \leftarrow$ Procedimiento_Greedy (RND)

2.2. $Sol \leftarrow$ Procedimiento_Mejora(Sol)

2.3. $Sol_{Mejor} \leftarrow$ Actualizar (Sol, Sol_{Mejor})

3. Fin_GRASP: Sol_{Mejor}

Fig. 5. Esquema básico del procedimiento GRASP.

B. Fase constructiva: Procedimiento Greedy

En esta fase y para el problema que nos ocupa, se construye progresivamente una secuencia de tareas $\pi(N) = (\pi_1, \dots, \pi_N)$ asignando en cada etapa, asociada con la posición n ($n = 1, \dots, N$) de la secuencia $\pi(N)$, una tarea candidata contenida en las listas restringidas $RCL(n)$.

Inicialmente, las tareas candidatas de $RCL(n)$ deben cumplir dos requisitos: (1) no haber sido asignadas, i.e. no estar en $\pi(n-1) = (\pi_1, \dots, \pi_{n-1})$, y (2) tener asignadas todas sus precedentes, i.e. que todas éstas estén contenidas en $\pi(n-1)$. Por tanto, se cumple: $\forall j \in RCL(n) \Rightarrow P_j \subseteq \pi(n-1)$.

Acto seguido, se evalúan todas las tareas candidatas $j \in RCL(n)$ con el propósito de establecer un orden prioritario en la selección de una tarea en cada etapa. En este trabajo, proponemos que dicha ordenación corresponda al empleo de dos índices de prioridad jerarquizados.

El primer índice se refiere al riesgo ergonómico que genera una tarea $j \in RCL(n)$ más el conjunto de todas sus tareas siguientes F_j^* . Esto es:

$$f_j^{(n)} = \sum_{\phi \in \Phi} t_j \mathcal{X}_{\phi,j} + \sum_{\phi \in \Phi} \sum_{h \in F_j^*} t_h \mathcal{X}_{\phi,h} \quad (10)$$

$$\forall j \notin \pi(n-1) \wedge P_j \subseteq \pi(n-1)$$

El segundo índice (subordinado al primero para deshacer empates) atiende a conseguir secuencias de tareas regulares en riesgo ergonómico. El índice de no-regularidad para el conjunto de factores de riesgo lo definimos así:

$$g_j^{(n)} = \sum_{\phi \in \Phi} \left(t_j \mathcal{X}_{\phi,j} + \sum_{h=1}^{n-1} t_{\pi_h} \mathcal{X}_{\phi,\pi_h} - n \cdot r_{\phi}(J) \right)^2 \quad (11)$$

$$\forall j \notin \pi(n-1) \wedge P_j \subseteq \pi(n-1)$$

donde $r_{\phi}(J)$ es la tasa de riesgo ergonómico del factor $\phi \in \Phi$, para el conjunto de tareas J . Esto es:

$$r_\phi(J) = \frac{1}{|J|} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \chi_{\phi,j} \quad \forall \phi \in \Phi \quad (12)$$

Tras ordenar $RCL(n)$, en orden no creciente según $f_j^{(n)}$ (*ex aequo*, no decreciente según $g_j^{(n)}$), la lista se reduce mediante el factor de admisión Λ , definido como el tanto por ciento de las tareas candidatas que serán sorteadas entre las mejores. De esta forma se obtiene la lista $RCL(n, \Lambda)$ para el proceso de selección; evidentemente, si $\Lambda = 100$ entonces $RCL(n, 100) = RCL(n)$.

En la Figura.6 se detalla la fase constructiva de GRASP para generar una secuencia sin retrasos y regular en riesgo ergonómico.

0. Inicialización:

Leer: $J, r(J), (t_j, \chi_j) \quad \forall j \in J$

Hacer: $n=0, \pi(n) = \{\emptyset\}, N = |J|$

1. Crear el conjunto de tareas candidatas:

$n \leftarrow n+1$

Sea: $RCL(n) = \{j \in J : j \notin \pi(n-1) \wedge P_j \subseteq \pi(n-1)\}$

2. Valorar alternativas:

$\forall j \in RCL(n)$ determinar:

$$f_j^{(n)} = \sum_{\phi \in \Phi} t_j \chi_{\phi,j} + \sum_{\phi \in \Phi} \sum_{h \in F_j^*} t_h \chi_{\phi,h}$$

$$g_j^{(n)} = \sum_{\phi \in \Phi} (t_j \chi_{\phi,j} + \sum_{h=1}^{n-1} t_{\pi_h} \chi_{\phi,\pi_h} - n \cdot r_\phi(J))^2$$

3. Ordenar alternativas:

Sea: $rcl(n) = (j_1, \dots, j_{|RCL(n)|})$ la lista ordenada

se cumple:

$$(f_{j'}^{(n)} > f_j^{(n)}) \vee (f_j^{(n)} = f_{j'}^{(n)} \wedge g_j^{(n)} < g_{j'}^{(n)}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow pos(j, rcl(n)) < pos(j', rcl(n))$$

$$\forall \{j, j'\} \subseteq RCL(n),$$

4. Seleccionar alternativa:

Sea: $pos^* = -\text{int}(-\Lambda \cdot |RCL(n)|) \times RND$

entonces: $j^* = j_{pos^*} \in rcl(n) = (j_1, \dots, j_{|RCL(n)|})$

5. Actualizar:

$$j_n \leftarrow j^* \Leftrightarrow \pi(n) \equiv \pi(n-1) \cup \{j^*\}$$

6. Test de Finalización:

Si $n < N$ Ir a paso 1

Si no, finalizar

Fig. 6. Fase constructiva GRASP de la secuencia de tareas regular en riesgo ergonómico.

La secuencia final de tareas, $\pi(N)$, construida así, es congruente tanto en ligaduras de precedencia como de sucesión y responde al criterio de no

retrasar la acumulación de riesgo ergonómico al final de la línea. A dicho criterio se añade, para desempatar, la minimización de la variación de la tasa del riesgo ergonómico para una línea con una sola estación de trabajo.

A partir de esta secuencia, se pasa al diseño de la línea de producción fijando un número de estaciones $m > 1$.

Dado un número de estaciones m ($m > 1$), para determinar la carga de cada una de ellas en la línea de producción, se procede a la fragmentación de la secuencia $\pi(N)$ en m segmentos que cumplen: (1) ser fragmentos compatibles con el ciclo c de la línea, (2) ser fragmentos constituidos por tareas contiguas de la secuencia, (3) ser fragmentos no vacíos, (4) ser fragmentos disjuntos entre sí, y (5) la unión de todos los fragmentos corresponde al conjunto de tareas J .

C. Fase de mejora local

Como el problema que nos ocupa tiene por objetivo minimizar el mayor riesgo ergonómico presente en alguna estación de la línea, cuando $m > 1$, es necesario recurrir a la mejora local de la solución inicial.

Aquí proponemos una fase de mejora local dividida en 4 etapas, que se ejecutan consecutiva y repetitivamente hasta que ninguna de ellas produce mejora de la mejor solución conseguida. Entre dos soluciones compatibles con el ciclo de la línea, se considera que una es mejor que otra cuando su riesgo ergonómico máximo tiene menor valor, y, en caso de empate, se elige la que presenta un riesgo ergonómico mínimo con mayor valor.

Las etapas de mejora son:

(i) *Descarga*: Sin alterar la secuencia de la solución inicial, mientras haya mejora, se selecciona la estación con mayor riesgo ergonómico y se descarga su última tarea sobre la estación siguiente y, posteriormente, su primera tarea sobre la estación anterior; siempre que no se viole la restricción de ciclo compatible y no se empeore en la descarga el riesgo ergonómico máximo.

(ii) *Recarga*: sin alterar la secuencia de la solución inicial, mientras haya mejora, se selecciona la estación con menor riesgo ergonómico y se carga sobre ella la primera tarea de la estación siguiente y/o la última tarea de la estación anterior; siempre que no se viole la restricción de ciclo compatible y no se empeore en la recarga los riesgos ergonómicos máximo y mínimo.

(iii) *Inserción*: Mientras haya mejora, se selecciona la estación con mayor riesgo ergonómico y, con todas sus tareas y de una en una, primero se ensaya la inserción en alguna estación posterior y luego en alguna anterior; siempre que no se

viole la restricción de ciclo, que todas las tareas precedentes de la insertada estén contenidas en posiciones de la secuencia anteriores al punto de inserción, y que no se empeore el valor del riesgo ergonómico máximo.

- (iv) *Intercambio*: Mientras haya mejora, seleccionar la estación con mayor riesgo ergonómico y, con todas sus tareas, ensayar el intercambio, en primer lugar, con la primera tarea de las estaciones posteriores y, después, con la última tarea de las estaciones anteriores; siempre que (1) no se viole la restricción de ciclo, (2) que las tareas precedentes de las dos intercambiadas estén localizadas en posiciones de la secuencia anteriores a los respectivos puntos que ocupen tras el intercambio, y (3) que el intercambio no empeore el riesgo ergonómico máximo.

V. EXPERIENCIA COMPUTACIONAL

Se realiza una experiencia computacional cuyo objetivo es medir la relación entre el incremento del número de puestos de trabajo y la reducción del riesgo ergonómico máximo. Para ello, se utiliza la instancia #1 vinculada a la línea de la planta de motores de Nissan BCN [16]. En este caso, la demanda diaria es de 270 motores.

La jornada laboral se divide en dos turnos de 8h cada uno, siendo el tiempo efectivo igual a 6h 45' en cada turno, siguiendo el marco legal vigente en la planta de motores [17]. Todo esto supone un tiempo de ciclo $c = 180$ s.

En la línea se ensamblan 9 tipos de motores agrupados en 3 familias según el tipo de vehículo destino: 4x4 (p_1, p_2, p_3); furgonetas (p_4, p_5); y camiones de medio tonelaje (p_6, p_7, p_8, p_9). La demanda diaria está repartida por igual entre los 9 tipos de motor (30 unidades por tipo). El ensamblaje de un motor cualquiera requiere 140 operaciones.

El experimento ofrece 7 configuraciones de línea en base al número de estaciones ($19 \leq m \leq 25$) con el objetivo de minimizar el riesgo ergonómico $\bar{R}(\Phi)$ (promedio de máximos) de la línea. En este trabajo, $\bar{R}(\Phi)$ incluye 3 componentes:

- (i) Manipulación manual de cargas.
- (ii) Movimientos repetitivos.
- (iii) Cargas posturales.

El código compilado de procedimientos GRASP se ha ejecutado en un iMac (Intel Core i7 2.93 Ghz, 8 GB de RAM, MAC OS X 10.6.8).

Con dicho código, para todo valor de m (19 a 25), se han realizado 6 ejecuciones de GRASP (i.e. 42 ejecuciones en total). Las 6 ejecuciones atienden a dos parámetros:

- (i) El número de iteraciones, con dos valores: 1000 y 5000.
- (iv) El factor de admisión Λ , con tres porcentajes:

25%, 50% y 100%.

Las Tablas II, III y IV recogen los resultados sobre los tiempos de ciclo máximo y mínimo (c_{max}, c_{min}) y los riesgos ergonómicos máximo y mínimo ($\bar{R}_{max}, \bar{R}_{min}$) en las siete configuraciones de línea (19 a 25 estaciones) para factores de admisión $\Lambda = 25\%$ (Tabla II), $\Lambda = 50\%$ (Tabla III) y $\Lambda = 100\%$ (Tabla IV). Además, en cada tabla, se muestran los resultados para 1000 y 5000 iteraciones de GRASP, empleando, en promedio, 0.02'' de tiempo de CPU por iteración.

TABLA II
RESULTADOS GRASP PARA 1000 Y 5000 ITERACIONES CON UN FACTOR DE ADMISIÓN $\Lambda = 25\%$ (0.02'' POR ITERACIÓN)

		$m: 19 \leq m \leq 25$						
		19	20	21	22	23	24	25
IT. 1000	c_{max}	180	180	180	179	180	178	170
	\bar{R}_{max}	355	330	315	295	285	270	260
	c_{min}	115	100	90	95	85	85	75
	\bar{R}_{min}	225	258	225	240	225	235	224
IT. 5000	c_{max}	180	180	179	179	176	178	170
	\bar{R}_{max}	355	330	305	295	280	270	260
	c_{min}	115	100	95	95	80	85	75
	\bar{R}_{min}	225	258	261	240	230	235	224

TABLA III
RESULTADOS GRASP PARA 1000 Y 5000 ITERACIONES CON UN FACTOR DE ADMISIÓN $\Lambda = 50\%$ (0.02'' POR ITERACIÓN)

		$m: 19 \leq m \leq 25$						
		19	20	21	22	23	24	25
IT. 1000	c_{max}	180	180	180	180	180	180	180
	\bar{R}_{max}	360	335	316	300	285	270	260
	c_{min}	110	90	90	90	90	90	75
	\bar{R}_{min}	225	215	240	230	215	230	218
IT. 5000	c_{max}	180	180	180	180	180	180	180
	\bar{R}_{max}	355	335	310	300	280	270	260
	c_{min}	115	90	95	90	80	90	75
	\bar{R}_{min}	215	215	235	230	215	230	218

TABLA IV
RESULTADOS GRASP PARA 1000 Y 5000 ITERACIONES CON UN FACTOR DE ADMISIÓN $\Lambda = 100\%$ (0.02'' POR ITERACIÓN)

		$m: 19 \leq m \leq 25$						
		19	20	21	22	23	24	25
IT. 1000	c_{max}	180	180	180	179	180	175	180
	\bar{R}_{max}	360	338	320	300	285	270	260
	c_{min}	115	95	95	95	80	80	65
	\bar{R}_{min}	205	205	210	205	205	205	195
IT. 5000	c_{max}	180	180	180	179	180	175	180
	\bar{R}_{max}	360	335	320	300	285	270	260
	c_{min}	115	100	95	95	80	80	65
	\bar{R}_{min}	205	205	210	205	205	205	195

A partir del análisis de las Tablas II, III y IV, se puede afirmar:

- (i) Con un factor de admisión de tareas candidatas

$\Lambda = 25\%$ en las listas restringidas de tareas, se mejora el riesgo ergonómico máximo al pasar de 1000 a 5000 iteraciones. Concretamente, en las configuraciones con 21 y 23 estaciones, las mejoras respectivas son del 3.28% y 1.79%; lo que supone un valor promedio de mejora igual al 0.72%. El resto de configuraciones de línea no presenta mejora de las soluciones (Tabla II).

- (ii) Con un factor de admisión de tareas candidatas $\Lambda = 50\%$, hay mejora del riesgo ergonómico máximo al pasar de 1000 a 5000 iteraciones con 19, 21 y 23 estaciones: mejoras respectivas del 1.41%, 1.94% y 1.79% con un valor promedio igual al 0.73%. El resto de configuraciones de línea no presenta mejora (Tabla III).
- (iii) Con un factor de admisión $\Lambda = 100\%$, el paso de de 1000 a 5000 iteraciones, sólo produce mejora en la configuración de línea con 20 estaciones en un 0.90% (ver Tabla IV).
- (iv) Los riesgos máximos obtenidos con $\Lambda = 50\%$ son en promedio un 0.92% mejores que los que corresponden al factor de admisión $\Lambda = 100\%$. Esta mejora es monótona en el conjunto de configuraciones de línea concentrándose en $m=19$ (1.41%), $m=21$ (3.29%) y $m=23$ (1.79%).
- (v) En promedio, el riesgo máximo con $\Lambda = 25\%$ es mejor en un 1.62% que el que corresponde a $\Lambda = 100\%$. La mejora se concentra en las configuraciones con un número de estaciones igual a 19 (mejora del 1.41%), 20 (1.52%), 21 (4.92%), 22 (1.69%) y 23 (1.79%).
- (vi) Ni el número de iteraciones ni el valor del factor de admisión Λ propician la reducción del riesgo ergonómico máximo para $m=24$ y $m=25$, cuyos mejores valores son iguales a 270 y 260 e-s, respectivamente, en todas las ejecuciones (ver Tablas II, III y IV).

Por otra parte, con el propósito de contrastar los resultados de GRASP versus PLEM, en la Tabla V se recogen los conseguidos mediante CPLEX v11.0 en un ordenador MacPro (Intel Xeon 3.0 GHz CPU, 2 GB de RAM, Windows XP) con un tiempo de CPU limitado a 2h por ejecución ($19 \leq m \leq 25$), y usando como solución de partida en la ejecución para m estaciones, la mejor solución obtenida en la ejecución anterior para $m-1$ estaciones; salvo en el caso de 19 estaciones, que se ejecuta sin partir de una solución inicial.

TABLA V
RESULTADOS PLEM MEDIANTE CPLEX SOLVER CON TIEMPO DE CPU LIMITADO A 2H POR EJECUCIÓN ADICIONAL

	19	20	$m: 19 \leq m \leq 25$			24	25
			21	22	23		
C_{\max}	180	180	180	180	180	179	175
R_{\max}	350	315	300	285	275	270	255
C_{\min}	115	105	95	90	90	80	65
R_{\min}	250	285	270	260	230	160	195

Atendiendo al riesgo ergonómico máximo, las mejores soluciones ofrecidas por GRASP y por PLEM (estado del arte) se resaltan en negrita en las Tablas II y V. Su comparación nos permite extraer las conclusiones siguientes:

- (i) En promedio, las mejores soluciones de GRASP están a un 2.16% de las mejores soluciones conocidas (PLEM).
- (ii) GRASP alcanza la mejor solución conocida en la configuración de línea con 24 estaciones.
- (iii) En el resto de configuraciones de línea, PLEM siempre superó a GRASP; en concreto, con 19, 20, 21, 22, 23 y 25 estaciones, las respectivas desviaciones porcentuales (S/S^*-1) son: 1.43%, 4.76%, 1.67%, 3.51%, 1.82% y 1.96%

VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Se formula un problema de equilibrado de línea para un número fijo de estaciones con restricciones temporales y espaciales y el objetivo de minimizar la media del riesgo ergonómico máximo originado por diversos factores. La formulación da lugar a un programa lineal entero mixto.

Se propone un procedimiento GRASP para construir secuencias de tareas coherentes con los conjuntos de precedencias y atendiendo a dos reglas de prioridad jerarquizadas en la elección de tareas: (1) seleccionar la tarea que presenta mayor riesgo ergonómico remanente considerando el conjunto de todas sus tareas siguientes, y (2) seleccionar la tarea que minimiza la variación de la tasa de riesgo ergonómico en el recorrido de la línea.

El algoritmo GRASP propuesto está regido por dos parámetros: (1) el número de iteraciones y (2) el factor de admisión de tareas en la lista final de candidatas en el proceso de selección.

Tras la obtención de una secuencia de tareas, se pasa a la configuración de la línea. Para ello, se fija un número de estaciones y se fragmenta la secuencia en tantos segmentos contiguos como estaciones; así quedan asignadas las tareas y definidas las cargas de las estaciones de trabajo.

Después, entra en juego la fase de mejora de soluciones, la cual se divide en 4 etapas: *Descarga* de la estación con mayor riesgo, *Recarga* de la estación con menor riesgo, *Inserción* de tareas desde la estación con mayor riesgo hacia el resto, e *Intercambio* de tareas entre la estación con mayor riesgo y el resto de estaciones.

Se realiza una experiencia computacional con un caso de estudio de una línea de motores de la planta de Nissan en Barcelona. Para el caso, se ha elegido un ejemplar que responde a un plan de demanda diario con 2 turnos de trabajo; la demanda se reparte por igual entre 9 tipos de motores.

La utilidad del experimento está en medir el impacto que produce el incremento del número de estaciones sobre la reducción del riesgo ergonómico

de la línea; dicho riesgo se mide en la estación que presenta peores condiciones.

Se aplican 6 variantes del algoritmo GRASP (en base a las iteraciones y al factor de admisión) sobre el ejemplar elegido, para obtener configuraciones de línea con un número de estaciones comprendido entre 19 y 25. La variante del algoritmo con 5000 iteraciones y un factor de admisión $\Lambda = 25\%$ es la que ofrece siempre mejores resultados.

En promedio, los mejores valores, para el riesgo ergonómico máximo, que ofrecen GRASP y PLEM difieren en un 2.16% (a favor de PLEM), mientras que los tiempos de CPU requeridos son: 0.02'' por iteración, con GRASP, y 2h por ejecución adicional, con PLEM.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración prestada por Nissan Spanish Industrial Operations (NSIO), y al Gobierno Español por la financiación parcial del presente trabajo a través del proyecto PROTHIUS-III: DPI2010-16759, incluyendo fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] M.E. Salveson, *The assembly line balancing problem*, Journal of Industrial Engineering 6, no.3 (1955): 18–25.
- [2] Olga Battaia and Alexandre Dolgui, *A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches*, International Journal of Production Economics 142, no.2 (2013): 259-277.
- [3] Joaquín Bautista and Jordi Pereira, *Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem*, European Journal of Operational Research 177, no. 3 (2007): 2016-2032.
- [4] Alena Otto and Armin Scholl, *Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing*, European Journal of Operational Research 212, no.2 (2011): 277-286.
- [5] Thomas A. Feo and Mauricio GC Resende, *Greedy randomized adaptive search procedures*, Journal of global optimization 6, no. 2 (1995): 109-133.
- [6] Mauricio GC Resende and Celso C. Ribeiro, *Greedy randomized adaptive search procedures: Advances, hybridizations, and applications*, In *Handbook of Metaheuristics*, pp. 283-319. Springer US, 2010.
- [7] Joaquín Bautista, Cristina Batalla and Rocío Alfaro, *Incorporating Ergonomics Factors into the TSALBP*, In *Advances in production management systems. Competitive manufacturing for innovative products and services*. IFIP advances in information and communication technology, pp. 413-420. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [8] Joaquín Bautista, Cristina Batalla, Rocío Alfaro and Alberto Cano, *Extended Models for TSALBP with Ergonomic Risk Constraints*, In *Proceedings of IFAC IFIP IEEE Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control*, pp. 869-874. IFAC, 2013.
- [9] Armin Scholl and Christian Becker, *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*, European Journal of Operational Research 168, no. 3 (2006): 666-693.
- [10] T.R. Waters, S.L. Baron and K. Kemmlert, *Accuracy of measurements for the revised NIOSH lifting equation*, Applied Ergonomics 29, no. 6 (1998): 433-438.
- [11] Daniela Colombini, *Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs. Job Analysis, Ocrá Risk Indices, Prevention Strategies and Design Principles*, Elsevier, 2002.
- [12] Lynn McAtamney and E. Nigel Corlett, *RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders*, Applied Ergonomics 24, no. 2 (1993): 91-99.
- [13] Manuel Chica, Oscar Cordón, Sergio Damas and Joaquín Bautista, *Multiobjective constructive heuristics for the 1/3 variant of the time and space assembly line balancing problem: ACO and random greedy search*, Information Science 180, no. 18 (2010): 3465–3487.
- [14] Manuel Chica, Oscar Cordón, Sergio Damas and Joaquín Bautista, *A Multiobjective GRASP for the 1/3 Variant of the Time and Space Assembly Line Balancing Problem*, In *Trends in Applied Intelligent Systems. Lecture Notes in Computer Science 6098*, pp 656-665. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [15] Joaquín Bautista, Cristina Batalla and Rocío Alfaro, *Ergonomic risk minimisation in assembly line balancing*, In *Book of Abstracts of CIO-ICIEOM-IIIIE 2014*, pp. 60, ISBN: 978-84-617-0923-6, 2014.
- [16] Joaquín Bautista, Cristina Batalla and Rocío Alfaro, *Diseño y equilibrado de líneas de montaje minimizando el riesgo ergonómico*, XXIV Congreso Nacional ACEDE, pp. 1-16, ACEDE, 2014.
- [17] Sara Llovera, Joaquín Bautista, Javier Llovera and Rocío Alfaro, *Tiempo efectivo de trabajo: Un análisis normativo de la Jornada Laboral en el Sector de Automoción*, DOI: 10.13140/2.1.1946.3680, Report number: OPE-WP.2014/06 (<http://hdl.handle.net/2117/24508>), Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.