

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENTO DE ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS

Programa de Doctorado en Administración y Dirección de Empresas

**MÉTODOS PARA LA INCORPORACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO EN
LÍNEAS DE MONTAJE DE PRODUCTOS MIXTOS**

DOCTORANDA:

CRISTINA BATALLA GARCÍA

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTORA POR LA UNIVERSITAT
POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DIRECTORES DE TESIS:

JOAQUÍN BAUTISTA VALHONDO

PEDRO MANUEL RODRIGUEZ MONDELO

Barcelona, Julio de 2015

A lo mejor de mi vida.....

LAIA

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer y dedicar este trabajo a toda mi familia por toda la paciencia que han tenido, el esfuerzo en la lectura e interpretación de la presente tesis, las diversas opiniones, los ánimos y en definitiva, permitirme ser la persona que he sido y en la que me he convertido actualmente.

A mi pareja Dani, por estar siempre a mi lado en las buenas y en las malas; por su comprensión, paciencia y amor, y por ser el pilar principal en todo este camino y darme el apoyo necesario para seguir a delante.

También agradezco a mis directores de tesis, Doctor Joaquín Bautista Valhondo y Doctor Pedro Manuel Rodríguez Mondelo, la confianza depositada en mí, su ayuda, dedicación y orientación pero sobretodo, les agradezco el seguimiento realizado a lo largo de estos años de trabajo.

Gracias también a mis compañeros de trabajo y a las chicas por la ayuda y el apoyo incondicional que han demostrado y en especial a Rocío Alfaro por haber sido una excelente compañera y amiga.

Dar las gracias a Nissan Spanish Industrial Operations (NSIO) por su enorme colaboración y también a PROTHIUS-III, DPI2010-16759 y TIN2014-57497, por financiar el proyecto incluida la financiación EDRF por parte del Gobierno Español.

RESUMEN

En la industria del automóvil es muy común utilizar la misma línea para la fabricación de diversas versiones de un mismo modelo. En la presente tesis nos centraremos en aquellas líneas de montaje donde circulan unidades no idénticas que implican una variación en el uso de recursos así como en el consumo de componentes; hablamos pues, de líneas de montaje de productos mixtos.

Las líneas de montaje de productos mixtos pueden presentar diversos riesgos ergonómicos que afectan tanto a la productividad de los trabajadores como a la propia productividad de la línea. Dichos riesgos se basan en las características del conjunto de tareas necesarias para procesar una unidad de producto, además de otros aspectos como la carga de trabajo o el espacio.

Es por ello, que se propone incorporar el riesgo ergonómico al problema TSALB (Time and Space Constrained Assembly Line Balancing) mediante la incorporación de restricciones. Esta consideración del riesgo ergonómico, definido a partir de las duraciones de las tareas y sus categorías bajo la perspectiva de un factor de riesgo para el operario, da lugar a una nueva familia de modelos denominada TSALBP_erg para el equilibrado de líneas.

Así mismo, en este trabajo se propone un nuevo enfoque para resolver el problema de equilibrado de líneas de montaje teniendo en cuenta, de forma simultánea, atributos temporales, espaciales y ergonómicos. Por otra parte, se analiza y estudia el efecto de las variaciones del riesgo ergonómico y de la composición del plan de demanda.

RESUM

En la indústria de l'automòbil és molt comú utilitzar la mateixa línia per a la fabricació de diverses versions d'un mateix model. En la present tesi ens centrarem en aquelles línies de muntatge on circulen unitats no idèntiques que impliquen una variació en la utilització de recursos així com en el consum de components; parlem doncs, de línies de muntatge de productes mixtos.

Les línies de muntatge de productes mixtos poden presentar diversos riscos ergonòmics que afecten tant la productivitat dels treballadors com a la pròpia productivitat de la línia. Aquests riscos es basen en les característiques del conjunt de tasques necessàries per processar una unitat de producte, a més d'altres aspectes com la càrrega de treball o l'espai.

És per això, que es proposa incorporar el risc ergonòmic al problema TSALBP (Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problems) mitjançant la incorporació de restriccions. Aquesta consideració del risc ergonòmic, definit a partir del temps de les tasques i les seves categories sota la perspectiva d'un factor de risc per a l'operari, dóna lloc a una nova família de models anomenada TSALBP_erg per l'equilibrat de línies.

Així mateix, en aquest treball es proposa un nou plantejament per resoldre el problema de equilibrat de línies de muntatge tenint en compte, de forma simultànea, atributs temporals, espacials i ergonòmics. D'altra banda, s'analitza i estudia l'efecte de les variacions del risc ergonòmic i de la composició del pla de demanda.

ABSTRACT

In automotive industry is very common to use the same line to process different product types. In this thesis we will be focused in those Assembly Lines where different product units are present and which involve different resource uses as well as components consumption; we will work in mixed-products assembly lines.

Assembly Lines with mixed products present different ergonomic risks that can affect to the productivity of workers and lines. Those risks are based on the whole needed tasks for processing a product unit as well as other aspects as the workload or the space.

Due of that, it is proposed to include the ergonomic risk to the problem TSALB (Time and Space Constrained Assembly Line Balancing) by means of the incorporation of constraints. This consideration of ergonomic risk that is defined from the task durations and their categories from the perspective of a risk factor for the operator, leads to a new family of models called TSALBP_{erg}.

Moreover, in this paper we propose a new approach to solve the assembly line balancing problem considering temporal, spatial and ergonomic attributes at once. Moreover, it is analyzed and studied the effect of both ergonomic risk and demand plan variations on the line balancing.

ÍNDICE GENERAL

	III
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	VII
RESUM	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE GENERAL	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS	XXIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA	7
2.1. Ergonomía	7
2.1.1. Preliminares	7
2.1.2. Definiciones	11
2.1.3. Clasificación y tipología	13
2.1.4. Evaluación	15
2.1.5. Ámbito normativo	22
2.2. Equilibrado de líneas de producción y montaje	25
2.2.1. Terminología y clasificación	25
2.2.2. Modelos de referencia	28
2.2.3. Procedimientos de resolución	42
3. EVALUACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO	45
3.1. Preliminares	45

3.2. Métodos de evaluación de referencia	46
3.2.1. RULA	46
3.2.2. OCRA	55
3.2.3. NIOSH	64
3.3. Propuesta de unificación de métodos	72
3.3.1. Modificación método RULA	73
3.3.2. Modificación método OCRA	73
3.3.3. Modificación método NIOSH	74
3.3.4. Unificación final de los métodos RULA, OCRA y NIOSH	74
4. INCORPORACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO AL EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE	77
4.1. Antecedentes	77
4.2. TSALBP_erg: una extensión de la familia TSALBP	81
4.2.1. Conceptos básicos	81
4.2.2. Modelos TSALBP_erg ($F, m, c, A, R_{\phi}^{max}$)	84
4.2.3. Ejemplo ilustrativo	99
4.3. Agregación de tareas elementales en bloques	101
4.3.1. Justificación	101
4.3.2. Modelos de agregación ($M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R_{\phi}^{max})$ y $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R^{med})$).	102
4.4. Experiencia computacional con modelos de agregación	105
4.4.1. Conjunto de datos	105
4.4.2. Evaluación del número de estaciones en función del mix de producción y del Riesgo máximo, R_{ϕ}^{max}	107
4.5. Resumen y conclusiones	112
5. MODELOS DE EQUILIBRADO POR ATRIBUTOS TEMPORALES, ESPACIALES Y ERGONÓMICOS	115
5.1. Antecedentes	115
5.2. Nomenclatura	117
5.3. Funciones de equilibrado	118
5.4. Modelo de factibilidad	122
5.5. Modelos de optimización	123
5.6. Toma de decisiones incorporando afinidad y robustez	125
5.6.1. Definiciones previas	125
5.6.2. Toma de decisiones con robustez y grado de similitud	128

5.7.	Experiencia computacional con equiponderación de discrepancias rectangulares de atributos	130
5.7.1.	Conjunto de datos	130
5.7.2.	Factibilidad de planes de demanda en función de m y R_{ϕ}^{max}	134
5.7.3.	Impacto del Mix de Producción sobre la carga de las estaciones de la línea . . .	136
5.7.4.	Afinidad entre configuraciones de línea ante la variación del Mix de Producción	138
5.7.5.	Configuraciones robustas ante la variación del Mix de Producción	139
5.8.	Resumen y conclusiones	139
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	143
6.1.	Trabajos futuros	145
7.	PUBLICACIONES REALIZADAS	149
7.1.	Publicaciones vinculadas al TSALBP	149
7.1.1.	Artículos	149
7.1.2.	Capítulos de Libro	150
7.1.3.	Congresos	150
7.1.4.	Technical Reports	151
7.2.	Otras Publicaciones.	152
7.2.1.	Artículos.	152
7.2.2.	Capítulos de Libro	152
7.2.3.	Congresos	153
7.2.4.	Technical Reports	155
A.	RESULTADOS EXPERIENCIAS COMPUTACIONALES	157
A.1.	Incorporación del factor ergonómico a la familia TSALBP.	157
A.2.	Modelo extendido al problema TSALBP con restricciones de riesgo ergonómico. . .	158
A.3.	Modelo de equilibrado de líneas de montaje por atributos temporales, espaciales y ergonómicos.	159
	BIBLIOGRAFÍA	199

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Tipología de la familia de modelos TSALBP.	33
3.1. Tabla A (McAtamney y Corlett, 1993).	50
3.2. Tabla B (McAtamney y Corlett, 1993).	53
3.3. Actividad muscular y fuerza (McAtamney y Corlett, 1993).	53
3.4. Puntuación C + D (McAtamney y Corlett, 1993).	54
3.5. Nivel de riesgo (McAtamney y Corlett, 1993).	54
3.6. Clasificación del riesgo denominado “el semáforo”.	58
3.7. Determinación del Ff (Colombini, 1998).	59
3.8. Determinación del Fp (Colombini, 1998).	59
3.9. Determinación del Fc (Colombini, 1998).	60
3.10. Determinación del Fr (Colombini, 1998).	60
3.11. Determinación del Fd (Colombini, 1998).	61
3.12. Valores del índice (Colombini, 1998).	64
3.13. Valores límite de la ecuación NIOSH (Waters et al., 1994).	65
3.14. Cálculo del FM (Waters et al., 1994).	70
3.15. Categorías de las tareas (Waters et al., 1994).	70
3.16. Clasificación del agarre de la carga.	70
3.17. Determinación del factor de agarre (Waters et al., 1994).	71
3.18. Niveles de riesgo (Waters et al., 1994).	71
3.19. Unificación método RULA.	73
3.20. Unificación método OCRA.	74
3.21. Unificación método NIOSH.	74
3.22. Unificación final de Métodos.	76
4.1. Tipología TSALBP_erg.	84
4.2. Riesgo ergonómico.	100
4.3. Composición, por tipo de motor (p_1, \dots, p_9) , de los planes o mixes de producción utilizados.	105

4.4. Conjunto de 36 bloques de tareas de \mathcal{H}_1	106
4.5. Conjunto de 36 bloques de tareas de \mathcal{H}_2	107
4.6. Número de estaciones de trabajo obtenidas para <i>TSALBP-m_erg</i> para los conjuntos \mathcal{H}_1 y \mathcal{H}_2	108
4.7. Número de estaciones de trabajo obtenidas para SALBP-1, TSALBP-m y TSALBP-m_erg, dado el conjunto \mathcal{H}_1 y un riesgo máximo de $465 e - s$	109
4.8. Configuraciones obtenidas con los modelos SALBP-1, TSALBP-m y TSALBP-m_erg, con $c = 180 s$, $A = 400 cm$ y $R^{max} = 360 e - s$, dado el conjunto \mathcal{H}_1 , para el <i>Mix1</i> y 6.	110
4.9. Número de estaciones de trabajo requeridas para el modelo <i>TSALBP-m_erg</i> con un tiempo de ciclo de $180 s$, un área lineal disponible de $400 cm$ y diferentes riesgos ergonómicos máximos R^{max}	111
5.2. Datos correspondientes a los nueve planes de demanda seleccionados.	134
5.3. Planes de demanda ($\#\epsilon$) satisfechos para cada par de valores m y R_ϕ^{max} con $c = 180 s$ y $A = 400 cm$ fijos.	135
5.4. Matriz de satisfactibilidad de los planes de demanda para una configuración de la línea $\hat{\epsilon}$	136
5.5. Configuraciones $\hat{\epsilon} = 1$ y 2 dada por $M_AALB_R(T, A, R)$ considerando $m = 23$, $c = 180 s$, $A = 400 cm$ y $R_\phi^{max} = 360 e-s$	137
5.6. Configuraciones $\hat{\epsilon} = 6$ y 9 dada por $M_AALB_R(T, A, R)$ considerando $m = 23$, $c = 180 s$, $A = 400 cm$ y $R_\phi^{max} = 360 e-s$	138
5.7. Índice de afinidad entre las cuatro configuraciones seleccionadas en la fase previa	138
5.8. Valores de los índice g_1 , g_2 , g_1^{max} y g_2^{max} para los atributos T , A y R mediante las configuraciones más similares (1, 2, 6 y 9).	139
5.9. Configuraciones seleccionadas	140
A.1. Soluciones obtenidas para SALBP-m, TSALBP-m y TSALBP-m-erg	158
A.2. Resultado TSALBP-erg con riesgo 360 para el <i>Mix1</i>	159
A.3. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el <i>Mix1</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 360	160
A.4. <i>Mix1</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 360	160
A.5. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el <i>Mix2</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 360	161
A.6. <i>Mix2</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 360	162
A.7. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el <i>Mix10</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 360	163
A.8. <i>Mix10</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 360	163
A.9. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el <i>Mix3</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 400	164
A.10. <i>Mix3</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 400	164
A.11. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el <i>Mix12</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 400	165
A.12. <i>Mix12</i> con $m = 23$ y <i>Riesgo</i> 400	165

A.13. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el *Mix18* con $m = 23$ y *Riesgo* 400 166

A.14. *Mix18* con $m = 23$ y *Riesgo* 400 167

A.15. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el *Mix6* con $m = 23$ y *Riesgo* 440 167

A.16. *Mix6* con $m = 23$ y *Riesgo* 440 168

A.17. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el *Mix9* con $m = 23$ y *Riesgo* 440 169

A.18. *Mix9* con $m = 23$ y *Riesgo* 440 169

A.19. Variables binarias $(x_{j,k})$ para el *Mix11* con $m = 23$ y *Riesgo* 440 170

A.20. *Mix11* con $m = 23$ y *Riesgo* 440 170

A.21. Factibilidad entre los 9 motores del plan de demanda estableciendo 4 número de estaciones de trabajo y nueve valores para el riesgo ergonómico. 172

A.22. Matriz de afinidad $R = 360$ versus $R = 360$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 173

A.23. Matriz de afinidad $R = 360$ versus $R = 400$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 173

A.24. Matriz de afinidad $R = 360$ versus $R = 440$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 173

A.25. Matriz de afinidad $R = 400$ versus $R = 360$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 174

A.26. Matriz de afinidad $R = 400$ versus $R = 400$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 174

A.27. Matriz de afinidad $R = 400$ versus $R = 440$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 175

A.28. Matriz de afinidad $R = 440$ versus $R = 360$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 175

A.29. Matriz de afinidad $R = 440$ versus $R = 400$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 175

A.30. Matriz de afinidad $R = 440$ versus $R = 440$ para los 9 *Mix* con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un *Mix* y ε corresponde al propio *Mix*. 176

A.31. Datos de la configuración del *Mix1* versus los 9 mixes con $m = 23$ 177

A.32. Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix1* versus los 9 mixes con $m = 23$. 178

A.33. Datos de la configuración del *Mix2* versus los 9 mixes con $m = 23$ 179

A.34. Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix2* versus los 9 mixes con $m = 23$. 180

A.35. Datos de la configuración del *Mix6* versus los 9 mixes con $m = 23$ 181

A.36. Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix6* versus los 9 mixes con $m = 23$. 182

A.37. Datos de la configuración del *Mix9* versus los 9 mixes con $m = 23$ 183

A.38. Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix9* versus los 9 mixes con $m = 23$. 184

A.39.Sobrecarga de tiempo, área y riesgo ergonómico de los 9 configuraciones más robustas (<i>Mix1</i> , <i>Mix2</i> , <i>Mix6</i> y <i>Mix9</i>) para encontrar los índice g_1 y g_2	185
A.40.Valores de los índice g_1 y g_2 para los atributos T , A y R de las 4 configuraciones más robustas.	185
A.41.Datos de la configuración del <i>Mix1</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	186
A.42.Cálculo de la sobrecarga de la configuración del <i>Mix1</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	187
A.43.Datos de la configuración del <i>Mix2</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	188
A.44.Cálculo de la sobrecarga de la configuración del <i>Mix2</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	189
A.45.Datos de la configuración del <i>Mix6</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	190
A.46.Cálculo de la sobrecarga de la configuración del <i>Mix6</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	191
A.47.Datos de la configuración del <i>Mix9</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	192
A.48.Cálculo de la sobrecarga de la configuración del <i>Mix9</i> versus los 9 mixes con $m = 23$	193
A.49.Sobrecarga de tiempo, área y riesgo ergonómico de los 9 configuraciones más robustas (<i>Mix1</i> , <i>Mix2</i> , <i>Mix6</i> y <i>Mix9</i>) para encontrar los índice g_1 y g_2	194
A.50.Valores de los índice g_1^{max} y g_2^{max} para los atributos T , A y R de las 4 configuraciones más robustas.	194
A.51.Datos correspondientes a los nueve planes de demanda.	198

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Hombre de Vitruvio y Partenón de Atenas.	9
2.2. Localización de las molestias músculo-esqueléticas en % (INSHT, 2011).	17
2.3. Ejemplos de líneas de montaje	26
2.4. Línea de montaje	28
2.5. Línea en U	41
2.6. Problemas de resolución	42
3.1. Posición y ángulos de los brazos (Osmond, 2014).	48
3.2. Posición y ángulos del antebrazo (Osmond, 2014).	48
3.3. Condiciones adicionales del antebrazo (Osmond, 2014).	49
3.4. Posición y ángulos de la muñeca (Osmond, 2014).	49
3.5. Condiciones adicionales de la muñeca (Osmond, 2014).	49
3.6. Condiciones adicionales de la muñeca (Osmond, 2014).	50
3.7. Posición y ángulos del cuello (Osmond, 2014).	51
3.8. Condiciones adicionales del cuello (Osmond, 2014).	51
3.9. Posición y ángulos del tronco (Osmond, 2014).	52
3.10. Condiciones adicionales del tronco (Osmond, 2014).	52
3.11. Posición piernas (Osmond, 2014).	52
3.12. Datos de síntesis At de las tareas repetitivas analizadas (Colombini, 1998).	62
3.13. Cálculo del índice de exposición OCRA (Colombini, 1998).	63
3.14. Localización estándar de levantamiento (EMC, 2014).	66
3.15. Ángulo de asimetría A (Waters et al., 1994).	68
3.16. Vista superior del ángulo de asimetría A (EMC, 2014).	69
4.1. Esquema del sistema H-M como yuxtaposición de puestos de trabajo	79
4.2. Grafo de precedencias. Cada vértice representa una tarea caracterizada por la terna tiempo de proceso (t_j) / área requerida (a_j) y categoría de riesgo asociada a un único factor de riesgo (χ_j).	99
4.3. Solución obtenida para el modelo SALBP-1.	100

4.4. Solución obtenida para el modelo TSALBP-m.	100
4.5. Solución obtenida para el modelo TSALBP-m.erg	101
5.1. Diagrama de toma de decisiones.	129

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La globalización de la economía ha creado la necesidad de establecer un proceso de integración internacional de las sociedades (Ezcurra y Rodríguez-Pose, 2013; Yeung, 2009). Ello nos hace reflexionar sobre los tres grandes focos que deben estar presentes en las empresas para que sus productos sean más competitivos y atractivos frente al resto: Calidad; Tiempo; Coste.

Resulta evidente que para abordar estos tres aspectos estamos obligados a organizar la producción para lograr un fin (producto) mediante un conjunto de medios.

A lo largo de muchos años el concepto de producción se ha visto sujeto a múltiples definiciones (Buffa y Dyer, 1983; Larrañeta y Onieva, 1988; Tersine, 1984) las cuales, concurren en dos puntos fundamentales.

- (1) La producción consiste en satisfacer las necesidades que pueden surgir en una sociedad mediante la creación de un nuevo material o bien, añadiendo un nuevo valor a este material o servicio.

“La palabra producción debe interpretarse en un sentido general de aumento de utilidad de un objeto o servicio. Aunque automáticamente ligamos la fabricación de un objeto, como un automóvil o un televisor, con producción, casi todas las actividades (excepto tal vez los actos de destrucción, como la guerra o el genocidio) pueden llamarse producción. Por ejemplo, el transporte, que puede llevarse a cabo en dos dominios, espacio y tiempo, es producción. Por tanto, podemos agrupar bajo el encabezamiento de producción actividades tan diversas como difusión de noticias, representación de una obra teatral, escritura de un libro y transmisión de electricidad”

[Elmaghraby (1966)]

- (2) Los elementos requeridos para llevar a cabo la producción son los llamados factores de producción.

“La producción es un proceso de transformación (gobernado por los hombres o en cuya realización tienen interés los hombre) en el que ciertas cosas (mercancías o servicios) se integran en un proceso durante el cual pierden su identidad y caduca su anterior forma de ser, mientras que otras cosas (también mercancías o bienes) nacen del proceso. Las primeras se llaman factores de producción, las segundas productos”

[Ragnar (1963)]

Al mencionar estos conceptos surge el denominado sistema productivo, siendo éste, una estructura que permite la especificación y realización de un proceso productivo proporcionando un producto a partir de unos medios económicos, sociales y técnicos, entre otros (Dietrich, 1991).

Esta concepción nos lleva a la gestión del sistema productivo basada en la planificación, demostración, ejecución y control de distintas habilidades capaces de mejorar las actividades. Su evolución se ha visto fragmentada en diversos criterios y concepciones, siendo la estudiada por Companys (1986) la que más se ajusta a los conceptos presentados en ésta tesis.

La clasificación presentada por Companys (1986) permite establecer dos categorías de problemas en función del tipo de decisiones.

La primera categoría se corresponde con el conjunto de decisiones comprendidas al diseño, planificación y construcción del sistema productivo, es decir, a las decisiones de diseño o de medio-largo plazo. La segunda categoría, ésta formada por el conjunto de decisiones asociadas al funcionamiento y control del sistema productivo. Dicho conjunto de decisiones, también llamado dirección de operaciones, son de medio-corto plazo.

Si analizamos la primera categoría, como el diseño productivo de elementos y sistemas, y a la vez, centramos la atención en la distribución en planta del sistema productivo, nos encontramos ante diferentes orientaciones básicas de diseño que son:

- **Orientación a proceso:** el diseño de un sistema productivo orientado a proceso implica que el flujo de materiales, semielaborados y productos a través del sistema, esté condicionado por las localizaciones de los equipos, personal, herramientas y utillajes específicos de cada proceso. Los materiales se desplazan hasta los lugares donde son requeridos por cada proceso específico para ser transformados, paulatinamente, hasta convertirse en productos finales. Un ejemplo significativo de este tipo de sistemas lo encontramos en los talleres abiertos y cerrados donde los productos, distintos o no, pueden seguir diferentes rutas.
- **Orientación a producto:** el sistema productivo es concebido para que todos los productos sigan la misma ruta con un flujo siempre continuo y sin stock intermedio de obra en curso.

El paradigma de este tipo de sistema productivo es la línea de producción y de montaje, siendo éste el entorno en el que se realizarán las investigaciones de nuestra tesis.

- **Proyecto singular:** sistema productivo cuya salida, el producto, es única y especial (estudios, prototipos, etc.). El sistema productivo requerido en este caso contendrá elementos de las dos orientaciones anteriores además de posibles elementos y funciones que supondrán el desplazamiento de los recursos productivos hacia el producto (construcción de puentes, buques, etc.)
- **Orientación híbrida:** las dos primeras orientaciones pueden también combinarse, manteniéndose la esencia de ambas, siendo este hecho perceptible a simple vista. En estas condiciones, dispondremos de talleres y de líneas a la vez (talleres híbridos), cuya integración podrá dar lugar a las células de fabricación, ya sea mediante pequeñas líneas que constituyen partes del proceso y que están vinculadas en taller, o bien, pequeños talleres dispuestos en línea.

Con todo lo expuesto anteriormente y analizada la literatura existente, la presente tesis pretende enfocar las líneas de montaje como un tipo de sistema productivo (orientación a productos) dentro del marco automovilístico. Un sistema productivo en el que tienen lugar aquel conjunto de actividades entre las cuales destacan el ensamblaje del automóvil propiamente dicho y la producción de gran número de piezas que son esenciales para la fabricación de los automóviles.

En este tipo de entorno industrial es de vital importancia establecer una buena estrategia para incrementar la productividad y disminuir los costes. Sin embargo, también deben tenerse en cuenta la mejora de las condiciones laborales con el fin de disminuir las dolencias que puedan sufrir los trabajadores durante su jornada laboral.

En la industria del automóvil aparecen múltiples patologías laborales músculo-esqueléticas y psíquicas a las que están sometidos los trabajadores en sus puestos de trabajo. En efecto, el anuario de estadísticas laborales del MEYSS (2013) notifica que un 71.14 % del total de las enfermedades profesionales se deben a este tipo de patologías.

Estas patologías causadas, entre otros motivos, por la gran cantidad de movimientos repetitivos y rápidos; levantamiento de cargas, tanto para tareas simples como múltiples; posturas forzadas y riesgos psíquicos derivados del estrés y tensión; no han sido considerados en la literatura dentro de la familia de modelos TSALBP (Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problems).

El objetivo primordial que persigue esta investigación es abordar el modelo TSALBP considerando las propias limitaciones del modelo (número de estaciones de trabajo, tiempo estándar asignado a cada estación de trabajo y espacio disponible o área lineal requerida por los materiales y herramientas) con los factores vinculados a la carga física. Dicha carga física será definida como riesgo ergonómico y estará constituida por la duración de la tarea y la categoría con respecto al factor de riesgo para cada uno de los trabajadores.

Dicho objetivo se formula en base a un conjunto de hipótesis que dependen, en gran medida, del marco teórico de referencia. Dichas hipótesis de trabajo se enumeran a continuación.

- (1) La aparición de dolencias vinculadas a la carga física pone de manifiesto que existen ciertos riesgos que deben ser tratados y evaluados.
- (2) La adaptación del puesto de trabajo garantiza el confort y la seguridad del trabajador.
- (3) La incorporación de nuevos empleados en las líneas de montaje de productos mixtos pueden llegar a reducir los riesgos asociados a las tareas que deben realizar cada uno de los trabajadores durante su jornada laboral.
- (4) Los daños físicos y psíquicos dependen en gran medida de la frecuencia y duración de exposición al que se somete el trabajador y éstos, tienen una repercusión económica en los costes indirectos sociales.
- (5) La posibilidad de incorporar limitaciones a los riesgos ergonómicos mejora la productividad.
- (6) Una mejor productividad, fruto de una correcta adaptación del puesto de trabajo, aumenta los beneficios de la empresa y a su vez reduce los costes indirectos.
- (7) Reducir los costes indirectos conlleva beneficios sociales en el ámbito de la salud.

Definidas las hipótesis y el objetivo principal de trabajo que se pretenden alcanzar, se presenta la estructura del contenido de este trabajo de investigación.

En el Capítulo 2, MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA, de la presente tesis se describe los conceptos y fundamentos de los temas principales de esta investigación: la ergonomía y las líneas de montaje.

Los principios de la ergonomía, actúan como marco conceptual para evaluar el entorno laboral al que se encuentran expuestos los trabajadores, estudiando y analizando los factores de riesgo asociados a los TME (Trastornos músculo-esqueléticos). Consecuentemente, en la primera parte de este capítulo de la tesis se define la metodología existente en la literatura para su identificación

y valoración, y poder así, ofrecer soluciones a los problemas propuestos.

La segunda parte de este capítulo consiste en la especificación de los criterios que engloban las líneas de montaje de los sistemas productivos y las diversas configuraciones que pueden tomar. Así mismo, se plantea uno de los inconvenientes que presentan estos sistemas de fabricación de líneas de montaje de productos mixtos como es el equilibrado de líneas. Problema ampliamente estudiado en la literatura y sobre el cuál se han propuesto diferentes variantes, dando lugar a diferentes familias de modelos de optimización, que también serán explicadas en este apartado.

En el Capítulo 3, *EVALUACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO*, se analiza la problemática existente de los métodos ergonómicos y se presenta una unificación subjetiva de tres métodos (RULA, OCRA y NIOSH) para valorar el riesgo global asociado a un puesto de trabajo.

En el Capítulo 4, *INCORPORACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO AL EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE*, se propone un nuevo modelo denominado TSALBP_erg basado en la familia TSALBP incorporando una nueva restricción de riesgo ergonómico capaz de medir las dolencias que sufren los trabajadores durante su jornada laboral.

En el Capítulo 5, *MODELOS DE EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE POR ATRIBUTOS TEMPORALES, ESPACIALES Y ERGONÓMICOS*, se analiza el efecto de los riesgos ergonómicos sobre la productividad de las líneas de modelos mixtos y sobre los trabajadores. Por ello, en este capítulo, se propone un nuevo enfoque para resolver el equilibrado de la línea de montaje considerando simultáneamente atributos temporales, espaciales y ergonómicos. Se estudiará el efecto de las variaciones del riesgo ergonómico y de la composición del plan de la demanda en el equilibrado de la línea mediante un caso de estudio basado en la planta de motores de Nissan en Barcelona.

Finalmente, en el Capítulo 6, *CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS*, se exponen las principales conclusiones extraídas de las diversas experiencias computacionales llevadas a cabo, y se proponen posibles líneas de investigación futuras encauzadas a proseguir la presente tesis.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

A continuación se describen cada uno de los conceptos que atañen a este trabajo de investigación, la ergonomía y las líneas de montaje. Se establecen los inicios de ambos conceptos y su evolución a lo largo de los años así como las diversas clasificaciones y modelos existentes.

2.1. Ergonomía

2.1.1. Preliminares

Aunque las diversas dolencias que se producen en los puestos de trabajo afectan a todo los sectores de ocupación, la industria manufacturera es una de las más destacadas. Si nos preguntásemos el motivo por el cual el rendimiento y la producción de una línea de montaje de productos mixtos puede disminuir, la respuesta que obtendríamos, probablemente, estaría en la alta tensión de carga de trabajo y estrés al que pueden estar sometidos los operarios. La intensidad, monotonía, control, bajo apoyo social, presión, tiempo y espacio, junto con la gran cantidad de movimientos repetitivos y carga postural pueden llegar a ocasionar contracturas musculares que comprimen estructuras nerviosas y vasculares, desarrollando dolores crónicos localizados, en la mayoría de las ocasiones, en las extremidades superiores y en la espalda.

La perspectiva que nos ofrece la historia proporciona una visión, en algunas ocasiones crítica en otras justificada, de la interrelación entre hombre-máquina y cómo estos dos conceptos nacen de forma simultánea.

Si indagamos y analizamos, observamos que durante siglos ha surgido la necesidad de adaptar las diversas herramientas al hombre, pero ¿cuándo podríamos situar realmente el inicio de la ergonomía?

Es bien conocido que el origen de nuestro saber se encuentra en la Grecia clásica, cuando surge un creciente interés por saber las medidas y las proporciones del cuerpo humano. Los griegos aplicaron estudios sobre las proporciones humanas en las esculturas, determinando así, sus cánones.

La ciencia que permitió analizar las relaciones entre las diversas dimensiones corporales es la denominada antropometría, cuyo término proviene del griego *anthropos* (hombre) y *metrikos* (medida). Esta ciencia se encuentra estrechamente relacionada con la ergonomía por ser capaz de crear un entorno de trabajo adecuado, configurando las características geométricas de éstos y reduciendo las dolencias del trabajador (Roebuck *et al.*, 1975).

Gracias a ello, en el siglo V aC, apareció un libro denominado “Kanon” (renombrado “el canon de las siete cabezas”) conteniendo las primeras normas que regulan las proporciones y simetría del cuerpo humano. En él, su autor, Policleto, creó una de sus esculturas más conocidas bajo el nombre de Dorífido (también nombrado como “el lancero”), según la cual, la altura de una persona debía ser igual a siete cabezas.

Otros escultores de la época crearon diversas obras que podrían ser consideradas símbolos de la ergonomía. Entre ellos se encuentra Fidias, autor de la estatua de Zeus, una de las siete maravillas del mundo antiguo, y Mirón, autor del Discóbolo, también conocido como el atleta arrojando un disco.

Sin embargo, no fue hasta la llegada de Marco Vitrubio Polonio en el siglo I aC, cuando se publicó “De Architectura”, obra de 10 volúmenes sobre la arquitectura romana e inspirada en la Grecia clásica. Obra que sirvió de inspiración a muchos artistas del Renacimiento como, por ejemplo, a Leonardo da Vinci, del cuál hablaremos a continuación.

A finales del siglo XV, Leonardo da Vinci (1452-1519) plasmó los principios clásicos de las proporciones humanas de Vitrubio, estudiando los movimientos de los segmentos corporales. Conocido por ser el autor de “Cuadernos de anatomía” y del famoso “Hombre de Vitrubio”, cuya ilustración se fundamenta en una figura humana en dos posiciones superpuestas de brazos y piernas inscrita en un círculo, cuyo centro se encuentra en el ombligo, y un cuadrado, cuyo centro está en los genitales (Figura 2.1), Leonardo fue considerado el precursor directo de la biomecánica moderna (Figura 2.1).

Si analizamos la figura humana de Vitrubio, vemos que la altura del hombre coincide con la amplitud de sus brazos extendidos y que la relación entre su altura (lado del cuadrado) y la altura de su ombligo (radio del círculo) es igual a la razón áurea o número de oro (Φ). Número que fue una

referencia para los matemáticos y artistas de la Grecia clásica y que fue utilizado también en sus construcciones, entre ellas, el templo dórico conocido como Partenón de Atenas (Figura 2.1).



Figura 2.1: Hombre de Vitruvio y Partenón de Atenas.

La razón áurea o número de oro es igual a un número con infinitos decimales (número irracional) y los griegos consideraban que dicha relación era la más agradable a la vista. En la actualidad, dicha relación, se cumple en otras zonas del cuerpo humano como por ejemplo: entre las falanges de nuestras manos y entre la longitud y anchura de nuestra cabeza.

Irrumpiendo en los siglos XVII y XVIII el progreso científico dio lugar a nuevos acontecimientos que pusieron de manifiesto la necesidad de medir la carga de trabajo física y mental de los jornaleros o artesanos originando grandes cambios en la organización del trabajo. Es en el siglo XIX, con la desaparición de pequeños talleres artesanos y la implantación de grandes fábricas, con la Revolución Industrial, cuando se desplazó a los trabajadores a ser simples asalariados como resultado de la automatización de los procesos de fabricación.

Bien es cierto que la Revolución Industrial no sólo introdujo nuevas técnicas de trabajo que originaron la necesidad de adaptar los hombres a las nuevas y complejas máquinas, tal y como defendió Dupine en 1928, mediante la exigencia de ajustar las herramientas al hombre y no el hombre a las herramientas de trabajo; también produjo el brote, para los empresarios, de sus primeros problemas: falta de gestión, organización, incremento de productividad, ambientes estáticos, etc. Así en 1857 apareció en la literatura por primera vez el término ergonomía, de la mano del ingeniero polaco Wojciech Bogumil Jastrzebowski (1799-1882) en su obra "Compendio de Ergonomía o ciencia del trabajo basada en unas verdades tomadas de la naturaleza". Más tarde Frederick Winslow Taylor (1856-1915), ingeniero estadounidense, encontró una relación entre el aumento de la producción y los tiempos de trabajo eliminando los desplazamientos inútiles, limitando los esfuerzos y dando más libertad a los trabajadores para ejercer sus tareas. Su sistema de ideas, también conocido como Taylorismo, era capaz de reducir tiempos y costes de producción mediante la

relación entre energía empleada y los resultados obtenidos.

Dos de los contemporáneos de Taylor fueron los Gilbreths (Frank Bunker Gilbreth (1868-1924) y su mujer Lillian Moller Gilbreth (1878 - 1972)). F. B. Gilbreth, ingeniero mecánico, instauró el denominado diagrama de procesos mediante el estudio de los movimientos y tiempos, establecidos a partir de símbolos que representaban el desarrollo de cada una de las operaciones y las diversas variables de las que dependían el rendimiento en el trabajo. Por su lado, su mujer, psicóloga industrial/organizacional, estudió los factores humanos vinculados al estado físico y mental de los trabajadores. Gracias a ésta y otras investigaciones del momento, se implementó y desarrollo la producción en serie y el trabajo en cadena.

Finalizada la Primera Guerra Mundial (1914-1918) se empezó a tener una creciente preocupación por el individuo y su ambiente de trabajo, acentuando la sensibilización tanto por los aspectos fisiológicos del trabajador, como por el esfuerzo físico, el ruido, el calor, la aceleración de los ritmos, etc.; advirtiéndose, además, de los problemas que originan los turnos superiores a 14 horas consecutivas en fábricas y cómo éstos eran causa de accidentes laborales.

Como consecuencia de todos estos factores y la alta preocupación hacia los trabajadores se consideró que el hombre no era una prolongación de la máquina que utilizaba, sino que formaba un conjunto con ella creando lo que hoy en día conocemos como "sistema hombre-máquina". Concepto que incorpora por un lado el conjunto de factores humanos y, por el otro, los elementos materiales del puestos de trabajo.

Sin embargo, la ergonomía no tuvo un desarrollo importante hasta la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), cuando apareció, en Estados Unidos, la necesidad de una tecnología que fuera capaz de dar respuesta a los problemas del hombre frente a la técnica y al requerimiento de adaptar la tarea al hombre. Este concepto dio lugar al denominado "Human Engineering" junto con, las aptitudes y las limitaciones fisiológicas y psicológicas de las personas, las condiciones ambientales del puesto de trabajo y los diversos cambios de las tareas.

El objetivo del "Human Engineering" era lograr instalar dispositivos técnicos que tuvieran en cuenta las limitaciones del operario, su comportamiento y sus características físicas, para alcanzar una mayor eficacia en el sistema hombre-máquina.

Paralelamente en Europa, y más concretamente en Inglaterra, el profesor K.F. Hywell Murrell (1908-1984) creó el término "Ergonomics", acuñado de la palabra griega "ergon" (trabajo) y "nomos" (leyes); fundando en 1949 la primera Sociedad Nacional de Ergonomía ("Ergonomics Re-

search Society”). Sociedad formada por una agrupación de psicólogos, médicos e ingenieros con el fin de poder adaptar el trabajo al hombre.

Posteriormente a todos estos acontecimientos, la psicología entró de lleno en la ergonomía introduciendo conceptos nuevos como estrés, satisfacción laboral, carga mental, etc. En concreto, en 1961 se celebró el I Congreso Internacional de Ergonomía en Estocolmo, donde se trataron importantes temas relacionados con los problemas biotécnicos y biomecánicos del trabajador.

En los últimos años, la actividad ergonómica se ha centrado en el análisis de los factores y problemas influyentes en el desarrollo, seguridad, satisfacción y desempeño de los trabajadores a la hora de realizar su actividad reduciendo así, los posibles riesgos que puedan ocasionarse.

Los avances y el continuo crecimiento de la ergonomía han permitido extender su campo de aplicación a todo nuestro entorno, favoreciendo la creación de diversas entidades capaces de impulsar y desarrollar la investigación científica y tecnológica en éste campo. A continuación relacionamos los años fundacionales de algunas de las entidades ergónomas que han ido apareciendo a lo largo del siglo XX y el siglo XXI:

- 1949. Institute of Ergonomics and Human Factors (IEHF), London.
- 1957. Human Factors and Ergonomics Society (HFES), USA.
- 1958. International Ergonomics Association (IEA), Zurich.
- 1963. Société d’Ergonomie de Langue Française (SELF), France.
- 1989. Asociación Española de Ergonomía (AEE), España.
- 1996. Sociedad Colombiana de Ergonomía (SCE), Colombia.
- 2000. Sociedad de Ergonomistas de México (SEMACE), México.
- 2001. Asociación Chilena de Ergonomía (SOCHERGO), Chile.
- 2002. Unión Latinoamericana de Ergonomía (ULAERGO).
- 2002. Asociación Argentina de Ergonomía (ADEA), Argentina.

2.1.2. Definiciones

En la actualidad, la ergonomía es un tema que merece una atención específica no sólo por el análisis de las condiciones de trabajo necesarias para la mejora de la actividad profesional sino, por el

deber de otorgar al trabajador las herramientas imprescindibles para su desarrollo.

Por este motivo, en todo su proceso evolutivo, han existido diversos estudios e investigaciones que giran alrededor de la etimología del propio término, amplificando y exponiendo diversas definiciones del termino ergonomía. Algunas de ellas son:

“... enfoque científico que nos permitirá cosechar, en beneficio propio y de los demás, los mejores frutos del trabajo de toda la vida con el mínimo esfuerzo y la máxima satisfacción”

[Jastrzebowski (2006)]

“... es el estudio del ser humano en su ambiente laboral”

[Murrell (1969)]

“... interacción entre el hombre y las condiciones ambientales”

[Singleton (1972)]

“... el conjunto de conocimientos científicos relativos al hombre y necesarios para concebir útiles, máquinas y dispositivos que puedan ser utilizados con la máxima eficacia, seguridad y confort”

[Wisner (1998)]

“Ciencia aplicada de carácter multidisciplinar que tiene como finalidad la adecuación de los productos, sistemas y entornos artificiales a las características, limitaciones y necesidades de sus usuarios, para optimizar su eficacia, seguridad y confort”

[AEE]

“Aplicación de las Ciencias Biológicas Humanas para lograr la óptima recíproca adaptación del hombre y su trabajo, los beneficios serán medidos en términos de eficiencia humana y bienestar”

[Organización Internacional del Trabajo (OIT)]

“Ergonomía, conocida también como Human Factors, es la disciplina científica relacionada con la interacción entre los hombres y la tecnología”

[IEA]

“Es la adaptación del trabajo al hombre” y “la utilización de conocimientos científicos relativos al hombre y necesarios para concebir herramientas, máquinas y dispositivos que puedan ser utilizados con el máximo de confort, de seguridad y eficacia para el mayor número posible de personas”

[SELF]

“Tecnología que se ocupa de las relaciones entre el hombre y el trabajo”

[Ministerio de Trabajo de España - Plan Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo]

Una vez revisadas algunas de las definiciones del concepto ergonomía en su dilatada historia, consideraremos la definición y los fundamentos presentados por Mondelo *et al.* (1994) como punto de referencia más significativo. Los autores definen la ergonomía como *“ciencia que trata de alcanzar el mayor equilibrio posible entre las necesidades / posibilidades del usuario y las prestaciones / requerimientos de los productos y servicios”*.

A su vez, desprenden tres cuestiones fundamentales:

- (1) *“ que su principal sujeto de estudio es el hombre en interacción con el medio tanto “natural” como “artificial.””*
- (2) *“su estatuto de ciencia normativa”* que pueden presentar propuestas no validables por ser fruto de juicios de valor.
- (3) *“su vertiente de protección de la salud (física, psíquica y social) de las personas.”*

2.1.3. Clasificación y tipología

La ergonomía es una ciencia multidisciplinar que abarca múltiples profesiones favoreciendo su crecimiento científico y cultural. Alguna de estas disciplinas se encargan de diseñar los elementos y herramientas de los puestos de trabajo así como del acondicionamiento ambiental del mismo. En cambio, otras se centran en el estudio de la situación laboral a la que se encuentra sometido el trabajador. A continuación se muestran algunas de estas disciplinas:

- Medicina: abarca los aspectos que describen la salud y la seguridad de los trabajadores en el sistema.
- Anatomía: se ocupa de la estructura y forma del cuerpo humano centrándose en la aplicación antropometría y biomecánica.
- Psicología: examina el comportamiento humano, sus actitudes y los mecanismos partícipes de la percepción y la carga mental.

- Fisiología: trata el funcionamiento de los sistemas fisiológicos del organismo humano.
- Sociología: todas las competencias referidas a los aspectos sociales de la actividad laboral.
- Ingeniería: ciencia que se encarga del diseño de máquinas y equipos de trabajo.
- Psicología: analiza las conductas y comportamientos sociales.

Aun observando el amplio panorama que cubre la ergonomía sobre los factores que contribuyen al desempeño del ser humano (social, cognitivo, físico, etc.), existen divergencias en el momento de presentar su clasificación. En nuestro caso, expondremos la división más clásica y tal vez la más práctica en relación al tema que se aborde en el momento en que se intervenga (Cortés, 2007; De Pablo, 2004; Llana, 2008):

- Ergonomía geométrica: estudia la concordancia entre la persona y las dimensiones de los espacios de trabajo, así como las herramientas y los movimientos necesarios al objeto de trabajo para conseguir un mayor confort y evitar movimientos sobrantes.
- Ergonomía ambiental: analiza el entorno físico del trabajo que pueden afectar a la salud y al confort del trabajador. Podemos encontrar factores físicos como el ruido, la iluminación, humedad, temperatura, etc. y accidentes químicos y biológicos.
- Ergonomía temporal: examina el vínculo existente entre persona y tiempos de trabajo. Estos son, entre otros, el horario, los turnos, tiempo de descanso, pausas, ritmos, etc.
- Ergonomía física: estudia los requerimientos físicos del trabajo preocupándose por las características anatómicas, antropométricas, fisiológicas y biomecánicas humanas.
- Ergonomía cognitiva: se corresponde a los procesos mentales que se derivan del tratamiento de la información (percepción, memoria, razonamiento, etc.) y que pueden afectar a la interacción entre las personas y los componentes del sistema. Uno de sus objetivos es evitar la aparición de fatiga mental y estrés.
- Ergonomía psicosocial: se ocupa de los factores que intervienen en la interacción entre persona y medio como la satisfacción laboral, la comunicación, la motivación y las relaciones humanas en el entorno laboral.
- Ergonomía preventiva: el sistema que debe ser analizado se encuentra en fase de proyecto. Ámbito de la ergonomía que trabaja estrechamente con la seguridad e higiene en las áreas de trabajo. Algunos de sus principales objetivos son el estudio y análisis de las condiciones de trabajo, la salud laboral y el confort laboral.

- Ergonomía correctiva: actúa sobre el sistema ya existente. Radica en descubrir y manifestar los errores del sistema o los posibles factores de riesgo y en el rediseño de los puestos de trabajo.

Por otro lado, la AEE propone una clasificación de la ergonomía a partir de las distintas áreas de especialización en relación al adjetivo multidisciplinar.

- Ergonomía de puestos / ergonomía de sistemas.
- Ergonomía de concepción o ergonomía de corrección.
- Ergonomía geométrica.
- Ergonomía ambiental.
- Ergonomía temporal o cronoergonomía.
- Ergonomía informática: hardware y software.

2.1.4. Evaluación

Todas las definiciones presentadas, así como las clasificaciones, persiguen diversos objetivos, enfocados todos ellos a evitar los posibles daños en la salud, (considerando estos como físicos, mentales y sociales) que puede sufrir un trabajador durante su jornada laboral, garantizando su seguridad, bienestar y mejorando su eficiencia; adaptando y adecuando el trabajo a las capacidades y posibilidades del ser humano, para asegurar la no aparición de alteraciones en la salud, causantes de daño.

Una de las cuestiones que más preocupa en relación a la salud laboral, es el aumento considerable de Trastornos Músculo-Esqueléticos (TME). Este tipo de trastornos aparecen en las actividades laborales sin que el trabajador sea una de las causas independientemente de que estos estén relacionados con el trabajo (Chiasson *et al.*, 2012; Murad *et al.*, 2012).

I. Trastornos Músculo Esqueléticos

Los TME son definidos como el conjunto de alteraciones físicas y funcionales asociadas al aparato locomotor (músculos, tendones, nervios, ligamentos, etc.) originados por sobreesfuerzos, posturas forzadas y movimientos repetitivos durante un tiempo elevado de exposición (Barbe y Barr, 2006).

El trastorno más común que presenta dicha lesión es la aparición de dolor, seguido de una limitación funcional de la zona afectada (principalmente en hombros, cuello, espalda y extremidades

superiores) que disminuye la realización de la tarea con naturalidad.

Según la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (2007), los factores que contribuyen a la aparición de TME son:

- Factores físicos: cargas y/o aplicación de fuerzas, posturas forzadas o estáticas, movimientos repetitivos, entorno de trabajo fríos, vibraciones, iluminación y ruido.
- Factores psicosociales: demandas altas, falta de autonomía, falta de apoyo social, monotonía e insatisfacción laboral.
- Individuales: historia médica, capacidad física, edad, obesidad, tabaquismo y carga doméstica y familiar.

Como ya se ha comentado, los TME relacionados con la actividad profesional son una de las cuestiones más preocupantes en salud laboral. Su elevado desarrollo se ha visto acrecentado en países industrializados, afectando sobre todo, a trabajadores del sector de la minería, agricultura y actividades industriales (electrónica, industria del automóvil, etc.) por encontrarse con trabajos que suponen movimientos repetitivos, ensamblajes, embalajes, transporte de cargas, etc.

La mayor parte de estos TME se convierten en una de las primeras causas de absentismo laboral, reorganización, sustitución del trabajador cuando posee incapacidad temporal, pérdida de productividad y de calidad, entre otros; acarreando a la empresa no sólo unos costes directos sino también, unos costes indirectos producidos por dichas patologías.

En el año 2011 se notificaron en el estado Español 18.121 Enfermedades Profesionales (EP) de las cuales 12.891 eran producidas por TME; factor que representa un altísimo porcentaje sobre el total de estas EP, 71.14 % (MEYSS, 2013).

Es por ello que resulta de vital importancia analizar qué factores de riesgo producen TME y concretamente, cuáles son las zonas del cuerpo más afectadas.

Según el estudio publicado en la VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo, presentado por el Ministerio de Empleo y Seguridad Social junto con el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, 2011), los trabajadores señalan la zona baja de la espalda, la nuca/cuello y la zona alta de la espalda como aquellas zonas del cuerpo donde sufren más molestias o sienten algún TME (ver Figura 2.2).

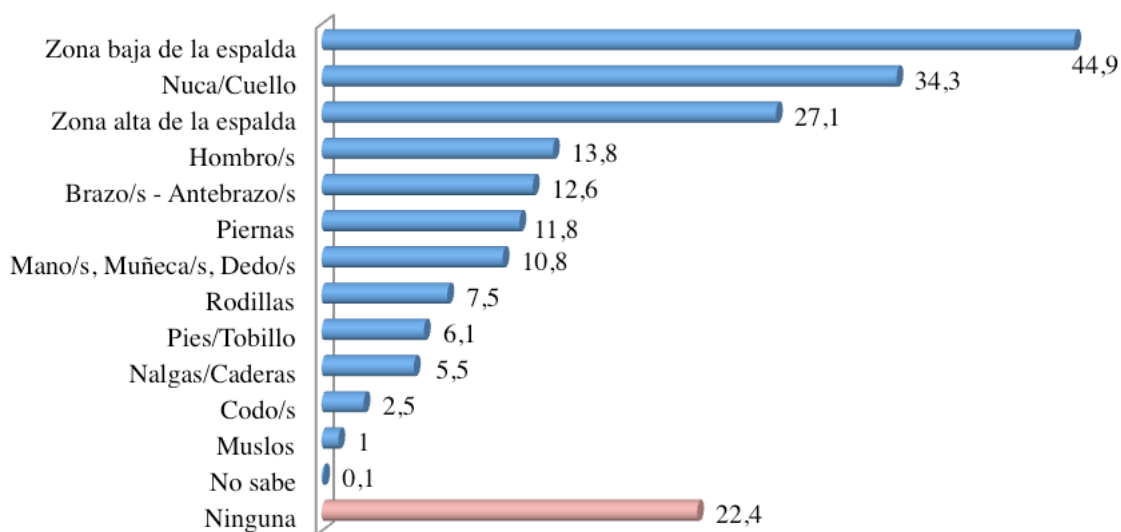


Figura 2.2: Localización de las molestias músculo-esqueléticas en % (INSHT, 2011).

El mismo estudio muestra el sector industrial junto con la agricultura, la construcción y el transporte unido al almacenamiento, como los más afectados por los movimientos repetitivos de manos y brazos (67.5 %, 67 %, 67.3 % y 67.3 % respectivamente); las posturas dolorosas o fatigantes atañen con mayor medida a la actividad de la construcción, la agricultura y la asistencia sanitaria (48.7 %, 48.1 % y 48 % respectivamente) dejando en noveno lugar a la actividad industrial (32.8 %); el levantamiento o movimiento de cargas pesadas afectan principalmente a la construcción, la agricultura y la industria (39.4 %, 33.6 % y 22.8 % respectivamente). Así, podemos corroborar que los trabajos con mayor exigencia física son los más afectados por los TME.

En la industria, a pesar de la automatización y mecanización de los procesos industriales, la carga física es una de las primeras causas de la aparición de TME. Por ello, resulta interesante analizar las incidencias por sobreesfuerzo según la localización anatómica, para poder detectar cuales son las dolencias más específicas que se manifiestan en los trabajadores.

Atendiendo a los resultados presentados por la VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo (INSHT, 2011), la zona del cuerpo con mayor porcentaje de molestias se produce en la zona baja de la espalda con un 41 %, seguido de nuca/cuello con un 28.1 %, y muy de cerca la zona alta de la espalda con un 24.2 %. Con unos porcentajes más reducidos encontramos brazo/s - antebrazo/s con un 15.7 %, hombro/s con el 13.7 % y por último las piernas con un 10.5 %.

El análisis de estos TME pone de manifiesto la necesidad de establecer diversas líneas de actuación para eliminar o disminuir los riesgos que se generan en los puestos de trabajo y, por tanto, mejorar las condiciones de salud de los trabajadores.

Para alcanzar estos objetivos se han desarrollado y dispuesto distintas técnicas de evaluación subjetiva, objetiva y mixta, pudiendo diferenciar entre los métodos directos e indirectos.

II. Métodos directos e indirectos

Los **métodos directos** son aquéllos cuyo objetivo es reunir información del funcionamiento del sistema, la ejecución de la tarea y de la conducta humana, ya sea por medio de elementos de almacenamiento o registro (fotografía, vídeo, etc.), o bien, por la propia observación humana. Todo ello de forma objetiva y basándose en diversas técnicas que permitirán, posteriormente, interpretar los datos obtenidos (Nachemson y Elfström, 1970). Éstos métodos se caracterizan por no alterar ni variar el sistema, por poseer una validación externa y permitir agregar las observaciones que ha obtenido el técnico a la base de datos preexistente.

La interpretación final que se alcanzará mediante estos métodos será el acoplamiento entre los modelos del funcionamiento humano y los datos obtenidos, logrando así, datos cualitativos y cuantitativos medidos simultáneamente y acentuación de los datos subjetivos con la percepción y procesamiento de la información.

Por su parte, los **métodos indirectos**, son aquellos métodos subjetivos que requieren, para su análisis, interactuar con las personas que ejecutan la actividad (cuestionarios, entrevistas, filmaciones, etc.) (Branton y Grayson, 1967).

Éstos métodos no miden la carga de trabajo en sí misma, sino que ponen de manifiesto el grado de dificultad del trabajo y si éste puede ser considerado reprochable; es decir, dan a conocer el desgaste energético pero no miden la carga de trabajo.

En la actualidad encontramos estudios que ofrecen métodos capaces de evaluar, identificar y valorar los factores de riesgo, permitiendo plantear diversas soluciones para situar el riesgo a niveles aceptables para los trabajadores. Algunos de estos estudios han dado lugar a métodos de evaluación ergonómica internacionalmente conocidos y utilizados por ergónomos como herramienta para el rediseño de puestos de trabajo con el fin de prevenir los TME.

En los siguientes párrafos se hace una breve descripción de los principales métodos, existentes en la comunidad científica, para la evaluación de los TME de los trabajadores en el transcurso de su jornada laboral, bajo la perspectiva de la ergonomía.

MÉTODOS DE VALORACIÓN DE CARGA POSTURAL

La carga postural es un trastorno que se produce en el trabajador a lo largo de su jornada laboral, cuando éste adopta posturas forzadas o inadecuadas, como por ejemplo la hiperextensión, la hiperflexión y la hiperrotación osteomuscular, sobrecargando la estructura osteomuscular (Amano *et al.*, 1988; Bernard y Bruce, 1997; Devereux *et al.*, 2004). Dicho factor de riesgo se presenta cuando aparece el daño y surge la denominada enfermedad crónica que es definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como enfermedad de larga duración y de progresión lenta.

Se observa que las demandas físicas relacionadas con los trastornos producidos por carga postural, en la actividad industrial a lo largo del año 2011, según el Ministerio de Empleo y Seguridad Social (MEYSS, 2013) son: estar de pie sin andar 39.8 %, adoptar posturas dolorosas o fatigantes 32.8 % y estar sentado sin levantarse 22.5 %.

Para evaluar todos los factores partícipes del riesgo asociado a la carga postural se han desarrollado diversos métodos (Amano *et al.*, 1988; Bernard y Bruce, 1997; Devereux *et al.*, 2004) que aportan resultados y ámbitos de aplicación diversos. Entre ellos encontramos:

- (1) Rapid Upper Limb Assessment (RULA): consiste en la observación de la actividad del trabajador durante varios ciclos de su tarea. Mediante dicha observación, se determina la carga postural generada dividiendo el cuerpo en dos categorías. La primera de ellas es la que engloba las extremidades superiores (brazo, antebrazo y muñeca) y la segunda, engloba las piernas, tronco y cuello (McAtamney y Corlett, 1993).
- (2) Ovako¹ Working Analysis System (OWAS): observa las diferentes posturas adoptadas por el trabajador durante el transcurso de su tarea y sustenta sus resultados mediante la identificación de 252 posturas diferentes, las cuales son el resultado de combinar la posición de espalda, brazos, piernas y elevación de carga (Karhu *et al.*, 1977).
- (3) Rapid Entire Body Assessment (REBA): es una herramienta de análisis postural que permite una evaluación conjunta de las posiciones adoptadas por los miembros superiores del cuerpo (brazo, antebrazo y muñeca), el tronco, el cuello y las piernas. Esta herramienta también considera la carga, la fuerza manejada, el tipo de agarre y el tipo de actividad muscular desarrollada (Hignett y McAtamney, 2000).

¹La denominación Ovako proviene de la industria privada finlandesa "OVAKO OY" dedicada a la producción de barras y perfiles de acero donde se realizó y desarrolló el método creado por Karhu, O., Kansu, P. y Kuorinka, L.

MÉTODOS DE VALORACIÓN DE MOVIMIENTOS REPETITIVOS

Existe una gran cantidad de trabajadores expuestos al factor de riesgo que ocasionan los movimientos repetitivos, derivados de actividades que entrañan la realización de esfuerzos rápidos y repetitivos en un mismo grupo osteomuscular, generando fatiga, sobrecarga y dolor. Estas patologías generalmente, suelen localizarse en las extremidades superiores como cuello-hombro y mano-muñeca (Byström *et al.*, 1995; Ohlsson *et al.*, 1994).

Cabe señalar que la repetitividad no intervine de forma individual en este tipo de actividades, sino que existen otros factores que están estrechamente ligados, como son:

- Ciclos de trabajo repetitivo: se considera trabajo repetitivo cuando la duración del ciclo de trabajo es inferior a 30 segundos, o bien, cuando se repiten los mismos movimientos, el patrón de fuerzas y las características de los movimientos más del 50 % del tiempo total del ciclo.
- Esfuerzo muscular o uso de fuerza: esfuerzo requerido por el trabajador para realizar una tarea, habitualmente manual, de manera frecuente y prolongada.
- Posturas extremas: se fuerzan las articulaciones de las extremidades superiores durante un período prolongado.
- Tiempo de recuperación insuficiente: no se adecuan períodos de descanso después de la realización de una actividad con movimientos repetitivos permitiendo así, una recuperación.
- Otros factores: herramientas que transmiten vibraciones en manos y muñecas, ambientes fríos, golpes, ritmos inadecuados de trabajo, movimientos bruscos, etc.

Para la industria y según el Ministerio de Empleo y Seguridad Social (MEYSS, 2013), las demandas físicas más habituales en el año 2011, para los trastornos producidos por los movimientos repetitivos, son: con un 67.5 %, la repetitividad de los mismos movimientos de manos o brazos y, con un 15.4 %, la aplicación de fuerzas importantes.

Dado su alto factor de riesgo, existen muchos métodos que miden el nivel de riesgo al que se encuentra expuesto un trabajador durante su jornada laboral, algunos de estos métodos son:

- (1) Occupational Repetitive Action (OCRA): proporciona un resultado orientativo del riesgo generado por movimientos repetitivos de los miembros superiores. El objetivo es alertar sobre posibles TME. Este método centra su estudio en el hombro, mano, muñeca y codo, permitiendo prevenir problemas tales como la tendinitis en hombro y muñeca o el síndrome del túnel

carpiano, descritos como los TME más frecuentes debidos a movimientos repetitivos (Colombini, 1998).

- (2) CHECK-LIST OCRA: es el resultado de la simplificación del método OCRA. Consiste en evaluar de manera rápida el riesgo que sufren los trabajadores en la extremidad superior del cuerpo, a consecuencia de los movimientos repetitivos (Colombini *et al.*, 2002).
- (3) Job Strain Index (JSI): método que analiza si los movimientos repetitivos que se producen en los trabajadores pueden desarrollar TME en las extremidades superiores. Se basa en la medición de seis variables que dan lugar a seis factores multiplicadores de una ecuación que proporciona el JSI. El valor obtenido indica el riesgo de aparición de desórdenes en las extremidades superiores (Bao *et al.*, 2009).

MÉTODOS DE VALORACIÓN DE MANIPULACIÓN MANUAL DE CARGA

Al coexistir tareas que precisan del levantamiento manual de la carga para poder ser ejecutadas, estas actividades conllevan el levantamiento, empuje, agarre, desplazamiento, tracción o colocación de un objeto por parte de un único trabajador o varios trabajadores. Estos factores que implican la manipulación de cargas pesadas así como aquéllas que pueden ser repetidas con frecuencia a lo largo de la jornada y son ejecutadas en circunstancias inadecuadas, están directamente relacionados con la aparición de fatiga física y lesiones músculo-esqueléticas especialmente en la zona dorsolumbar (Marras *et al.*, 1995; Xiao *et al.*, 2004).

Los principales factores de riesgo considerados en las diversas tareas de manipulación son:

- Características de la carga: se tendrá en cuenta el peso, las dimensiones y la facilidad del agarre de la carga.
- Colocación de la carga y postura de manipulación: si las tareas deben ejecutarse con la espalda inclinada o girada, los brazos elevados o alejados del cuerpo, etc.
- Ritmo y organización del tiempo de trabajo: la posibilidad o no de regular el ritmo de la tarea en función de las capacidades físicas del trabajador y los períodos de recuperación en el caso de actividades que suponen un alto consumo energético.
- Condiciones ambientales: los ambientes térmicos del lugar de trabajo (frío / calor), las vibraciones, el ruido y el nivel de iluminación.

Percibimos, según el Ministerio de Empleo y Seguridad Social (MEYSS, 2013), que las demandas físicas más habituales en el año 2011, relacionadas con la manipulación manual de cargas en la

actividad industrial, son levantar o mover cargas pesadas, con un 22.8 %, y levantar o mover personas, con un 0.4 %.

Por este motivo, en aquellos puestos de trabajo donde se haya identificado un posible riesgo debido a la manipulación manual de cargas, será necesario aplicar un método de evaluación específico a fin de establecer si la situación de trabajo puede ser causa de molestias o lesiones en los trabajadores que realizan dicha tarea. Los resultados de la evaluación aportarán también una información valiosa en la posterior propuesta de medidas correctoras, para la eliminación o reducción del riesgo hasta un nivel tolerable.

Diversos investigadores han proporcionado múltiples métodos de evaluación para tareas en las que está implicada la manipulación manual de carga entre los cuales encontramos:

- (1) Ecuación revisada de NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health): esta ecuación permite evaluar las tareas en las que se realizan levantamientos de carga dando como resultado el peso máximo recomendado a levantar por el trabajador para evitar posibles problemas de espalda (NIOSH, 1981).
- (2) Guía técnica para la manipulación manual de cargas del INSHT (GINSHT): esta guía tiene como finalidad facilitar el cumplimiento de la legislación vigente en España para determinar el grado de exposición del trabajador al realizar el levantamiento o transporte de carga (INSHT, 2003).
- (3) Tablas de SNOOK Y CIRIELLO: el objetivo de estas tablas es proporcionar directrices para la evaluación y el diseño de tareas con manipulación manual de cargas sensibles a las limitaciones y capacidades del trabajador reduciendo las posibles lesiones de tipo lumbar (Snook y Ciriello, 1991).
- (4) Método Ergo/IBV: proyecto de investigación desarrollado por el Instituto de Biomecánica de Valencia. En este proyecto se encuentra recopilada información acerca de los TME relacionados con el trabajo y la exposición del trabajador a diversos factores (duración, posturas de trabajo, fuerzas, repetitividad de movimientos de los miembros superiores, etc.) durante la realización de las tareas (IBV, 2007).

2.1.5. Ámbito normativo

La ergonomía ha vivido un largo proceso de creación y desarrollo, que ha marcado el devenir de las diversas normativas que permiten conseguir que los puestos de trabajo sean más seguros y saludables para los trabajadores.

Así, podemos apreciar que a nivel internacional la Organización Internacional de Normalización (ISO/IEC) instaura, en 1975, el comité Técnico 159 llamado “Ergonómico” y, a nivel europeo en 1987, el Comité Europeo de Normalización (CEN) crea el comité técnico Número 122 cuya función es gestionar únicamente temas ergonómicos. Dicho comité técnico ha permitido, junto con sus diferentes grupos de trabajo y en especial el WG nº4, desarrollar una serie de normativas que tienen por objetivo ser una herramienta para facilitar y armonizar las condiciones de seguridad de las máquinas.

Las principales normas CEN en el campo de la ergonomía (CEN/TC 122/WG) son (CEN, 2013):

- CEN/TC 122/WG 1: antropometría.
- CEN/TC 122/WG 2: principios de diseño ergonómico.
- CEN/TC 122/WG 3: temperatura de la superficie.
- CEN/TC 122/WG 4: biomecánica.
- CEN/TC 122/WG 5: ergonomía de la interacción hombre-sistema.
- CEN/TC 122/WG 6: señales y controles.
- CEN/TC 122/WG 8: las señales de peligro y de la comunicación de voz en entornos ruidosos.
- CEN/TC 122/WG 9: la ergonomía de los equipos de protección personal (PPE).
- CEN/TC 122/WG 11: ergonomía del ambiente físico.

En España, la actividad de normalización se encuentra delegada en la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), creada en 1986 y con sede en Madrid. Asociación que substituye al desaparecido Instituto Español de Racionalización y Normalización (IRANOR) por la incorporación de España a las Comunidades Europeas y al CEN.

En esta asociación se engloban los principios ergonómicos y psicosociales para el diseño de condiciones óptimas de trabajo. En concreto reúne un total de 54 normas UNE (AENOR, 2009) que son revisadas de forma periódica para garantizar su adecuación y acreditación.

En relación a la actividad de la normalización ergonómica de AENOR, ésta se desarrolla mediante el Sub-comité AEN/CTN 81/SC 5. “Ergonomía”, agregado al Comité Técnico de Normalización 81 “Prevención y Medios de Protección Personal y Colectiva en el Trabajo”. El citado Comité Técnico 81, tiene fijados los siguientes Subcomités:

- SC 1: medios de protección personal.
- SC 2: medios de protección colectiva.
- SC 3: seguridad de las máquinas.
- SC 4: agentes químicos.
- SC 5: ergonomía.
- SC 6: vibraciones.

A continuación, se incluyen algunas de las normas UNE-EN sobre ergonomía.

- UNE-EN ISO 11064-1:200: diseño ergonómico de los centros de control. Parte 1: principios para el diseño de los centros de control. (ISO 11064-1:2000).
- UNE-EN ISO 11399:2001: ergonomía del ambiente térmico. Principios y aplicación de las normas internacionales correspondientes. (ISO 11399:1995).
- UNE-EN ISO 15535:2007: requisitos generales para el establecimiento de bases de datos antropométricos. (ISO 15535:2006).
- UNE-EN ISO 6385:2004: principios ergonómicos para el diseño de sistemas de trabajo. (ISO 6385:2004).
- UNE-EN 614-1:2006: seguridad de las máquinas. Principios de diseño ergonómico. Parte 1: terminología y principios generales.
- UNE EN 12464-1:2003: iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: lugares de trabajo en interiores.
- UNE EN ISO 7726:02: ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas.
- UNE-EN ISO 9241-110:2006: ergonomía de interacción persona-sistema. Parte 110: principios de diálogo (ISO 9241-110:2006).

La cultura del mundo occidental en la que nos encontramos inmersos, persigue la idea de evitar todas las posibles lesiones y enfermedades que puedan presentar los diversos lugares de trabajo. Por ello, en España, se presenta la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (LPRL) 31/1.995, de 8 de noviembre, acompañada del Reglamento de los Servicios de Prevención, que se establece en el Real Decreto 39/1.997, de 17 de enero.

Ambas disposiciones legales, se acompañan de numerosos Reales Decretos correspondientes a disposiciones mínimas para proteger al trabajador de cada riesgo profesional.

Algunos de estos Reales Decretos, que tienen una clara referencia a los factores ergonómicos, son:

- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 487/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la manipulación manual de cargas que entrañe riesgos, en particular dorsolumbares, para los trabajadores.
- Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de los equipos de protección individual.

Por último, destacar que la ergonomía es una ciencia en constante crecimiento, que no sólo abarca un único campo de aplicación, el laboral, sino que se ha extendido a todo nuestro entorno. Por ello, posiblemente, en los próximos años, observemos cómo la ergonomía se extiende a campos a los que ni siquiera prestamos atención.

2.2. Equilibrado de líneas de producción y montaje

2.2.1. Terminología y clasificación

Existen en la actualidad historiadores que ponen en duda si Henry Ford fue realmente el iniciador de las denominadas líneas de montaje en el sector automovilístico (Mortimore y Barrón, 2005). Bien es cierto que en 1901 Henry Ford instauró una cadena de montaje constituida por unas correas de transmisión y guías de deslizamiento que transportaban, de forma automática, los chasis del automóvil hasta los diversos puestos de trabajo donde los operarios realizaban las operaciones requeridas, obteniendo, al final de la cadena, una unidad totalmente terminada. Con este método conocido como “fordismo” los trabajadores eran asignados a una tarea específica, induciendo una producción estándar y continua, reduciendo costes de fabricación y aumentando la producción (Womack *et al.*, 1991).

Sin embargo, fue durante 1901 y 1907 cuando se ensamblaron los primeros vehículos “Oldsmobile Curved Dash” en una cadena de montaje; modelo del que se produjeron más de 19000 unidades. El fundador de dicha cadena, en 1897, fue Ransom Eli Olds, quien inventó un sistema que ofrecía estaciones de trabajo fijas en las que los operarios ejecutaban trabajos repetitivos y sencillos con piezas estandarizadas e intercambiables.

En 1899 Olds vendió la compañía a Samuel Latta Smith (magnate de cobre y madera), quien la trasladó a Detroit y le puso el nombre de “Olds Motor Work”. Samuel Latta Smith se convirtió en presidente de la compañía nombrando a Olds vicepresidente y director general de producto. Finalmente, la compañía, fue adquirida por General Motors en 1908.

La búsqueda del perfeccionismo en el concepto de cadena de montaje y el aumento de las cifras de producción hicieron valer a Henry Ford y su compañía como los impulsores y fundadores reales de las líneas de montaje.

Las mencionadas líneas de producción o montaje (ver Figura 2.3) son configuraciones, habituales en la obtención de productos finales, donde los puestos de trabajo se organizan en función de dicho producto final.

Una línea de montaje se compone de diferentes estaciones de trabajo dispuestas en serie, una detrás de otra, y conectadas por un sistema de transporte que desplaza el producto de una estación a otra, permitiendo el movimiento de los trabajos en curso a velocidad constante.



Figura 2.3: Ejemplos de líneas de montaje

A cada estación de trabajo, asociada a unos equipos de trabajadores y/o robots, se le asigna un subconjunto de tareas, generando así la denominada carga de trabajo de la estación (S_k). Dicha carga de trabajo necesita un tiempo de trabajo estándar para ser completada y, a su vez, este tiempo no puede superar un valor predeterminado denominado tiempo de ciclo (c).

Para poder entender mejor el funcionamiento de las líneas de montaje se procederá a la definición y esquematización de los elementos básicos que caracterizan a las líneas (Bautista, 2008) (ver Figura 2.4).

- Estación: parte elemental y especializada del proceso. La línea queda constituida por un número de estaciones de trabajo, m , dispuestas en serie y/o paralelo, a través de las cuales fluye la obra en curso de un producto.
- Tarea: parte elemental del trabajo. La fabricación de una unidad de producto se divide en un conjunto de tareas.
- Carga de una estación: subconjunto de tareas que se asignan a la estación. Una tarea sólo puede estar asignada a una estación.
- Tiempo de operación: cada tarea requiere un tiempo de operación que depende de las tecnologías de fabricación y de los recursos empleados.
- Tareas precedentes: la tecnología y la propia naturaleza del producto hacen que cada tarea pueda estar vinculada a un conjunto de tareas precedentes inmediatas, las cuales deben finalizar antes de que se inicie la tarea sucesora.
- Tiempo de carga de estación: suma de las duraciones de las tareas asignadas a la estación.
- Tiempo de carga total: suma de tiempos de carga de estación. Trabajo total para completar una unidad de producto.
- Tiempo de ciclo: tiempo concedido a cada estación para realizar su carga de trabajo, sobre cualquier unidad de producto.
- Tasa de producción de la línea: número de unidades de producto que completa la línea por unidad de tiempo.
- Tiempo muerto o improductivo de la estación: diferencia entre ciclo y tiempo de carga.
- Tiempo muerto de la línea: suma de tiempos muertos de estación que se vincula a la ineficiencia de la línea.

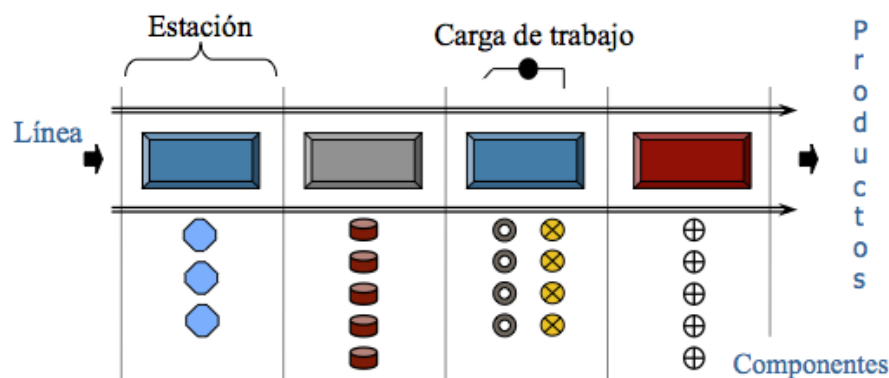


Figura 2.4: Línea de montaje

Los productos que se fabrican en una línea de montaje pueden ser idénticos, similares, o dispares. Así, en función de la tipología de productos que se ensamblen en la línea, ésta puede clasificarse de la siguiente manera:

- Líneas monomodelos (single model line): diseñada para la fabricación de un solo producto o modelo.
- Líneas multimodelo (multimodel line): se fabrican por lotes dos o más modelos sucesivamente (líneas de estampación).
- Líneas modelos mixtos (mixed model line): dos o más modelos se fabrican unidad a unidad (líneas de motores).

En concreto, en esta tesis se estudia el problema de equilibrado en una línea de modelos mixtos.

2.2.2. Modelos de referencia

Uno de los inconvenientes que presentan los sistemas de fabricación en línea de montaje de productos mixtos son la circulación de unidades de productos no idénticos. Ésta variedad de productos implica una variación en el uso de los recursos (trabajadores, herramientas, etc.), así como en el consumo de los componentes. Por este motivo, surge la necesidad de equilibrar una línea de montaje durante su diseño. Obviamente, si hablamos de situaciones reales en el equilibrio de la línea, debemos tener en cuenta tanto las limitaciones tecnológicas como las de gestión. Una amplia clasificación de estos problemas puede consultarse en Battaña y Dolgui (2013) y Boysen *et al.* (2008).

En general, la familia ALBP (Assembly Line Balancing Problem) (Salveson, 1995) trata de agrupar de forma eficiente y coherente las tareas elementales (que pueden corresponder al montaje o desmontaje de un producto: motores, baterías de coches, etc.) en estaciones de trabajo.

En la literatura existente, Baybars (1986) divide la familia ALBP en dos clases:

- (1) Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP)
- (2) General Assembly Line Balancing Problem (GALBP)

Dicho problema ha sido extensamente tratado en la literatura científica existiendo diversas taxonomías recientes sobre el mismo (Battaia y Dolgui, 2013; Becker y Scholl, 2006).

I. SALBP

La familia SALBP tratan de minimizar el tiempo total de inactividad de la estación considerando exclusivamente sólo dos tipos de restricciones de asignación de tareas : (1) las restricciones acumulativas asociadas con el tiempo de trabajo disponible en las estaciones y (2) las restricciones de precedencia que vienen establecidas por el orden en que las tareas deben ser ejecutadas.

Teniendo en cuenta las características mencionadas podemos partir de una serie de hipótesis generales del modelo.

- Una unidad de producto se puede descomponer en un conjunto de tareas elementales.
- Cada tarea tiene asociado un tiempo de proceso determinista (a una actividad concreta o actividad normal).
- Las estaciones están dispuestas en serie.
- A todas las estaciones se les concede el mismo tiempo de ciclo para efectuar las tareas que tienen asignadas (estaciones cerradas).
- Las estaciones requieren recursos tecnológicos y humanos homogéneos con costes similares.

Dentro de la familia SALBP encontramos cuatro modelos básicos, el SALBP-1, SALBP-2, SALBP-E y SALBP-F, todos ellos definidos por diversos parámetros y variables que pueden verse a continuación y cuya extensión puede encontrarse en las Nociones de Equilibrado de Líneas realizadas por Bautista (2008):

Parámetros

J	Conjunto de tareas ($j = 1, \dots, J $).
K	Conjunto de estaciones ($k = 1, \dots, K $).
t_j	Tiempo de proceso de la tarea j ($j = 1, \dots, J $) (a actividad concreta o actividad normal).
P_j, P_j^*	Conjunto de tareas precedentes de la tarea j ($j = 1, \dots, J $) inmediatas y transitivas, respectivamente.
c_{min}, c_{max}	Tiempos de ciclo mínimo y máximo; inversos de las tasas de producción condicionadas por los requerimientos al sistema productivo.
m_{min}, m_{max}	Número mínimo y máximo de estaciones de trabajo; asociados a las limitaciones de los recursos tecnológicos y humanos.

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, m_{max}$), y 0 en caso contrario.
c	Tiempo de ciclo de la línea y concedido a cada estación.
m	Número de estaciones de trabajo que requiere la línea.

MODELOS BÁSICOS

SALBP-1: Modelo cuyo objetivo es minimizar el número de estaciones de trabajo, m , que se requieren para llevar a cabo el proceso, dado un tiempo de ciclo máximo, c_{max} , (o tasa de producción) para cada estación.

$$\text{Min } z_1 = m \quad (2.1)$$

Sujeto a:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \leq c_{max} \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.4)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.5)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.6)$$

En el modelo, la función (2.1) minimiza el número de estaciones de trabajo, m . La restricción (2.2) permite determinar la última estación de trabajo no vacía. La restricción (2.3) limita que la suma de tiempos de las tareas elementales asignadas a cada estación de trabajo no exceda el tiempo de ciclo establecido. El conjunto de restricciones (2.4) fuerza que cada operación sea asignada a una única estación de trabajo. Con la restricción (2.5) se establecen las relaciones de precedencias entre operaciones. Y, finalmente, con el conjunto (2.6) se definen como binarias las variables de asignación de las tareas a las estaciones de trabajo.

SALBP-2: Modelo que, a partir de un número de estaciones de trabajo fijado, minimiza el tiempo de ciclo de la línea de montaje.

$$\text{Min } z_2 = c \quad (2.7)$$

Sujeto a:

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.8)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.9)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.10)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.11)$$

En el modelo, la función (2.7) minimiza el tiempo de ciclo, c , lo que equivale a maximizar la tasa de producción, r , dado un número fijo de estaciones (m_{max}). La restricción (2.8) permite la determinación del tiempo de ciclo en cada estación de trabajo. Por su lado, las restricciones (2.9), (2.10) y (2.11) coinciden con las restricciones (2.4), (2.5) y (2.6) del modelo SALBP-1.

SALBP-E: Modelo que minimiza la relación entre el número de estaciones y el tiempo de ciclo, mc , dado un rango del número de estaciones de la línea [m_{min}, m_{max}].

$$\text{Min } z_E = mc \quad (2.12)$$

Sujeto a:

$$m \geq m_{min} \quad (2.13)$$

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.14)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.15)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.16)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.17)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.18)$$

En el modelo, (2.12) expresa la minimización del producto cm considerando su relación con el tiempo muerto total o la ineficiencia de la línea (obviamente si $m = 1$ la eficiencia será máxima). La restricción (2.13) establece un límite inferior para el número de estaciones de la línea. Las restricciones (2.14) y (2.15) determinan el número de estaciones y el tiempo de ciclo de la línea. Por último, las restricciones (2.16), (2.17) y (2.18) establecen que cada operación sea asignada a una única estación, que se cumplan las relaciones de precedencia entre operaciones y que las variables de asignación sean binarias, respectivamente.

SALBP-F: Modelo basado en encontrar, en caso de que exista, una solución factible para una combinación de la línea dada, con un número máximo de estaciones de trabajo, m_{max} , y un tiempo de ciclo, c_{max} .

Se debe satisfacer:

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.19)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \leq c_{max} \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.20)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.21)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.22)$$

En este caso las restricciones coinciden con las definidas en modelos anteriores.

II. TSALBP

Por otra parte, en la literatura podemos encontrar problemas de equilibrado que, además de considerar factores como son el número de estaciones (m) y el tiempo de ciclo de la línea (c), consideran otros atributos limitantes. Entre estos atributos encontramos el espacio disponible o área lineal requerida (A) por los materiales y herramientas de cada estación de trabajo (Chica *et al.*, 2010, 2011).

Estas nuevas condiciones permiten establecer una nueva familia de problemas de equilibrado de líneas bajo el nombre Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problems (TSALBP) (Bautista y Pereira, 2007). Estos problemas consisten, básicamente, en: dado un conjunto J de tareas con sus atributos temporales t_j y espaciales a_j ($j = 1, \dots, |J|$) y su grafo de precedencias, definido a través de los conjuntos P_j ($j = 1, \dots, |J|$), cada tarea debe ser asignada a una estación única de manera que:

- (1) Ninguna estación requiera mayor área que la disponible.
- (2) Todas las restricciones de precedencia se satisfagan.
- (3) Ningún tiempo de carga de estación sea mayor que el tiempo de ciclo.

Al igual que ocurría con la familia SALBP, en este caso también encontramos diferentes problemas en función del criterio de optimización elegido. En efecto, esta clasificación de problemas puede verse en la Tabla 2.1.

Nombre	m	c	A	Tipo
<i>TSALBP-F</i>	Dado	Dado	Dado	Factibilidad
<i>TSALBP-m</i>	Minimizar	Dado	Dado	Mono-Objetivo
<i>TSALBP-c</i>	Dado	Minimizar	Dado	Mono-Objetivo
<i>TSALBP-A</i>	Dado	Dado	Minimizar	Mono-Objetivo
<i>TSALBP-m/c</i>	Minimizar	Minimizar	Dado	Multi-Objetivo
<i>TSALBP-m/A</i>	Minimizar	Dado	Minimizar	Multi-Objetivo
<i>TSALBP-c/A</i>	Dado	Minimizar	Minimizar	Multi-Objetivo
<i>TSALBP-m/c/A</i>	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Multi-Objetivo

Tabla 2.1: Tipología de la familia de modelos TSALBP.

En primer lugar hallamos el problema de factibilidad TSALBP-F cuyo objetivo es satisfacer las restricciones en cuanto al número de estaciones de trabajo, el tiempo estándar asignado a cada estación de trabajo para procesar cualquier producto y el área disponible.

En segundo lugar encontramos los problemas mono-objetivo que tratan de minimizar el número de estaciones de trabajo, el tiempo de ciclo o el área lineal requerida por las estaciones de trabajo, TSALBP-m, TSALBP-c y TSALBP-A, respectivamente.

Por último, tenemos cuatro problemas multi-objetivo que se centran en minimizar dos de las tres funciones; (1) el número de estaciones de trabajo y el tiempo de ciclo TSALBP-m/c, (2) el número de estaciones de trabajo y el área lineal requerida TSALBP-m/A, (3) el tiempo de ciclo y el área lineal requerida TSALBP-c/A, o bien, (4) las tres funciones a la vez TSALBP-m/c/A.

A continuación, se presenta y describe cada uno de éstos modelos, detallando, previamente, los parámetros y variables implicados en todos ellos.

Parámetros	
J	Conjunto de tareas ($j = 1, \dots, J $).
K	Conjunto de estaciones ($k = 1, \dots, K $).
t_j	Tiempo de proceso de la tarea j ($j = 1, \dots, J $) (a actividad normal).
a_j	Espacio o área lineal requerida por la tarea j .
P_j	Conjunto de tareas precedentes de la tarea j ($j = 1, \dots, J $).
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, m_{max}$), y 0 en caso contrario.
c	Tiempo de ciclo de la línea y concedido a cada estación (considerando una actividad normal).
A	Espacio o área lineal disponible en cada estación de trabajo.
m	Número de estaciones de trabajo que requiere la línea.
m_{max}	Número máximo de estaciones de trabajo.

En los siguientes modelos c , m , A pueden ser variables o parámetros.

MODELO DE FACTIBILIDAD

TSALBP-F: Modelo que comprueba la satisfacción del conjunto de restricciones, dado un tiempo de ciclo establecido², un área máxima disponible por estación y un número máximo de estaciones de trabajo.

²Tiempo calculado a través de la media de tiempos de proceso de todas las tareas, de acuerdo con las proporciones de cada tipo de producto que están presentes en el plan de demanda.

El modelo debe satisfacer.

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.23)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.24)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.25)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.26)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.27)$$

En el modelo, las restricciones (2.23, 2.24) indican que el conjunto de tareas elementales asignadas a cada estación de trabajo no excedan el tiempo de ciclo y el área lineal disponible, respectivamente. Por su lado, las restricciones (2.25), (2.26) y (2.27) coinciden con las restricciones (2.4), (2.5) y (2.6) de los modelos SALBP.

MODELOS MONO-OBJETIVO

TSALBP-m: Modelo de equilibrado de líneas cuyo objetivo es minimizar el número de estaciones, respetando un tiempo de ciclo pre-establecido y un área lineal máxima determinada.

$$\text{Min } z_1 = m \quad (2.28)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.29)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.30)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.31)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.32)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.33)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.34)$$

En el modelo la función (2.28) minimiza el número de estaciones de trabajo, m . La restricción (2.29) determina la última estación de trabajo no vacía. Las restricciones (2.30) y (2.31) limitan el tiempo de carga de trabajo asignada a las estaciones, al tiempo de ciclo, y el espacio requerido, por las tareas asignadas, al área máxima permitida por estación, respectivamente. De nuevo, las restricciones (2.32), (2.33) y (2.34) establecen la asignación de las tareas a una única estación, las precedencias de las operaciones y la condición de binariedad de las variables de asignación.

TSALBP-c: Este modelo asigna las diferentes operaciones, para el montaje de un producto, en un conjunto de m_{max} estaciones conocido, con un espacio máximo permitido, A , y minimizando el tiempo de ciclo de la línea.

$$\text{Min } z_2 = c \quad (2.35)$$

Satisfaciendo:

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.36)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.37)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.38)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.39)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.40)$$

En el modelo la función (2.35) minimiza el tiempo de ciclo. La restricción (2.36) establece el tiempo de ciclo máximo del conjunto de estaciones de trabajo. Y, finalmente, las restricciones (2.37) - (2.40) coinciden con las restricciones (2.31)-(2.34) del modelo anterior, TSALBP-m.

TSALBP-A: Modelo que minimiza el espacio lineal requerido por las estaciones de la línea. En este caso, tanto el tiempo de ciclo como el número de estaciones son un parámetro del modelo y, por tanto, están pre-fijados a priori.

$$\text{Min } z_3 = A \quad (2.41)$$

Satisfaciendo:

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.42)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.43)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.44)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.45)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.46)$$

En el modelo la función (2.41) expresa la minimización del área lineal requerida para cada estación. La restricción (2.42) determina el área máxima requerida, en función de las operaciones que tenga asignadas las estaciones. La restricción (2.43) limita el tiempo de carga de trabajo asignada a las estaciones respecto al tiempo de ciclo establecido. Los conjuntos (2.44)-(2.46) coinciden con las restricciones de modelos anteriores (restricciones (2.25)-(2.27) del modelo TSALBP-F).

MODELOS MULTI-OBJETIVO

TSALBP-m/c: Optimización del número de estaciones y del tiempo de ciclo de la línea, dada un área lineal máxima para las estaciones de trabajo.

$$(\text{Min } z_1 = m) \wedge (\text{Min } z_2 = c) \quad (2.47)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.48)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.49)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.50)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.51)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.52)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.53)$$

El modelo (2.47) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m) y el tiempo de ciclo (c). Las restricciones (2.48) y (2.49) permiten establecer la última estación no vacía y el área requerida máxima requerida por las estaciones, respectivamente. Por su lado, las restricciones (2.50)-(2.53) coinciden con las restricciones (2.31)-(2.34) del modelo anterior, TSALBP-m.

TSALBP-m/A: En este caso, se optimizan, conjuntamente, el número de estaciones de la línea y el área máxima requerida por las dichas estaciones.

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_3 = A) \quad (2.54)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.55)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.56)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.57)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.58)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.59)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.60)$$

En el modelo (2.54) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m) y el área lineal requerida para cada estación (A). Las restricciones (2.55) y (2.56) permiten establecer la última estación no vacía y el área lineal máxima requerida por las estaciones. En cuanto al resto de restricciones, la (2.57) limita el tiempo de carga de trabajo al tiempo de ciclo dado y, el resto, establece la asignación de cada tarea a una única estación, el cumplimiento de las precedencias y la binariedad de las variables de asignación.

TSALBP-c/A: Modelo de equilibrado que minimiza el tiempo de ciclo de la línea y el área lineal máxima requerida por las estaciones de trabajo, dado un número conocido de estaciones, m_{max} .

$$(Min \ z_2 = c) \wedge (Min \ z_3 = A) \quad (2.61)$$

Satisfaciendo:

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.62)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.63)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.64)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.65)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.66)$$

En el modelo, la ecuación (2.61) expresa la minimización simultánea del tiempo de ciclo (c) y el área lineal requerida para cada estación (A). Por su lado, las restricciones coinciden con restricciones de modelos anteriores.

TSALBP-c/m/A: Por último, este modelo optima los tres tipos de atributos considerados en la familia de problemas TSALBP de forma simultánea. Es decir, minimiza el número de estaciones de la línea, el tiempo de ciclo y el área lineal requerida por las estaciones.

$$(\text{Min } z_1 = m) \wedge (\text{Min } z_2 = c) \wedge (\text{Min } z_3 = A) \quad (2.67)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.68)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.69)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.70)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2.71)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (2.72)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (2.73)$$

En el modelo, (2.67) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m), el tiempo de ciclo (c) y el área lineal requerida para cada estación (A). En cuanto a las restricciones, (2.68)-(2.70), establecen el número de estaciones, el tiempo de ciclo y el área lineal requerida. El resto de conjuntos se corresponden con las mismas restricciones en cuanto a la asignación a una única estación de trabajo, las de asignación de tareas de las estaciones de trabajo que satisfagan el conjunto de precedencias y las que requieren que las variables de asignación sean binarias, que en los modelos anteriormente definidos.

III. Otros modelos

GALBP

Respecto a la familia de modelos GALBP (Becker y Scholl, 2006) estos incluyen, además de las restricciones propias de la familia SALBP, restricciones adicionales como: (1) la limitación de la asignación de tareas (Scholl *et al.*, 2010) o (2) la asignación de algunas tareas por bloques (Battaia y Dolgui, 2012).

En efecto, dentro de la familia GALBP podemos encontrar los siguientes tipos de problemas::

- (1) **UALBP (U-line Assembly Line Balancing Problem)**: problemas caracterizados por trabajar con una línea en serie en forma de U (ver Figura 2.5). Algunos de los aspectos a tener en cuenta en este tipo de líneas son la cercanía entre puntos de entrada y de salida del WIP de la línea; la posibilidad de establecer estaciones abiertas; la posibilidad de concentrar los requerimientos de espacio y reducir movimientos; y por último, la comodidad ergonómica ante cambios de ciclo (ver nociones de equilibrado de líneas (Bautista, 2008)).

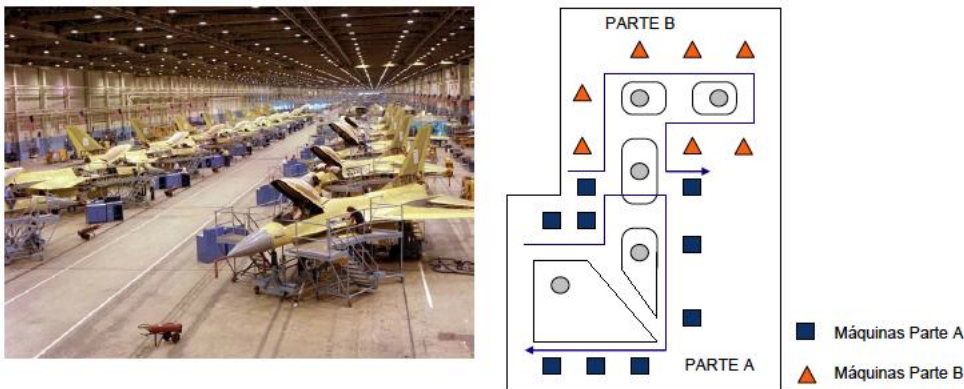


Figura 2.5: Línea en U

- (2) **MALBP (Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem)**: poseen varios modelos de un mismo producto. El modelo ofrece tres tipos de problemas MALBP-1, MALBP-2 y MALBP-3 (Bukchin *et al.*, 2002).
- (3) **RALBP (Robotic Assembly Line Balancing Problem)**: en este tipo de problemas las líneas están completamente robotizadas con el propósito de optimizar la ejecución de las tareas (Rubinovitz *et al.*, 1993).

- (4) **MOALBP (Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem)**: problemas enfocados a la combinación de diversos objetivos a la misma vez como pueden ser, la minimización del número de estaciones o del coste, la maximización de la eficiencia, etc. (Rekiek *et al.*, 2002).

2.2.3. Procedimientos de resolución

Obviamente, la gran diversidad de modelos de equilibrado de líneas existentes en la literatura, ha provocado el uso de muchos y diversos procedimientos de resolución. Una muestra de ello, se recoge en la siguiente figura (2.6), dónde se presenta un esquema de los métodos de resolución más comunes en la literatura.

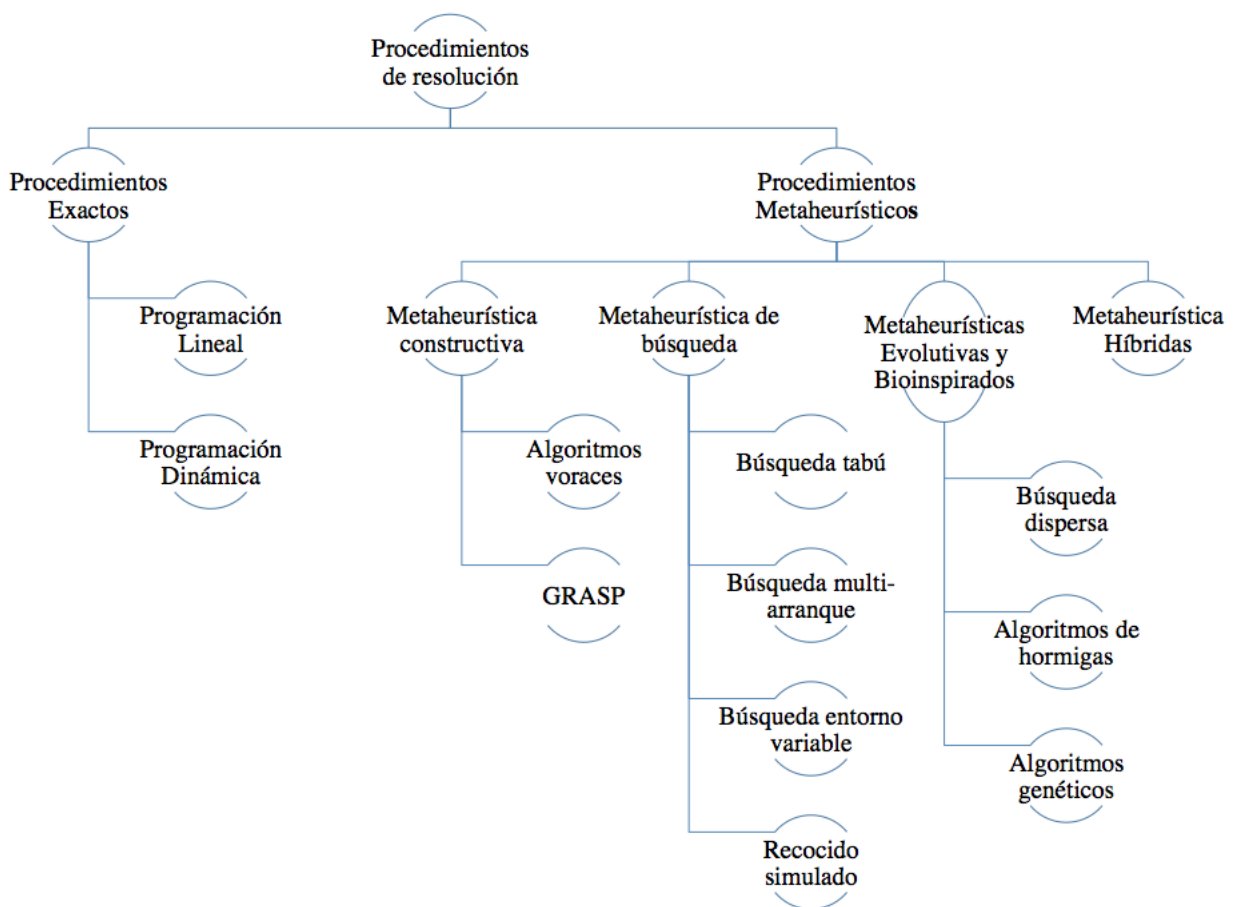


Figura 2.6: Problemas de resolución

Actualmente entendemos como programación lineal el conjunto de procedimientos matemáticos que, mediante ecuaciones lineales, permite optimizar (maximizar o minimizar) una función lineal también conocida como función objetivo.

La función objetivo a maximizar o minimizar esta sujeta a una serie de restricciones que definimos

mediante un sistema de inecuaciones lineales.

Cuando las variables son enteras, se habla de programación lineal entera; cuando las variables pueden ser reales, enteras y binarias se habla de programación lineal entera mixta (MILP; Mixed Integer Linear Programming); y como es sabido, cuando las variables son todas reales se habla, simplemente, de programación lineal.

En nuestro caso las variables pueden ser reales, enteras y binarias, por tanto, emplearemos procedimientos exactos limitando el tiempo de CPU a valores razonables en el entorno industrial. Concretamente, emplearemos la programación lineal entera mixta MILP.

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO

3.1. Preliminares

Resulta obvio pensar que en las líneas de montajes de productos mixtos existen muchas y diversas posturas que pueden perjudicar la salud de los trabajadores (Landau *et al.*, 2008). Pero no sólo debemos analizar las posturas o los movimientos de forma simple y aislada, tenemos que tener en cuenta la importancia relativa de cada uno de los factores y de sus interacciones.

Es peliagudo determinar un único riesgo global en un puesto de trabajo ligado a la suma de los diferentes factores que en él interfieren. Si a este problema le añadimos que cada método de análisis se centra en un aspecto concreto de la valoración ergonómica, aún es más difícil encontrar un escala homogénea universal que determine el factor de riesgo global al cual están sometidos los trabajadores durante su jornada laboral.

En nuestro caso, el primer punto ergonómico a valorar es qué TME (Trastornos Músculo Esqueléticos) se producen en la línea de montaje de productos mixtos y cuáles son los métodos que mejor analizan, estudian y evalúan dichos riesgos.

Patrick G. Dempsey publicó junto a otros investigadores (Dempsey *et al.*, 2005) los métodos más utilizados por los ergónomos. En su estudio, realizado a ergónomos y psicólogos entre otros, con una experiencia en el sector entre los 0 y 21 años, señalaron el método NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health) como el más usado entre los expertos del sector, para la evaluación manual de cargas, siendo su cuota de uso del 83.1 %. Por su lado, señalaron el método RULA (Rapid Upper Limb Assessment) como el más empleado para analizar la carga postural, con un porcentaje de uso de 51.6%; y el método JSI (Job Strain Index) para el análisis de movi-

mientos repetitivos, siendo su ratio de utilización del 39.6 %.

Estudios más recientes (Chiasson *et al.*, 2012) comparan ocho métodos distintos para determinar los factores de riesgo y cómo estos pueden llegar a diferir en el análisis de la misma estación de trabajo demostrando que no existen dos métodos con un acuerdo perfecto.

Analizando estos resultados podríamos decir que existen gran cantidad de métodos ergonómicos pero estos sólo son útiles para evaluar un tipo de tareas específicas.

Sin embargo, en muchas ocasiones, los trabajadores están sujetos a múltiples factores de riesgo que pueden afectar a su carga física. En efecto, en nuestro caso de estudio, las tareas de montaje de piezas de automoción suponen repetitividad en los ajustes de las estructuras, frecuentes giros de tronco y mantenimiento de posición de pie y espalda inclinada con soporte en el movimiento de transporte de piezas (con un peso determinado) que deben ser desplazadas y empujadas. Por ello, es necesario evaluar cada uno de estos factores y, por tanto, deberán emplearse distintos métodos para la evaluación de la carga física asociada al puesto de trabajo.

Uno de los grandes inconvenientes con los que nos encontramos es la falta de unificación de métodos para hallar un único valor de riesgo. Un único método que sea capaz de evaluar tareas en las que se involucren movimientos repetitivos con cargas posturales y exceso de fuerza.

En nuestra investigación obtendremos cuatro niveles de riesgo para cada uno de los modelos seleccionados. De esta manera, posteriormente se unificarán todos ellos, alcanzando una única categoría de riesgo que nos permita dar un único valor asociado a cada una de las tareas involucradas en el proceso de fabricación.

A continuación se exponen y detallan los métodos empleados, así como la unificación creada para la obtención de una clasificación final, entendiéndose que esta ha sido realizada de forma subjetiva.

3.2. Métodos de evaluación de referencia

3.2.1. RULA

Durante la jornada laboral los trabajadores están expuestos a diversos trastornos músculo-esqueléticos como resultado de posturas forzadas, fuerzas aplicadas, trabajos musculares estáticos y movimientos repetitivos.

Lynn McAtamney y E. Nigel Corlett, de la Universidad de Nottingham en Inglaterra, crearon y

desarrollaron el método RULA para evaluar los TME que se generan en las extremidades superiores (McAtamney y Corlett, 1993). Dicho método fue concebido para cumplir las exigencias de la Directiva 90/270/CEE, de 29 de Mayo, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud, relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización (quinta Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE).

El método RULA¹ permite evaluar el riesgo que adquiere el operario durante el ciclo de trabajo, valorando la frecuencia de aparición, la gravedad de la postura adquirida y los esfuerzos requeridos para la realización de la tarea. Para ello pueden utilizarse fotografías, vídeos y mediciones in situ, donde se obtendrán los diversos ángulos que forman las extremidades en cada una de las posturas adoptadas. Así, se utilizan diferentes ítems para analizar y dar una evaluación final de los riesgos que nos podemos encontrar.

RULA divide el cuerpo en dos grandes grupos, el grupo A que incluye los miembros superiores (brazos, antebrazos y muñecas) y el grupo B, que comprende las piernas, el tronco y el cuello.

Para cada uno de los grupos mencionados, el método tiene asociada una tabla donde se asigna una puntuación a cada zona corporal para determinar valores globales. Dicha asignación es obtenida mediante la medición de los ángulos en cada uno de los dos grupos, la actividad muscular ejercida y la fuerza aplicada en el transcurso de la tarea, obteniendo así, una puntuación final. La puntuación obtenida será proporcional al riesgo al que está expuesto el trabajador durante la realización de la tarea.

En los párrafos siguientes, se describen los pasos necesarios para la obtención de las puntuaciones de los dos grupos.

I. Grupo A: Miembros superiores

Brazo: Se medirá el ángulo que forma el brazo con respecto al eje del tronco en las diversas variedades que puede presentar la postura corporal (McAtamney y Corlett, 1993) (ver Figura 3.1).

- Desde 20° de extensión a 20° de flexión: +1 punto
- Extensión mayor a 20° o flexión entre 20° y 45°: +2 puntos
- Flexión entre 45° y 90°: +3 puntos

¹Las tablas y algunas anotaciones se extraen íntegramente del artículo "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders" realizada por los autores McAtamney y Corlett (1993).

- Flexión mayor de 90° : +4 puntos

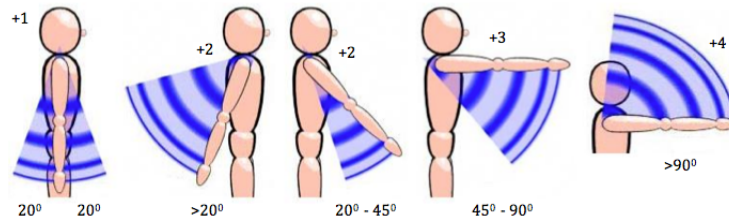


Figura 3.1: Posición y ángulos de los brazos (Osmond, 2014).

La puntuación podrá ser acrecentada o mermada en los siguientes casos:

- Hombro del trabajador este elevado o rotado: +1 punto
- Brazos separados: +1 punto
- Brazo con punto de apoyo: -1 punto

Antebrazo: El valor que se le otorga al antebrazo se obtendrá a partir del ángulo de flexión (McAtamney y Corlett, 1993) (ver Figura 3.2).

- Flexión entre 60° y 100° : +1 punto
- Flexión menor de 60° o mayor de 100° : +2 puntos

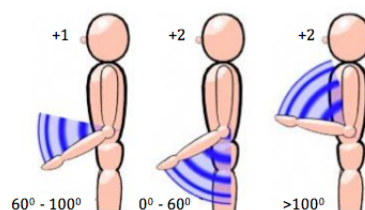


Figura 3.2: Posición y ángulos del antebrazo (Osmond, 2014).

En este caso se añadirán condiciones adicionales (ver Figura 3.3) pudiendo verse incrementada su puntuación cuando :

- La proyección del antebrazo se encuentre más allá de la proyección vertical del codo: +1 punto

¹Todas las figuras que se muestran en el apartado 3.2.1 RULA, se han extraído de la web del grupo Osmond Ergonomics (Osmond Group Limited) (Osmond, 2014).

- El antebrazo cruce la línea central del cuerpo: +1 punto

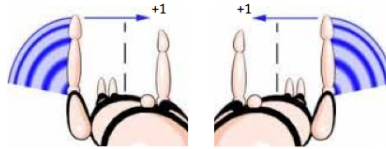


Figura 3.3: Condiciones adicionales del antebrazo (Osmond, 2014).

Muñeca: Se consideraran las tres posiciones que puede adoptar la muñeca en su grado de flexión (McAtamney y Corlett, 1993) (ver Figura 3.4).

- Posición neutra respecto a flexión: +1 punto
- Flexionada o extendida entre 0° y 15° : +2 puntos
- Flexión o extensión mayor de 15° : +2 puntos

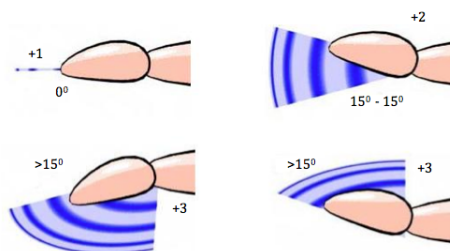


Figura 3.4: Posición y ángulos de la muñeca (Osmond, 2014).

Se acrecentará una unidad su valor en el caso de existir desviación radial o cubital (ver Figura 3.5).

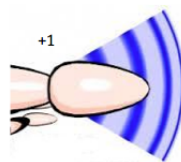


Figura 3.5: Condiciones adicionales de la muñeca (Osmond, 2014).

Finalizada la valoración de la muñeca se sopesará si se produce un giro de la misma y, en caso afirmativo, se aumentara el valor sí:

- Existe pronación o supinación en rango medio: +1 punto

- Existe pronación o supinación en rango extremo: +2 puntos



Figura 3.6: Condiciones adicionales de la muñeca (Osmond, 2014).

Como resultado final y mediante las puntuaciones alcanzadas del brazo, antebrazo, muñeca y giro de ésta, se presenta en la Tabla 3.1 la puntuación global del grupo A, nombrada por los autores como Tabla A.

Brazo	Antebrazo	Muñeca							
		1		2		3		4	
		G. Muñeca		G. Muñeca		G. Muñeca		G. Muñeca	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla 3.1: Tabla A (McAtamney y Corlett, 1993).

II. Grupo B: Cuello, tronco y piernas

Cuello: La puntuación estipulada para el cuello vendrá determinada por su flexión mediante 4 posiciones (McAtamney y Corlett, 1993) (ver Figura 3.7).

- Flexión entre 0° y 10° : +1 punto
- Flexión entre 10° y 20° : +2 puntos
- Flexión mayor de 20° : +3 puntos
- Extendido: +4 puntos

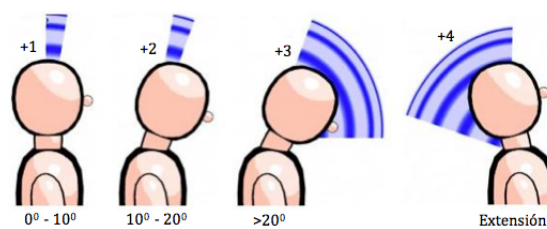


Figura 3.7: Posición y ángulos del cuello (Osmond, 2014).

Se acrecentará su valor si se observa una inclinación lateral o rotación del trabajador:

- Cuello rotado: +1 punto
- Inclinación lateral: +1 punto



Figura 3.8: Condiciones adicionales del cuello (Osmond, 2014).

Tronco: Se valorará si la postura del trabajador en el momento de realizar la tarea es de pie o sentado. En el caso que el trabajador se encuentre en posición de pie se tendrá en cuenta el grado de flexión que adquiera el tronco (McAtamney y Corlett, 1993) (ver Figura 3.9).

- Sentado, bien apoyado y con un ángulo tronco-caderas mayor de 90° : +1 punto
- Flexionado entre 0° y 20° : +2 puntos
- Flexionado entre 20° y 60° : +3 puntos

- Flexionado mas de 60°: +4 puntos

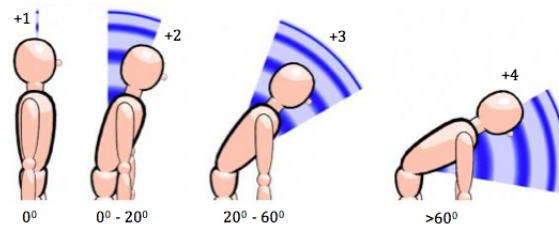


Figura 3.9: Posición y ángulos del tronco (Osmond, 2014).

Dicho valor será incrementado en un punto si se aprecia torsión o inclinación lateral del tronco.



Figura 3.10: Condiciones adicionales del tronco (Osmond, 2014).

Piernas: En el momento de valorar las piernas se tendrá en cuenta si el trabajador está de pie o sentado, si existen apoyos y la distribución del peso (McAtamney y Corlett, 1993) (ver Figura 3.11).

- Sentado y bien apoyado: +1 punto
- Peso simétricamente distribuido y espacio para modificar posición: +1 punto
- Pies no apoyados o peso no distribuido simétricamente: +2 puntos



Figura 3.11: Posición piernas (Osmond, 2014).

Como resultado final y mediante las puntuaciones alcanzadas del cuello, tronco y piernas se presenta en la Tabla 3.2 la puntuación global del grupo B nombrada por los autores como Tabla B.

Cuello	Tronco											
	1		2		3		4		5		6	
	Piernas		Piernas		Piernas		Piernas		Piernas		Piernas	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

Tabla 3.2: Tabla B (McAtamney y Corlett, 1993).

III. Puntuación final

Previo al resultado del nivel de riesgo que se obtendrá como puntuación final, se deberá considerar tanto la fuerza aplicada como la actividad muscular ejercidas durante en transcurso de la tarea (Tabla 3.3), circunstancia que puede incrementar los valores.

Puntuación	Actividad muscular y fuerza
0	Carga o esfuerzo menor a 2 kg intermitentemente
+1	De 2 a 10 kg intermitentemente
+2	De 2 a 10 kg estática o repetitiva
+2	Carga mayor a 10 kg intermitente
+3	Carga mayor a 10 kg estática o repetitiva
+3	Se producen golpes o fuerzas bruscas o repetitivas

Tabla 3.3: Actividad muscular y fuerza (McAtamney y Corlett, 1993).

Para ello, se sumarán los valores obtenidos en el grupo A (Tabla 3.1), con los valores de la actividad muscular y fuerza ejercida (Tabla 3.3), obteniendo una puntuación denominada C. De la misma manera, se obtendrá la denominada puntuación D, que consiste en la suma de los valores obtenidos en el grupo B (Tabla 3.2), con los valores de la actividad muscular y fuerza ejercida (Tabla 3.3). La combinación de las tablas C y D nos darán los diversos valores de riesgo asociados al puesto de trabajo (ver Tabla 3.4).

Puntuación C	Puntuación D						
	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8	5	5	6	7	7	7	7

Tabla 3.4: Puntuación C + D (McAtamney y Corlett, 1993).

A continuación se muestran los cuatro niveles de actuación que presenta el método RULA, que permiten al evaluador determinar si el puesto de trabajo presenta un alto nivel de riesgo, siendo necesaria una rápida actuación, o por el contrario, dicha postura es aceptable.

Número Acción	Puntuación	Actuación
1	1 ó 2	Indica que la postura es aceptable si no se repite o mantiene durante largos períodos.
2	3 ó 4	Indica la necesidad de una evaluación más detallada y la posibilidad de requerir cambios.
3	5 ó 6	Indica la necesidad de efectuar un estudio en profundidad y corregir la postura lo antes posible.
4	7 ó +	Indica la necesidad de una inmediata investigación y modificación.

Tabla 3.5: Nivel de riesgo (McAtamney y Corlett, 1993).

IV. Restricciones del método RULA

Cabe destacar, que el método RULA presenta una serie de limitaciones a la hora de valorar el riesgo ergonómico. Estas limitaciones son, por una parte, la no ponderación temporal de las diferentes posturas o componentes de ciclo de trabajo, lo que no refleja el riesgo agregado a cada tarea de forma individual; y por la otra, la no consideración del tipo de agarre, el esfuerzo generado en una herramienta, la transmisión de vibración, la temperatura del objeto, entre otros, que pueden actuar como factores agravantes de lesiones.

3.2.2. OCRA

El método OCRA fue planteado por Colombini (1998) para evaluar las tareas que acarreaban lesiones en las extremidades superiores a los trabajadores producidas por movimientos repetitivos teniendo en cuenta diversos factores de riesgo como movimientos forzados, frecuencia, inexistencia de períodos de recuperación y otros factores que denominaron adicionales (vibraciones, utilización de guantes, ritmo de trabajo, etc.).

Posteriormente, en el año 2000, se desarrolló una metodología presentada por Colombini *et al.* (2002), que proporcionaba una evaluación rápida del riesgo asociado a los movimientos repetitivos de las extremidades superiores; el método se denominó CHECK-LIST OCRA.

En la actualidad, ambos métodos están integrados dentro la norma UNE-EN 1005-5:2007 (Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 5: Evaluación del riesgo por manipulación repetitiva de alta frecuencia.) y la norma ISO 11228-3:2007 (Ergonomics – Manual handling – Part 3: Handling of low loads at high frequency) que acreditan los resultados que proporcionan.

El método OCRA es considerado un método complejo por su alto requerimiento de formación específica y por la gran variedad de variables que en él aparecen. Está enfocado, en gran parte, a trabajos del sector industrial en los que los movimientos repetitivos y los esfuerzos de los miembros superiores son constantes (industria del metal, fabricación de aparatos eléctricos, automóviles, textil, etc.), y sectores como la pesca y la agricultura.

Para evaluar el riesgo que producen los movimientos repetitivos de las extremidades superiores del cuerpo, a los que está expuesto un trabajador durante su jornada laboral, se calcula el índice de exposición OCRA². Para determinar dicho índice de exposición se estima la relación existente entre el número total de acciones técnicas que se llevan a cabo durante un turno (At) y el número total de acciones técnicas recomendadas un turno (Ar).

$$OCRA = \frac{At}{Ar} \quad (3.1)$$

El At es un dato conocido y obtenido mediante el análisis organizativo, mientras que para el

²Las tablas, figuras, puntuaciones y algunas anotaciones se extraen íntegramente de los artículos "An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs" y "Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs Job Analysis, Ocra Risk Indices. Prevention Strategies and Design Principles" realizada por los autores D. Colombini, E. Occhipinti y A. Grieco.

cálculo de Ar se generará la siguiente fórmula general³.

$$Ar = \sum_{x=1}^n [CF \cdot (Ff \cdot Fp \cdot Fc) \cdot D] \cdot Fr \cdot Fd \quad (3.2)$$

Donde:

Variables	
1,n	Tarea/s con movimientos repetitivos que se producen en las extremidades superiores durante la jornada laboral.
CF	Constante de frecuencia de acción. Es la frecuencia de acciones técnicas por minuto recomendada en condiciones óptimas.
Ff; Fp; Fc	Son factores multiplicativos con valores que oscilan entre 0 y 1, escogidos en relación al comportamiento de los factores riesgo fuerza (Ff), riesgo postura (Fp) y riesgos complementarios (Fc) en cada tarea ejecutadas .
D	Duración de cada tarea repetitiva en minutos.
Fr	Factor multiplicador, con puntuaciones que oscilan entre 0 y 1, seleccionado de acuerdo con el comportamiento durante todo el turno de trabajo del factor de riesgo "falta de tiempo de recuperación".
Fd	Factor multiplicador, con puntuaciones que oscilan entre 0 y 1, seleccionado de acuerdo con el comportamiento durante todo el turno de trabajo del factor de riesgo "falta de tiempo de recuperación".

A partir de los criterios establecidos por Colombini (1998) se determinará el Ar de la siguiente manera:

- Se parte, para cada tarea repetitiva, de una frecuencia máxima recomendada de acciones por minuto ($CF = 30$ acciones / minuto) convirtiéndose en la constante de referencia para cada tarea repetitiva.
- Teniendo en cuenta los riesgos de fuerza, postura y aquéllos denominados complementarios, la frecuencia se ajustará en relación a la presencia de dichos riesgos. Por ello, se suministrarán unas tablas con las diferentes puntuaciones alcanzadas por el factor multiplicador en función de la entidad de los factores de riesgo.

$$\text{Ejemplo: } CF \cdot (Ffi \cdot Fpi \cdot Fci) = a$$

- Cuando se analice la tarea, la frecuencia ponderada alcanzada será multiplicada por el número real de minutos de desarrollo efectivo de cada tarea (Di y Dj).

³Obviamente Ar corresponde a un sumatorio que debería afectar a los factores mediante el subíndice "x". No obstante, aquí hemos preferido respetar la notación de la autora.

Ejemplo: $a \cdot Di; b \cdot Dj$

- Se suman los valores obtenidos para las diferentes tareas (si la tarea repetitiva se considera única este paso no es necesario).

Ejemplo: $(a \cdot Di) + (b \cdot Dj) = p$

- Al valor obtenido en el punto anterior p se le aplicará el factor multiplicador que considera tanto la presencia y secuencia en todo el turno de trabajo de los periodos de recuperación. Se proporcionará una tabla que permitirá la conversión de los datos del análisis a los valores del factor multiplicador.

Ejemplo: $p \cdot Fr = Ar$

- Se aplica el factor multiplicador Fd al valor Ar obtenido, considerando el tiempo total (en minutos) empleado en el turno para realizar tareas repetitivas de las extremidades superiores.

Ejemplo: $Ar \cdot Fd = (Ar)p$

- El valor logrado $(Ar)p$ representará el número total de las acciones recomendadas en el turno de trabajo. Valor determinado mediante la implicación de diferentes factores de riesgo que influyen en el contexto examinado. El dato de cada Ar es el denominador de la fracción del índice sintético de exposición (OCRA) mientras que el numerador es el número total de acciones realmente llevadas a cabo dentro de las tareas repetitivas examinadas (Ae).

$$OCRA = \frac{Ae}{(Ar)p} \quad (3.3)$$

En el caso de que el índice de exposición sea menor o igual a 1 se considerara el riesgo como no significativo o aceptable. Si por el contrario los valores obtenidos son mayores a 1 la exposición será significativa. Resulta idóneo utilizar un sistema razonable de clasificación denominado “el semáforo”; sistema que aplica tres colores, verde, amarillo y rojo (Tabla 3.6); como consecuencia de considerar los valores de las diversas variables integradas en el procedimiento de cálculo del índice como hipótesis que deben ser validadas.

Valores índice	Color	Actuación
= 1	Verde	Situación aceptable.
1-2	Amarillo-Verde	Exposición no relevante para el trabajador sin aparición de TME significativos.

Valores índice	Color	Actuación
2-3	Amarillo-Rojo	Exposición al riesgo no importante para el trabajador aunque puede ser significativa para los valores más elevados de éste índice. Deben tomarse medidas para evitar daños, formar a los trabajadores y mejorar las condiciones de trabajo.
≥ 4	Rojo	Cuanto mayor es el valor obtenido, más alto es el riesgo. Deben tomarse medidas para rediseñar las tareas y los puestos.

Tabla 3.6: Clasificación del riesgo denominado “el semáforo”.

I. Variables del cálculo del índice sintético de exposición

CONSTANTE DE FRECUENCIA DE ACCIÓN (CF)

La variable principal, cuando analizamos los movimientos repetitivos que se ejecutan durante la jornada laboral en las extremidades superiores, es la frecuencia de acción técnica. Una vez determinada dicha frecuencia surge la problemática de definir cuál es la frecuencia de acción de referencia en el turno de trabajo. Esto se debe a que todavía esta frecuencia resulta hipotética con respecto a los conocimientos actuales y se basa en sugerencias derivadas de la literatura y en experiencias personales y conjeturas de los autores.

En la literatura se proporcionan diversas hipótesis de un valor límite de frecuencia, entre las 10 y 25 acciones por minutos en posturas laborales o movimientos articulares parecidos, mientras que si apuntamos a las acciones técnicas, éstas tendrán un contenido diferenciado cuando hablamos de movimientos articulares. Si bien es cierto, cuando nos pronunciamos sobre una frecuencia elevada (por ejemplo de más de 40 por minutos) entendemos que no exista mucho tiempo de contracción o relajación muscular; elemento soportable en trabajos esporádicos o en los trabajos de breve duración (nunca en períodos de más de una hora).

Actualmente, bajo todos estos criterios y con la obligación de determinar ciertas reglas en los lugares de trabajo, se establece una constante de frecuencia de acción de 30 acciones por minuto.

FACTOR FUERZA (Ff)

Los datos que en este punto se consideran son la fuerza que se ejerce con los brazos y/o manos una vez cada pocos ciclos, teniendo en cuenta, que dicha fuerza debe estar presente durante el transcurso de todo el movimiento repetitivo.

Para hallar la relación existente entre la frecuencia de acción y la fuerza, se ha considerado la propuesta del CEN (1993) (Comité Europeo de Normalización). La Tabla 3.7, permite identificar los factores multiplicadores que hay que aplicar a las constantes anteriormente mencionadas.

Ff	Esfuerzo medio recibido (Según Borg)	>0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
	Fuerza media en términos de % respecto M.C.V.	>5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Fd		1	0.85	0.75	0.65	0.55	0.45	0.35	0.2	0.1	0.01

Tabla 3.7: Determinación del Ff (Colombini, 1998).

FACTOR POSTURA (Fp)

La evaluación del riesgo que presenta este factor se engloba en la posición del hombro, codo, muñecas y manos. La existencia de gestos estereotipados, entorno al 50% del tiempo de ciclo, pueden ser causantes de posibles riesgos, mientras que si se sobrepasa el 50% de la amplitud articular y ésta persiste, como mínimo 1/3 del tiempo de ciclo en movimientos o posturas, hablaremos de condiciones de riesgo.

La Tabla 3.8 señala aquellos elementos imprescindibles para pasar del valor descriptivo del esfuerzo postural al correspondiente valor del factor multiplicativo.

Valor del índice de esfuerzo postural	0-3	4-7	8-11	12-15	16
Factor multiplicativo	1	0.70	0.60	0.50	0.30

Tabla 3.8: Determinación del Fp (Colombini, 1998).

Para la muñeca, codo y mano deberá utilizarse el elemento más perjudicial a la hora de realizar el cálculo del índice, sin embargo, el hombro deberá tratarse por separado por ser conveniente definir una constante general de frecuencia distinta de la constante identificativa para las demás áreas.

FACTOR ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS (Fc)

Se plantean una serie de valores, asignados a un factor multiplicador, que deben ser aplicados al

factor correspondiente. Estos valores, basados en la no relevancia, de cara a la posible disminución del número de acciones técnicas en una unidad de tiempo, son aportados por la literatura existente.

Se muestra en la Tabla 3.9 los elementos necesarios para determinar el Fc.

Valor del índice elementos complementarios	0	4	8	12
Factor multiplicativo	1	0.95	0.90	0.80

Tabla 3.9: Determinación del Fc (Colombini, 1998).

FACTOR PERÍODOS DE RECUPERACIÓN (Fr)

El factor de recuperación representa el riesgo asociado a la asignación equívoca de los períodos de recuperación, entendiendo éstos como aquellos períodos dónde los grupos musculares que han estado en movimiento permanecen completamente en reposo, en todo el turno de trabajo.

En el momento de elaborar el índice sintético debe determinarse el número absoluto de acciones recomendadas en función de la presencia, distribución e idoneidad partiendo, de la constante de frecuencia y teniendo en cuenta Ff, Fp y Fc.

El CEN (1993) establece que la frecuencia máxima aceptable debe ser igual a 20 acciones/minuto cuando hablamos de 30 minutos de trabajo continuo, y de 5 acciones/minuto en todo el turno de trabajo con una pausa por la mañana y otra por la tarde. La razón de establecer estas frecuencias es para poder compensar la larga duración y la falta de períodos de recuperación que permiten bajar las recuperaciones adecuadas en el ciclo.

La determinación de utilizar un factor multiplicativo de las acciones permitidas igual a 0.20, ha propiciado a la creación de una tabla de conversión de los resultados del análisis simplificado de la presencia/distribución de los períodos de recuperación según los factores multiplicativos correspondientes (Tabla 3.10) .

Número horas sin recuperación adecuada	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Factor multiplicativo	1	0.90	0.80	0.70	0.60	0.45	0.25	0.10	0

Tabla 3.10: Determinación del Fr (Colombini, 1998).

FACTOR DURACIÓN (Fd)

Cuando se analiza la exposición total de un trabajador durante su jornada laboral, las tareas con movimientos repetitivos o forzados en las extremidades superiores representan un elemento importante a tener en cuenta.

Aunque el modelo de cálculo del índice evalúa situaciones que engloban gran parte de acciones del turno de trabajo donde este incorporado el movimiento repetitivo, existen situaciones alejadas del contexto “típico”, donde es necesario aplicar un factor multiplicador que tenga en cuenta dichas situaciones. Para ello, la Tabla 3.11 muestra los parámetros del Fd, donde los minutos en el turno se corresponden con la suma del tiempo pasado en el turno para efectuar todas las tareas repetitivas para las extremidades superiores.

Minutos en el turno en tareas repetitivas	<120	120-239	240-480	>480
Factor multiplicativo	2	1.5	1	0.5

Tabla 3.11: Determinación del Fd (Colombini, 1998).

FICHAS PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE

Las fichas, agrupan y estructuran los datos del análisis descriptivo, teniendo en cuenta todos los elementos mencionados en los puntos anteriores, para proporcionar el índice sintético de exposición aunque se realicen diversas tareas repetitivas de forma simultánea. Las fichas tienen en cuenta, tanto las extremidades de la zona izquierda, como la derecha.

Estas fichas de análisis contienen, por una parte, los elementos que caracterizan las tareas repetitivas analizadas (Figura 3.12) y, por otra parte, generan el cálculo final del índice de exposición OCRA (Figura 3.13).

En la primera ficha (Figura 3.12) se establecen y cuantifican los siguientes datos (Colombini *et al.*, 2002):

- El departamento y el modelo de trabajo ejecutado por el grupo de sujetos expuestos.
- Los valores que determinan cada tarea repetitiva.

- Encontrar otros niveles de asociación entre el índice OCRA y la prevalencia de TME en los trabajadores expuestos.
- Identificar modelos provisionales suficientemente predecibles de las patologías respecto a un índice OCRA determinado.
- Precisar, según el estado de los conocimientos, los valores de correspondencia de las distintas franjas de exposición y acción (áreas verde-amarilla-roja).

Más tarde, Colombini y sus colaboradores, así como otros autores, investigaron y ampliaron estos estudios permitiendo identificar las distintas áreas de exposición señalando las posibles acciones preventivas a adoptar, tal y como se pueden ver en la Tabla 3.12.

Valores OCRA	Franja	Nivel de riesgo	Acción
<1	Verde	Riesgo ausente	No precisa acción
1,1-2	Amarillo-Verde	Riesgo irrelevante Previsión de TME relacionados con el trabajo	No precisa acción
2,1-3,9	Amarillo-Roja	Riesgo leve Presencia significativa de TME en los sujetos expuestos (hasta 3 veces más)	Activar la vigilancia sanitaria Mejorar las condiciones de exposición
>4	Roja	Riesgo presente y más elevado cuanto mayor es el índice	Rediseño de las tareas y los puestos, activar la vigilancia sanitaria y formación e información de los trabajadores expuestos

Tabla 3.12: Valores del índice (Colombini, 1998).

3.2.3. NIOSH

En 1981 el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (NIOSH)⁴ finalizó un estudio que pretendía descubrir una herramienta capaz de analizar e identificar las dolencias de lumbalgia, asociadas a la carga física que padecían algunos trabajadores durante su jornada laboral. Dicha investigación se recogió en una guía técnica denominada “ Work Practices Guide for Manual Lifting” (NIOSH, 1981). A pesar de los esfuerzos que supuso encontrar un método empírico

⁴Las tablas, figuras, puntuaciones y algunas anotaciones se extraen íntegramente del artículo “A Work practices guide for manual lifting” realizada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (NIOSH, 1981).

capaz de medir los trastornos, éste, sólo evaluaba un número limitado de tareas.

En 1991 apareció una nueva versión que incorporaba elementos como la duración de la tarea, el rango de frecuencia, la calidad de los agarres de la carga, si ésta se encontraba situada en los laterales del trabajador y un peso límite adecuado para cada tarea de 23 kg (Waters *et al.*, 1994, 1993).

Tanto la primera ecuación, publicada en 1981, como la segunda versión, publicada en 1991, fueron elaboradas mediante los mismo criterios biomecánicos, fisiológicos y psicofísicos.

- Criterios biomecánicos: se limita el esfuerzo en la región lumbosacra (vértebras L5/S1) por ser la más sobrecargada en el proceso de levantamiento de carga, en tareas poco frecuentes pero con sobreesfuerzo.
- Criterios fisiológicos: acota la fatiga metabólica en tareas repetitivas.
- Criterios psicofísicos: limita la carga a partir de la percepción que tiene cada trabajador sobre su propia capacidad en el manejo de ésta.

En la Tabla 3.13 se definen los valores de los criterios con los que NIOSH se basa para definir la localización estándar de levantamiento y las condiciones óptimas.

Criterio	Valores límites
Biomecánicos	3.4 kN
Fisiológicos	9.5 kcal/min
Psicofísicos	Constante de Carga (LC) (23 kg). Admisible para el 75 % de las mujeres y el 90 % de los hombres

Tabla 3.13: Valores límite de la ecuación NIOSH (Waters et al., 1994).

I. Procedimiento

La ecuación de NIOSH determina el límite de peso recomendado (*LPR*) a partir de 7 coeficientes que pueden variar entre 0 y 1 según condiciones de levantamiento.

$$LPR = LC \cdot HM \cdot VM \cdot DM \cdot AM \cdot FM \cdot CM \quad (3.4)$$

A medida que nos alejamos de las condiciones óptimas, el valor límite recomendado disminuye, a consecuencia del carácter multiplicador de la ecuación. Debemos reparar en que la localización estándar del levantamiento hace referencia a un espacio tridimensional, donde la distancia vertical de agarre de la carga hasta el suelo es de 75 cm y, la distancia horizontal de agarre y el punto

medio de los tobillos es de 25 cm, tal y como se muestra en la Figura 3.14.

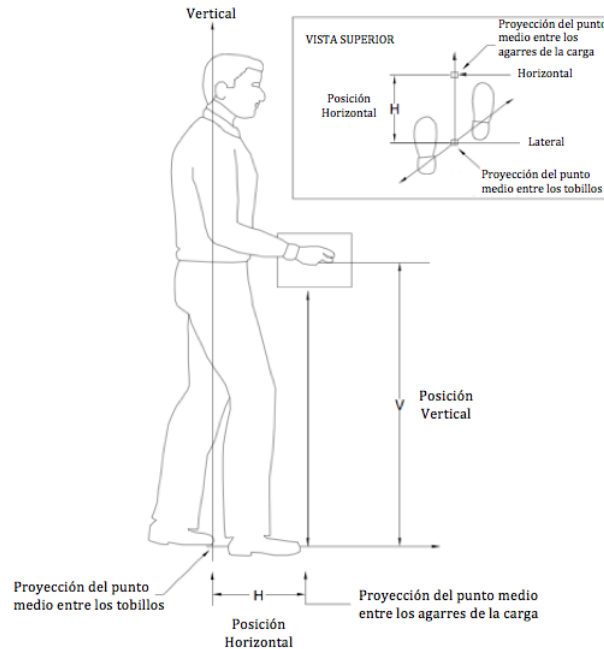


Figura 3.14: Localización estándar de levantamiento (EMC, 2014).

CONSTANTE DE CARGA (LC)

Peso máximo recomendado para un levantamiento desde la localización estándar y en condiciones óptimas. Como ya se definió anteriormente su valor constante está fijado en 23 kg. En el caso de que todos los demás coeficientes tengan valor 1 (valores óptimos) nos encontraríamos frente al peso límite recomendado.

FACTOR DE DISTANCIA HORIZONTAL (HM)

Coefficiente que penaliza los levantamientos de carga que se producen alejados del cuerpo. Para su determinación se utiliza la siguiente fórmula:

$$HM = \frac{25}{H} \quad (3.5)$$

Donde H es la distancia proyectada en un plano horizontal, entre el punto medio de los agarres de la carga y el punto medio de los tobillos (ver Figura 3.14).

$$\text{Si } H < 25\text{cm} \rightarrow HM = 1$$

$$\text{Si } H > 63\text{cm} \rightarrow HM = 0$$

En las condiciones en las que no sea posible medir directamente H esta se obtendrá de forma aproximada a partir de las siguientes condiciones:

$$\text{Si } V > 25\text{cm} \rightarrow HM = 20 + \frac{w}{2}$$

$$\text{Si } V < 25\text{cm} \rightarrow H = 25 + \frac{w}{2}$$

Siendo w la anchura de la carga en el plano sagital y V la altura de las manos respecto al suelo.

FACTOR DE DISTANCIA VERTICAL (VM)

En este caso el coeficiente penaliza los levantamientos de carga que se producen desde una posición baja o muy elevada. Se empleará la siguiente ecuación.

$$VM = 1 - 0.003 \cdot |V - 75| \quad (3.6)$$

Siendo V la distancia medida verticalmente entre el punto medio entre los agarres de la carga y el suelo (ver Figura 3.14). Si la distancia a la que se encuentra la carga es de 75 cm el factor tomará valor 1, pero si por el contrario la carga se aleja, esta disminuirá progresivamente teniendo en cuenta que

$$\text{Si } V > 175\text{cm} \rightarrow VM = 0$$

FACTOR DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL (DM)

Se sancionarán aquellos levantamientos en los que se observe que la altura inicial (V_o) y la final (V_d) del desplazamiento de la carga es grande. Para ello se empleará la siguiente ecuación.

$$DM = 0.82 + \frac{4,5}{D} \quad (3.7)$$

Donde D , en valor absoluto, es la diferencia entre V_o y V_d . Atendiendo a que DM decrece gradualmente cuando aumentamos el desnivel entre ambos orígenes.

$$D = |V_o - V_d| \quad (3.8)$$

Y teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} \text{Si } D < 25\text{cm} &\rightarrow DM = 1 \\ D < 175\text{cm} & \end{aligned}$$

FACTOR DE ASIMETRÍA (AM)

Se considera que existe penalización cuando los levantamientos requieren una torsión del tronco. Si el movimiento de la carga empieza o termina fuera del plano sagital del trabajador estaremos hablando de un levantamiento asimétrico (ver Figura 3.15 y 3.16).

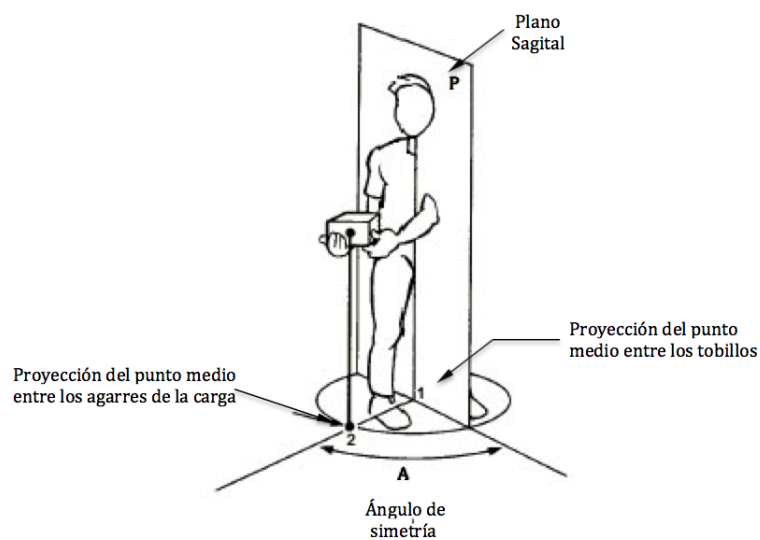


Figura 3.15: Ángulo de asimetría A (Waters et al., 1994).

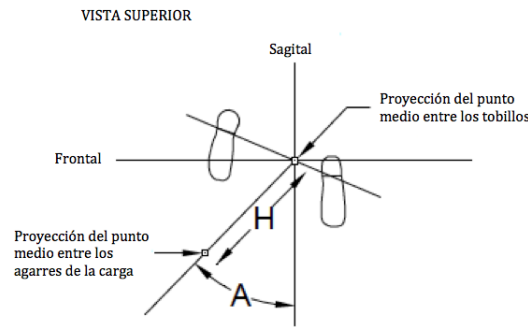


Figura 3.16: Vista superior del ángulo de asimetría A (EMC, 2014).

Para hallar dicho factor de asimetría utilizaremos la siguiente expresión:

$$AM = 1 - (0.032 \cdot A) \tag{3.9}$$

Siendo A el ángulo de giro en grados sexagesimales. AM toma valor 1 cuando no existe simetría y decrece su valor a medida que aumenta el ángulo de asimetría.

$$\text{Si } A > 135^\circ \rightarrow AM = 0$$

FACTOR DE FRECUENCIA (FM)

Factor que se define por el número de levantamientos por minuto (F), la duración de la tarea de levantamiento y la distancia vertical de la carga (V). A continuación se muestran los valores del FM, que deben calcularse para un período de 15 minutos. Los valores de V están en cm para frecuencias inferiores a 5 minutos, utilizar F=0.2 elevaciones por minuto.

Frecuencia	Duración del trabajo					
	≤ 1 hora		>1 – 2 horas		>2 – 8 horas	
	V < 75	V ≥ 75	V < 75	V ≥ 75	V < 75	V ≥ 75
≤ 0,2	1.00	1.00	0.95	0.95	0.85	0.85
0.5	0.97	0.97	0.92	0.92	0.81	0.81
1	0.94	0.94	0.88	0.88	0.75	0.75
2	0.91	0.91	0.84	0.84	0.65	0.65
3	0.88	0.88	0.79	0.79	0.55	0.55
4	0.84	0.84	0.72	0.72	0.45	0.45
5	0.80	0.80	0.60	0.60	0.35	0.35
6	0.75	0.75	0.50	0.50	0.27	0.27
7	0.70	0.70	0.42	0.42	0.22	0.22
8	0.60	0.60	0.35	0.35	0.18	0.18

Frecuencia	Duración del trabajo					
	$\leq 1 \text{ hora}$		$>1 - 2 \text{ horas}$		$>2 - 8 \text{ horas}$	
	$V < 75$	$V \geq 75$	$V < 75$	$V \geq 75$	$V < 75$	$V \geq 75$
9	0.52	0.52	0.30	0.30	0.00	0.15
10	0.45	0.45	0.26	0.26	0.00	0.13
11	0.41	0.41	0.00	0.23	0.00	0.00
12	0.37	0.37	0.00	0.21	0.00	0.00
13	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
>15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 3.14: Cálculo del FM (Waters et al., 1994).

Según la duración de los ciclos de levantamiento y el tiempo de recuperación existen tres categorías de tareas de manipulación de cargas:

Tiempo	Duración	Tiempo de recuperación
$\leq 1 \text{ hora}$	Corta	Al menos 1.2 veces el tiempo de trabajo
$>1 - 2 \text{ horas}$	Moderada	Al menos 0.3 veces el tiempo de trabajo
$>2 - 8 \text{ hora}$	Larga	No se cumplen las condiciones anteriores

Tabla 3.15: Categorías de las tareas (Waters et al., 1994).

FACTOR DE AGARRE (CM)

Factor que estima la facilidad y calidad de agarre del objeto con la mano ya que este puede llegar a supeditar la fuerza máxima que debe ser desarrollada por el trabajador. Antes de su obtención, evaluaremos si la sujeción del objeto se produce con mayor o menor facilidad, si disponemos de asas, la forma, la textura, etc. Para ello utilizaremos los criterios definidos en la Tabla 3.16 donde se especifican tres categorías posibles. En el caso de tener dudas sobre la categoría siempre se deberá escoger la opción más desfavorable.

Bueno	Recipientes óptimos con asas o agarraderas o bien, aquellos en los que las manos pueden acomodarse correctamente alrededor del objeto
Regular	Recipientes con asas o agarraderas no óptimo debido a su tamaño inadecuado o bien, objetos irregulares el cual permita un agarre con flexión de 90° en la palma de la mano.
Malo	Recipientes mal diseñados, irregulares, con aristas o voluminosos difíciles de agarrar y aquellos realizados mediante la presión en los laterales del objeto.

Tabla 3.16: Clasificación del agarre de la carga.

El factor de agarre CM viene condicionado por dos variables, el tipo de agarre de la carga y la distancia vertical y se define por la Tabla 3.17.

Tipo de agarre	Altura vertical	
	$V < 75$	$V \geq 75$
Bueno	1.00	1.00
Regular	0.95	1.00
Malo	0.90	0.90

Tabla 3.17: Determinación del factor de agarre (Waters et al., 1994).

II. Puntuación final

Aplicando la ecuación de NIOSH, a partir del calculo de todos los coeficientes mencionados anteriormente, hallaremos el límite de peso recomendado (LPR) (ver ecuación 3.4) que, junto con el peso de la carga (peso del objeto que es manipulado en Kg) nos permitirá obtener el índice de levantamiento (IL):

$$IL = \frac{\text{Peso de la carga}}{LPR} \quad (3.10)$$

Índice que nos proporciona una estimación del nivel de riesgo asociado a una tarea que lleva implícito un levantamiento manual de carga. Es difícil de cuantificar, de forma precisa, el grado de riesgo vinculado al incremento del IL ya que no encontramos definida la función de riesgo. Sin embargo, se puede clasificar en tres niveles de riesgo para identificar aquellas tareas de levantamiento peligroso.

IL	Nivel de riesgo	Apreciación
Aceptable	$IL \leq 1$	La mayoría de trabajadores no mostraran problemas al realizar este tipo de tareas.
Moderado-Importante	$1 < IL < 3$	Las tareas deben ser rediseñadas o asignadas a trabajadores seleccionados sometidos a un control, ya que estas, pueden ocasionar dolencias o lesiones.
Inaceptable	$IL \geq 3$	Tareas que deben ser modificadas des de una visión ergonómica por ser inaceptables.

Tabla 3.18: Niveles de riesgo (Waters et al., 1994).

III. Restricciones del método NIOSH

Existen una serie de condiciones para evaluar el riesgo asociado al levantamiento de cargas así como unas limitaciones para que sea posible su análisis, estas son:

- No se evalúa el riesgo potencial asociado con los efectos acumulativos de los levantamientos.
- No se examinan aquellas tareas con posibilidad de deslizamientos, incrementos bruscos de carga, caídas, levantamientos rápidos o bruscos y cargas inestables.
- No se evalúa aquella carga que puede ser levantada con una sola mano, en posición sentado o arrodillado, en espacios reducidos u objetos fríos o calientes.
- Debe existir un rango de temperatura adecuado entre los 19° y 26° y una humedad relativa del 35 % y el 50 %.
- Se estima un coeficiente de rozamiento entre el suelo y las suelas de los zapatos entre 0.4 y 0.5 para evitar deslizamientos y caídas.

3.3. Propuesta de unificación de métodos

Hemos desarrollado una metodología concreta para valorar el riesgo global asociado a un puesto de trabajo. Dicha metodología, surge de la necesidad de disponer de una estimación global del riesgo al que una persona está expuesta durante toda su jornada laboral sea cual sea su actividad.

Cabe decir que partimos de diversas premisas que hay que tener en cuenta:

- (1) La evaluación de los diferentes TME, que puede padecer un trabajador, deben ser evaluados por técnicos cualificados en Prevención de Riesgos Laborales (PRL) y en particular, por técnicos que dispongan de estudios superiores en ergonomía y con experiencia en el sector.
- (2) La clasificación creada no pretende ser un instrumento para la evaluación de trabajos concretos sino que puede ser aplicado a diversos tipos de actividades.
- (3) No está destinado a ser un modelo único en el mercado como unificación de métodos ergonómicos, sino una herramienta de ayuda par evaluar las condiciones generales de trabajo.
- (4) Referente a su valoración, debemos tener en cuenta diversos factores: (a) la estructura de los niveles de riesgo así como las acciones a tener en cuenta han sido obtenidas a partir de criterios

objetivo para poder identificar y considerar los diversos riesgos; (b) las puntuaciones de los niveles de riesgo se extraer mediante la clasificación general de los métodos analizados y (c) el método creado permite de forma sencilla obtener un valor final del riesgo mediante un análisis previo de los diversos problemas músculo-esqueléticos que puede encontrar un trabajador en su puesto de trabajo.

Previo a la unificación de los métodos se han realizado modificaciones en sus puntuaciones.

3.3.1. Modificación método RULA

En el caso del método RULA se siguió el mismo criterio a la hora de agrupar los niveles de acción (4 grupos) y se otorgaron diversos riesgos a cada uno de ellos (Tabla 3.19).

Método RULA		Nueva clasificación	
Nivel de acción	Puntuación	Nivel de acción	Riesgo
1	1 ó 2	1	Aceptable
2	3 ó 4	2	Leve-Moderado
3	5 ó 6	3	Alto
4	7 ó +	4	Inaceptable

Tabla 3.19: Unificación método RULA.

3.3.2. Modificación método OCRA

En relación al método OCRA se consideró conveniente realizar una disgregación de los valores (Tabla 3.20). Por consiguiente, al valor <1 correspondiente a una franja verde se le otorga un riesgo aceptable; el valor que oscila de 1,1-2 con una franja amarillo-verde se dividió en dos grupos, dejando, por un lado, los valores de 1, $1 \leq \chi \leq 1,5$ (franja verde), con un riesgo aceptable, y por el otro lado, los valores entre 1, $1,6 \leq \chi \leq 2$ (franja amarilla), con un riesgo leve-moderado. Se realizó el mismo proceso para los valores que oscilan entre 2,1-3,9 para la franja amarillo-roja. Los valores de 2, $1 \leq \chi \leq 2,5$ (franja amarilla) con un riesgo leve-moderado y, los valores $2,6 \leq \chi \leq 3,9$ (franja lila) con un riesgo alto. Para completar la tabla, el valor >4 con franja roja se dejó tal cual, considerándolo un riesgo inaceptable.

Método OCRA		Nueva clasificación		
Valores	Franja	Nivel de acción	Franja	Riesgo
<1	verde	1	verde	Aceptable
1,1-2	Amarillo-Verde	1 ($1 \leq \chi \leq 1,5$)	Verde	Aceptable
		2 ($1,6 \leq \chi \leq 2$)	Amarillo	Leve-Moderado

Método OCRA		Nueva clasificación		
Valores	Franja	Nivel de acción	Franja	Riesgo
2,1-3,9	Amarillo-Rojo	2 ($2, 1 \leq \chi \leq 2, 5$)	Amarillo	Leve-Moderado
		3 ($2, 6 \leq \chi \leq 3, 9$)	Lila	Alto
>4	Rojo	$\chi \geq 4$	Rojo	Inaceptable

Tabla 3.20: Unificación método OCRA.

3.3.3. Modificación método NIOSH

En el método NIOSH también se disgregaron los niveles riesgo (Tabla 3.21). El nivel de riesgo $IL \leq 1$ se dejó como aceptable, el nivel de riesgo $1 < IL < 3$ dividió en dos, por una parte, los valores comprendidos entre $1 \leq IL < 2$ considerados como riesgo leve-moderado y, por otra, los valores $2 \leq IL < 3$ considerados riesgo alto. Por último el nivel de riesgo $IL \geq 3$ como riesgo inaceptable.

Método NIOSH		Nueva clasificación	
IL	Nivel de acción	Nivel de acción	Riesgo
Aceptable	$IL \leq 1$	1	Aceptable
Moderado-Importante	$1 < IL < 3$	2 ($1 \leq IL < 2$)	Leve-Moderado
		3 ($2 \leq IL < 3$)	Alto
Inaceptable	$IL \geq 3$	4	Inaceptable

Tabla 3.21: Unificación método NIOSH.

3.3.4. Unificación final de los métodos RULA, OCRA y NIOSH

Para llevar a cabo la integración de los tres métodos y realizar una misma clasificación final se ha definido una nomenclatura básica y se ha procedido de la siguiente manera:

Parámetros	
J	Conjunto de tareas elementales ($j = 1, \dots, J $).
Φ	Conjunto de factores de riesgo físicos y psíquicos ($\phi = 1, \dots, \Phi $).
t_j	Tiempo de proceso de la tarea elemental ($j = 1, \dots, J $) medido a actividad normal.
$\chi_{\phi,j}$	Categoría de la tarea ⁵ j ($j = 1, \dots, J $) respecto al factor de riesgo ϕ ($\phi = 1, \dots, \Phi $)

⁵Designaremos como categoría de una determinada tarea al nivel de riesgo que implica dicha tarea.

Procedimientos

- 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 $\phi \in \Phi$, 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 ($j = 1, \dots, |J|$), 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: $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$.
- 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:

- Nivel de acción 1 (L1): Pertenece a un riesgo aceptable $1 \leq \chi_{\phi,j} < 2$, entendiendo riesgo como el esfuerzo que posee un trabajador al desarrollar su actividad laboral (carga de trabajo) sin sobrepasar su propia capacidad.
- Nivel de acción 2 (L2): Es considerado leve-moderado, $2 \leq \chi_{\phi,j} < 3$, por producir en algún momento alguna sobrecarga o fatiga al trabajador siendo recomendable evaluar el puesto de manera periódica.
- Nivel de acción 3 (L3): Es estimado como un riesgo alto, $3 \leq \chi_{\phi,j} < 4$, y se valora como la sobrecarga o fatiga que desarrolla un trabajador durante su jornada laboral desencadenando en TME. Por ello, se precisa una mejora en las condiciones de trabajo y debe ser activada la vigilancia.
- Nivel de acción 4 (L4): Se estipula un riesgo inaceptable desde un punto de vista ergonómico, $\chi_{\phi,j} \geq 4$, y debe ser eliminado o modificado por completo por generar condiciones peligrosas para el trabajador.

A modo de resumen se presenta la Tabla 3.22 donde aparece la unificación de los niveles asociados a los índices de valoración y a los criterios que se deben tener en cuenta para su evaluación y posterior actuación.

Nivel de riesgo	Índice	Acción sugerida
$1 \leq \chi_{\phi,j} < 2$	Aceptable	No se requiere acción por no mostrar ninguna dolencia o riesgo al trabajador.
$2 \leq \chi_{\phi,j} < 3$	Leve- Moderado	Es recomendable un análisis del puesto por ser necesario, en un futuro, acciones correctivas para su mejora.
$3 \leq \chi_{\phi,j} < 4$	Alto	Recomendable un análisis junto con una mejora del puesto de forma inmediata y supervisión médica. Controles periódicos.
$\chi_{\phi,j} \geq 4$	Inaceptable	Modificación de inmediato del puesto por presentar dolencias graves al trabajador.

Tabla 3.22: Unificación final de Métodos.

CAPÍTULO 4

INCORPORACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO AL EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE

En el presente capítulo nos centraremos en presentar diversas propuestas de modelos basadas en el modelo TSALBP (Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problem) incorporando la carga física para conseguir el objetivo principal que plantea este estudio.

Para ello, se han analizado aquellas líneas de montaje donde circulan unidades no idénticas que implican una variación en el uso de recursos, así como en el consumo de componentes (líneas de montaje de productos mixtos).

Se han considerado los diversos atributos que presenta el modelo TSALBP como es el caso del número de estaciones de trabajo, el área requerida en dichos puestos, el tiempo de ciclo y una nueva restricción que consiste en la incorporación de un factor de riesgo ergonómico, que mide las dolencias que se producen en los puestos de trabajo, teniendo en cuenta que su principal objetivo es garantizar la salud y el bienestar del trabajador.

4.1. Antecedentes

El requerimiento creciente que se produce en los procesos industriales de hoy en día implica que los operarios necesiten más información, más tiempo y más espacio para abordar las diversas tareas que les son encomendadas. Es indiscutible que debido a la gran variedad de singularidades que puede presentar una línea de montaje podemos vernos inmersos en dispares problemas a resolver. Por ello, debemos preguntarnos si sólo nos encontramos con impedimentos técnicos o

tecnológicos en las líneas de montaje o si existen otros factores que pueden alterar su funcionamiento, pudiendo ser entendidos estos últimos como la relación existente entre el ser humano y los diversos elementos del sistema.

Cuando hacemos referencia a los componentes del trabajo o a las tareas, éstas deben considerarse de forma conjunta construyendo el denominado sistema hombre-máquina (Sistema H-M); sistema establecido por una o varias personas y por una o varias máquinas relacionadas entre sí con uno o varios objetivos en común y dentro de un ambiente apropiado para el dicho sistema (Stammers y Hallam, 2003).

Examinada la descripción anterior, surge la concepción del trabajo como diálogo entre un hombre y una máquina, unificándolos en un sistema singular cuyas interrelaciones y comunicaciones son el objeto de estudio de la ergonomía (Wilson, 2014). En este caso, la ergonomía no sólo estima los factores hombre y máquina, sino que, además, considera otras peculiaridades como son las características individuales del trabajador (edad, sexo, dimensiones antropométricas, etc.) y los factores ambientales (ruido, humedad, iluminación, temperatura, etc.) (Storrs *et al.*, 1984).

En la literatura existente, diversos autores (LaVille, 1977; Singleton, 1972) han analizado el Sistema H-M como dos campos distintos que deben unirse por exigencia del entorno, pero, por el contrario, otros autores (Kennedy, 1962; McCormick, 1964) lo definen como la interacción comunicativa que persigue un objetivo, siendo ésta la programación operativa de las acciones que deben ejercitar las personas, y haciendo hincapié en los límites a que está sometido el sistema debido, sobre todo, al hombre.

A continuación se presentan diversas definiciones del concepto Sistema H-M.

“Un sistema hombre-máquina es una organización cuyos componentes son hombres y máquinas que trabajan conjuntamente para alcanzar un fin común y están unidos entre sí por una red de comunicaciones”

[Kennedy (1962)]

“Un sistema hombre-máquina puede definirse como una combinación operatoria de uno o más hombres con uno o más componentes, que interactúan para suministrar, a partir de elementos dados (input), ciertos resultados, teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por un ambiente dado”

[McCormick (1964)]

“El conjunto de conocimientos científicos relativos al hombre y necesarios para la concepción de instrumentos, máquinas y dispositivos que pueden ser utilizados con el máximo confort, seguridad y eficiencia”

[Wisner, A. en LaVille (1977)]

“(...) La interacción Hombre-Ordenador incluye partes apropiadas de factores humanos y ergonomía. Está interesada en la comprensión de como los ordenadores y la gente pueden interactivamente realizar tanto tareas nuevas como tareas existentes. (...)”

[Johnson (1992)]

“(...) Está compuesto por tres elementos conocidos y predeterminados que son ser humano, objeto/máquina y espacio físico. Estos tres elementos se relacionan entre sí o entre sus partes, e interactúan para llevar a cabo trabajos o actividades que pueden ser motoras, sensoriales o racionales”

[Saravia (2006)]

“ Los sistemas H-M son sistemas de bucle cerrado en los que la máquina presenta la información al operador y éste utiliza los elementos de control para actuar sobre la máquina que, a su vez, le retorna la información.

[ASEPEYO (2008)]

La ergonomía se entiende como la tecnología de las comunicaciones en los sistemas H-M, y tiene como objetivo, conseguir lograr una concordancia entre el hombre y la máquina utilizando diversas metodologías y conocimientos de diferentes ciencias como la psicología, la fisiología, la física o ingeniería, la sociología, la medicina y las matemáticas, para integrarlas y tratar de maximizar el rendimiento del sistema, la seguridad, la satisfacción y la comodidad de las personas incluidas en el mismo. Todo ello estudiando el sistema de forma conjunta y nunca al hombre aislado ni a la máquina aislada.

A continuación se muestra un esquema (Figura 4.1) que aproxima la ergonomía y las líneas de montaje en el sistema H-M.

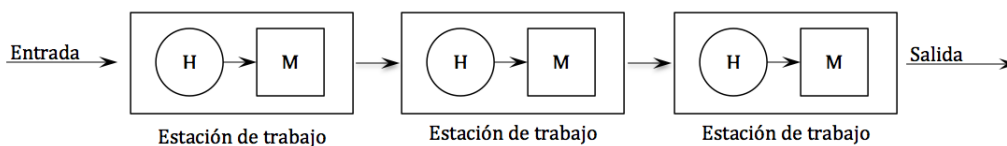


Figura 4.1: Esquema del sistema H-M como yuxtaposición de puestos de trabajo

Debemos entender que la ergonomía no es únicamente el conjunto de ciencias, mencionadas anteriormente, que analizan y estudian la actividad laboral, sino que pretende guiar, industrializar y asignar datos de otras ciencias a un amplio despliegue de actividades. Ahora bien, ésta debe ser capaz de trabajar paralelamente en los diversos problemas que van surgiendo a lo largo del

tiempo en el diseño y corrección de los sistemas.

Respecto a nuestro campo de estudio, la ergonomía será eficaz cuando seamos capaces de plantearnos los diferentes problemas que pueden surgir en las líneas de montaje y crear una evolución de ambos campos (hombre-máquina) de forma conjunta.

Considerando las líneas de montaje de modelos mixtos, todos los problemas descritos en el Capítulo 2 consisten en asignar un conjunto de tareas a un conjunto de estaciones de trabajo, teniendo en cuenta un conjunto de limitaciones tecnológicas y productivas. Sin embargo, todos los modelos podrían ser extendidos mediante la incorporación de limitaciones ergonómicas cuyo fin sería adaptar las operaciones que debe realizar el trabajador para garantizar su seguridad, su bienestar y mejorar su eficacia.

De hecho, la literatura existente ofrece algunos métodos que incorporan los riesgos ergonómicos a los que puede estar sometido un trabajador en su puesto de trabajo durante su jornada laboral. Como precedentes podemos remitirnos al trabajo realizado por Otto y Scholl (2011), en el que incorporan elementos ergonómicos a una línea de montaje mediante la utilización de tres métodos, NIOSH, OCRA y The European Assembly Worksheet (EWAS), para estimar los riesgos dentro del problema SALBP-1 (modelo definido y desarrollado en Capítulo 2, Sección 2.2, Subsección 2.2.2).

En una primera aproximación, dado el conjunto K de estaciones, para cada carga de trabajo, S_k , asignada a la estación k ($k = 1, \dots, |K|$), se determina el riesgo ergonómico $F(S_k)$, que cumple la siguiente propiedad de monotonía $F(S_k) \leq F(S_k \cup \{j\})$ ($\forall S_k, \forall j \in J$). Por otra parte se establece un valor máximo, Erg , para dicho riesgo ergonómico. Consecuentemente, podemos añadir a los modelos originales las siguientes restricciones:

$$F(S_k) \leq Erg \quad \forall k = 1, \dots, |K| \quad (4.1)$$

Como alternativa a las condiciones (4.1), Otto y Scholl (2011) proponen el ErgoSALBP-1, mediante el método de relajación Lagrangiana. En este nuevo modelo, los autores proponen una nueva función objetivo compuesta por dos términos:

$$\text{Min } K'(x) = K(x) + \omega \cdot \xi(F(S_k)) \quad (4.2)$$

Donde $K(x)$ es el número de estaciones de la línea; ω es un peso no negativo y $\xi(F(S_k))$ es una función que agrega los factores de riesgo ergonómico, $F(S_k), \forall k$.

Lógicamente, las restricciones (4.1) presentadas por Otto y Scholl (2011), se pueden ampliar si se tiene en cuenta, en el diseño de la línea, un valor mínimo y máximo para el riesgo ergonómico y los diferentes factores que pueden acarrear riesgos ergonómicos.

Otro estudio más reciente, presentado por Cheshmehgaz *et al.* (2012), presenta un nuevo modelo ALB (Assembly Line Balancing) que incorpora posturas corporales monótonas que padecen los trabajadores durante su jornada laboral mediante una simplificación del método OWAS considerando, únicamente, tres áreas corporales: espalda, brazos y piernas.

El modelo ALB propuesto (Cheshmehgaz *et al.*, 2012) engloba tres criterios: (1) tiempo de ciclo, (2) la carga de trabajo físico en general y (3) ARP (Accumulated Risk of Postures) definido como el parámetro que indica la falta de cambios de posturas, lo que supone un alto riesgo para el trabajador durante un tiempo de ciclo para una estación de trabajo, para diversas estaciones de trabajo y finalmente, para toda la línea de montaje. Como procedimiento de resolución, utilizan Algoritmos Genéticos (GAs) (Holland, 1975).

Como vemos, ya se han planteado en la literatura problemas que consideran condiciones relativas a la ergonomía dentro de estaciones de trabajo. No obstante, existen otras consideraciones y requerimientos ergonómicos que aún no han sido considerados y que darían lugar a nuevos modelos matemáticos por medio de restricciones adicionales o nuevas funciones objetivo.

En los siguientes apartados se desarrollan y explican nuevas formulaciones matemáticas para el problema TSALBP, teniendo en cuenta los factores ergonómicos que atañen a las líneas de montaje actuales.

4.2. TSALBP_erg: una extensión de la familia TSALBP

4.2.1. Conceptos básicos

El punto de partida de la investigación se centra en presentar una extensión del TSALBP-m con restricciones de riesgo ergonómico, definiendo dicho riesgo a partir de su categoría y de la duración de la tarea que lo conlleva.

Así, considerando la unificación de los métodos OCRA, NIOSH y RULA (Capítulo 3, Sección 3.3,

Subsección 3.3.4), propuesta para clasificar las actividades o tareas en diferentes categorías (por ejemplo, de 1 a 4) en función del nivel de riesgo dependiendo de diversos factores (como pueden ser los movimientos repetitivos, la carga, la duración, etc.), tenemos:

Φ	Conjunto de factores de riesgo ergonómico (físico, psíquico y físico-psíquico).
X_ϕ	Conjunto de categorías para el factor de riesgo ergonómico $\phi \in \Phi$. Cuando se analice un solo factor de riesgo, llamaremos X al conjunto de categorías. El conjunto de categorías para el riesgo ergonómico indica la intensidad, esfuerzo o dificultad que este factor puede presentar.
J	Conjunto de tareas elementales.
j	El índice de la tarea $j \in J$ ($j = 1, \dots, J $).
$\chi_{\phi,j}$	Categoría de la tarea $j \in J$ ($\chi_{\phi,j} \in X_\phi$) asociada al factor de riesgo $\phi \in \Phi$, que es un valor entero no negativo. Para un sólo factor de riesgo tendremos χ_j .

En tales condiciones podemos definir:

(1) Riesgo ergonómico de la tarea $j \in J$ con respecto al factor de riesgo ergonómico $\phi \in \Phi$:

$$R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j} \quad (\forall \phi \in \Phi; \forall j \in J) \quad (4.3)$$

(2) Riesgo ergonómico del subconjunto de tareas $J_0 \subseteq J$ con respecto al factor de riesgo ergonómico $\phi \in \Phi$:

$$R_\phi(J_0) = \sum_{j \in J_0} t_j \cdot \chi_{\phi,j} \quad (\forall \phi \in \Phi; \forall J_0 \subseteq J) \quad (4.4)$$

Donde, J_0 puede ser una tarea, una operación que agrega un grupo de tareas elementales, una meta-operación que agrega un conjunto de operaciones o la carga de trabajo de la estación.

(3) El tiempo de proceso del subconjunto de tareas $J_0 \subseteq J$:

$$t(J_0) = \sum_{j \in J_0} t_j \quad (\forall J_0 \subseteq J) \quad (4.5)$$

(4) La categoría del subconjunto de tareas $J_0 \subseteq J$ asociada al factor de riesgo $\phi \in \Phi$:

$$\chi_{\phi}(J_0) = \frac{R_{\phi}(J_0)}{t(J_0)} \quad (\forall \phi \in \Phi; \forall J_0 \subseteq J) \quad (4.6)$$

Donde $\chi_{\phi}(J_0)$ es un valor real.

(5) La categoría corregida del subconjunto de tareas $J_0 \subseteq J$ para el factor de riesgo ergonómico $\phi \in \Phi$:

$$\hat{\chi}_{\phi}(J_0) = \lceil \chi_{\phi}(J_0) \rceil \quad (\forall \phi \in \Phi; \forall J_0 \subseteq J) \quad (4.7)$$

Donde $\hat{\chi}_{\phi}(J_0)$ es un número entero.

Con todo esto, nuestra propuesta es incorporar al TSALBP, en particular al modelo TSALBP-m, las restricciones asociadas al riesgo ergonómico. Por lo tanto, si consideramos J_0 como la carga de trabajo asociada a una estación k , del conjunto de estaciones K (S_k), tendremos $R_{\phi}(S_k)$, $t(S_k)$, $\chi_{\phi}(S_k)$ y $\hat{\chi}_{\phi}(S_k) \quad \forall k \in K$, donde impondremos las siguientes limitaciones a cada estación y factor de riesgo:

(1) Limitación superior e inferior de los riesgos ergonómicos reales:

$$R_{\phi}^{min} \leq t(S_k) \cdot \chi_{\phi}(S_k) \leq R_{\phi}^{max} \quad (\forall k \in K; \forall \phi \in \Phi) \quad (4.8)$$

(2) Limitación superior e inferior del riesgo ergonómico corregido:

$$R_{\phi}^{min} \leq t(S_k) \cdot \hat{\chi}_{\phi}(S_k) \leq R_{\phi}^{max} \quad (\forall k \in K; \forall \phi \in \Phi) \quad (4.9)$$

Nótese que utilizar $\hat{\chi}$ en lugar de χ supone que las condiciones (4.9) son más restrictivas que (4.8) para el conjunto de soluciones factibles, ya que en el segundo caso se utiliza como categoría de riesgo el entero superior de la relación entre el riesgo analizado y el tiempo que ocupan las tareas asignadas a la estación.

4.2.2. Modelos TSALBP_erg (F, m, c, A, R_ϕ^{max})

Teniendo en cuenta las definiciones anteriores (4.8) y (4.9), que nos permiten limitar, inferior y superiormente, el riesgo ergonómico asociado a la carga de trabajo asignada a una estación, y la familia de modelos TSALBP, es posible definir una nueva familia de modelo, la TSALBP_erg.

Esta nueva familia de modelos, no sólo considerará atributos temporales, espaciales y tecnológicos, sino también atributos ergonómicos. Así, en función de los atributos que se quieran optimizar, tendremos los siguientes problemas.

Nombre	m	c	A	$R_\phi(R_\phi^{max})$	Tipo
<i>TSALBP-F-erg</i>	Dado	Dado	Dado	Dado	Factibilidad
<i>TSALBP-m-erg</i>	Minimizar	Dado	Dado	Dado	Mono-Objetivo
<i>TSALBP-c-erg</i>	Dado	Minimizar	Dado	Dado	Mono-Objetivo
<i>TSALBP-A-erg</i>	Dado	Dado	Minimizar	Dado	Mono-Objetivo
<i>TSALBP-R-erg</i>	Dado	Dado	Dado	Minimizar	Mono-Objetivo
<i>TSALBP-m/c-erg</i>	Minimizar	Minimizar	Dado	Dado	Bi-Objetivo
<i>TSALBP-m/A-erg</i>	Minimizar	Dado	Minimizar	Dado	Bi-Objetivo
<i>TSALBP-m/R-erg</i>	Minimizar	Dado	Dado	Minimizar	Bi-Objetivo
<i>TSALBP-c/A-erg</i>	Dado	Minimizar	Minimizar	Dado	Bi-Objetivo
<i>TSALBP-c/R-erg</i>	Dado	Minimizar	Dado	Minimizar	Bi-Objetivo
<i>TSALBP-A/R-erg</i>	Dado	Dado	Minimizar	Minimizar	Bi-Objetivo
<i>TSALBP-m/c/A-erg</i>	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Dado	Tri-Objetivo
<i>TSALBP-m/c/R-erg</i>	Minimizar	Minimizar	Dado	Minimizar	Tri-Objetivo
<i>TSALBP-m/A/R-erg</i>	Minimizar	Dado	Minimizar	Minimizar	Tri-Objetivo
<i>TSALBP-c/A/R-erg</i>	Dado	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Tri-Objetivo
<i>TSALBP-m/c/A/R-erg</i>	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Tetra-Objetivo

Tabla 4.1: Tipología TSALBP_erg.

En la Tabla 4.1 el sufijo *F* se refiere a un problema de factibilidad. Los sufijos *m*, *c*, A^1 y *R* se refieren al número de estaciones, tiempo de ciclo, área lineal disponible y riesgo ergonómico, para modelos mono-objetivo. Los modelos multi-objetivo se representan mediante la concatenación de

¹Nótese que en los modelos, tanto el área disponible A como las áreas requeridas a_j ($j = 1, \dots, |J|$) corresponden a áreas lineales y son medidas en unidades de longitud (cm, dm, m). En nuestro caso, el espacio por el que se mueven los operarios y se localizan los componentes del producto, tiene una profundidad homogénea a lo largo de toda la línea. Dicha profundidad debe ser la apropiada para desempeñar el trabajo con comodidad y para facilitar a todos los operarios el acceso, en desplazamientos cortos y lo más parecidos posible, a las componentes de sus estaciones respectivas. Consecuentemente, sólo es necesario tener en cuenta, en el proceso de optimización, la longitud de las estaciones de trabajo que denominamos espacio o área lineal requerida por las estaciones.

las variables básicas (m , c , A y R) separadas por “/”.

A continuación se presentan los modelos correspondientes a la nueva familia de problemas de equilibrado de líneas. No obstante, antes de formular los nuevos modelos matemáticos, se presentan todos los parámetros y variables que contienen.

Obviamente, muchos de los parámetros y variables definidas coinciden con las utilizadas en los modelos correspondientes a la familia TSALBP.

Parámetros	
J	Conjunto de tareas elementales ($j = 1, \dots, J $).
K	Conjunto de estaciones ($k = 1, \dots, K $).
Φ	Conjunto de factores de riesgo ergonómico ($\phi = 1, \dots, \Phi $).
t_j	Tiempo de proceso de la tarea elemental j ($j = 1, \dots, J $) a actividad normal.
a_j	Espacio o área lineal requerida por la tarea elemental j ($j = 1, \dots, J $).
$\chi_{\phi,j}$	Categoría de la tarea j ($j = 1, \dots, J $) asociada al factor de riesgo ϕ ($\phi = 1, \dots, \Phi $). Por defecto es un valor entero no negativo.
$R_{\phi,j}$	Riesgo ergonómico de la tarea j ($j = 1, \dots, J $) asociada al factor de riesgo ϕ ($\phi = 1, \dots, \Phi $). Donde, $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$
P_j	Conjunto de tareas precedentes inmediatas de la tarea j ($j = 1, \dots, J $).
$m_{max}, K $	Número máximo de estaciones de trabajo ($k = 1, \dots, m_{max}$).
c	Tiempo de ciclo. Tiempo estándar asignado a la estación de trabajo para procesar su carga de trabajo (valor conocido).
A	Espacio o área lineal disponible asignada a cada estación de trabajo (valor conocido).
$R_{\phi}^{min}, R_{\phi}^{max}$	Mínimo y máximo riesgo ergonómico permitido a cada estación de trabajo para el factor ϕ ($\phi = 1, \dots, \Phi $), respectivamente.
Variables	
$x_{j,k}$	Variable binaria igual a 1 si la tarea elemental j ($j = 1, \dots, J $) es asignada a la estación de trabajo k ($k = 1, \dots, m_{max}$), y 0 en caso contrario.
m	Número de estaciones de trabajo.
c	Tiempo de ciclo. Tiempo estándar asignado a la estación de trabajo para procesar su carga de trabajo.
A	Espacio o área lineal disponible asignada a cada estación de trabajo.
R_{ϕ}	Riesgo ergonómico permitido a cada estación de trabajo para el factor ($\phi = 1, \dots, \Phi $).

Cabe destacar, que los modelos que a continuación se presentan, se proponen para tareas elementales ($j \in J$), pudiendo ser derivados para subconjuntos de tareas elementales ($J_0 \subseteq J$).

MODELO DE FACTIBILIDAD

TSALBP-F_erg: Modelo que comprueba si una configuración de la línea, con m_{max} estaciones, respeta las limitaciones en cuanto al tiempo de ciclo de la línea, al área requerida por estación y al riesgo ergonómico mínimo y máximo permitidos, establecidos todos ellos a priori.

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.10)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.11)$$

$$R_{\phi}^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_{\phi}^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.12)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.13)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.14)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.15)$$

Las restricciones (4.10) y (4.11) indican que el conjunto de tareas elementales asignadas a cada estación de trabajo no deben exceder el tiempo de ciclo y el área lineal disponible, respectivamente. Las restricciones (4.12) limitan el riesgo ergonómico máximo y mínimo permitido al conjunto de tareas elementales asignadas a una estación de trabajo. La restricción (4.13) indica que cada tarea elemental sólo puede asignarse a una única estación de trabajo. La restricción (4.14) obliga a que la asignación de las tareas de las estaciones de trabajo satisfagan el conjunto de precedencias. Por último, la restricción (4.15) requiere que las variables de agregación sean binarias.

MODELOS MONO-OBJETIVO

TSALBP-m_erg: Modelo que minimiza el número de estaciones de la línea, dados un tiempo de ciclo, un área máxima por estación y unos límites para el riesgo ergonómico asociado a cada estación.

$$Min \ z_1 = m \quad (4.16)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.17)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.18)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.19)$$

$$R_{\phi}^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_{\phi}^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.20)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.21)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.22)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.23)$$

En el modelo, la función objetivo (4.16) minimiza el número de estaciones de trabajo m . La restricción (4.17) lleva a determinar la última estación de trabajo no vacía. El resto de restricciones coinciden con las restricciones (4.10)-(4.15) del modelo anterior (TSALBP-F_erg).

TSALBP-c_erg: Modelo que optimiza el tiempo de ciclo, respetando un área máxima por estación, y los límites de riesgo ergonómico permitido por estación, dado un número de m_{max} estaciones de trabajo.

$$Min \ z_2 = c \quad (4.24)$$

Satisfaciendo:

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.25)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.26)$$

$$R_{\phi}^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_{\phi}^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.27)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.28)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.29)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.30)$$

En el modelo, (4.24) expresa la minimización del tiempo de ciclo y (4.25) lleva a determinar el tiempo de ciclo máximo permitido a toda estación de trabajo. Al igual que en los modelos anteriores, el resto de restricciones limitan el espacio requerido por estación, el riesgo ergonómico de las tareas asignadas por estación, la asignación de cada tarea a una única estación, el orden de las tareas y la condición de binariedad de las variables de asignación.

TSALBP-A: Minimización del área lineal máxima requerida por el conjunto de estaciones, dados el tiempo de ciclo, el número de estaciones y el limite inferior y superior para el riesgo ergonómico.

$$Min \ z_3 = A \quad (4.31)$$

Satisfaciendo:

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.32)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.33)$$

$$R_{\phi}^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_{\phi}^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.34)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.35)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.36)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.37)$$

En el modelo, (4.31) expresa la minimización del área lineal requerida para cada estación y (4.32) sirve para determinar el área lineal máxima disponible en cada estación. El resto de restricciones coinciden con las restricciones de modelos anteriores.

TSALBP-R.erg: Modelo adicional de esta nueva familia que minimiza el promedio de los riesgos máximos, del conjunto de estaciones, debidos a los diferentes factores de riesgo posibles.

$$\text{Min } z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi} \quad (4.38)$$

Satisfaciendo:

$$R_{\phi} - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.39)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.40)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.41)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.42)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.43)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.44)$$

En el modelo, las ecuaciones adicionales son la (4.38) y la (4.39), en concreto, la ecuación (4.38) representa la función objetivo que consiste en la minimización del riesgo ergonómico medio agregado² del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo. Por su lado, la ecuación (4.39) sirve para determinar el riesgo ergonómico asociado al factor $\phi \in \Phi$ de cada estación de trabajo.

MODELOS BI-OBJETIVO

A continuación se presentan los diversos modelos bi-objetivos, resultados de la combinatoria entre dos de los atributos considerados en la familia TSALBP_erg. En efecto, se presenta un modelo que

²Nótese que la función objetivo equipondera todos los factores de riesgo $\phi \in \Phi$. En definitiva (4.38) expresa la minimización del riesgo ergonómico promediado para todos los factores de riesgo.

minimiza de forma simultánea el número de estaciones de la línea y el tiempo de ciclo (modelo TSALBP-m/c_erg); un modelo que minimiza el número de estaciones de la línea y el área máxima requerida por dichas estaciones (modelo TSALBP-m/A_erg); un modelo que minimiza el número de estaciones y el riesgo ergonómico medio del conjunto de factores de riesgo analizados (modelo TSALBP-m/R_erg); un modelo que minimiza el tiempo de ciclo de la línea y el espacio máximo requerido por las estaciones simultáneamente (modelo TSALBP-c/A_erg); un modelo que, además de minimizar el tiempo de ciclo de la línea, también minimiza el riesgo ergonómico medio (modelo TSALBP-c/R_erg); y un modelo que minimiza el área máxima requerida y el riesgo ergonómico medio de las estaciones. La formulación matemática de estos modelos es la siguiente:

TSALBP-m/c_erg

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_2 = c) \quad (4.45)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.46)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.47)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.48)$$

$$R_{\phi}^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_{\phi}^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.49)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.50)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.51)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.52)$$

En el modelo, (4.45) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m) y el tiempo de ciclo (c).

TSALBP-m/A.erg

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_3 = A) \quad (4.53)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.54)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.55)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.56)$$

$$R_{\phi}^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_{\phi}^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.57)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.58)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.59)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.60)$$

En el modelo, (4.53) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m) y el área lineal requerida para cada estación (A).

TSALBP-m/R.erg

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}) \quad (4.61)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.62)$$

$$R_\phi - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.63)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.64)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.65)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.66)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.67)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.68)$$

En el modelo, (4.61) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m) y riesgo ergonómico medio agregado del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo (R).

TSALBP-c/A_erg

$$(Min \ z_2 = c) \wedge (Min \ z_3 = A) \quad (4.69)$$

Satisfaciendo:

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.70)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.71)$$

$$R_\phi^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_\phi^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.72)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.73)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.74)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.75)$$

En el modelo, (4.69) expresa la minimización simultánea del tiempo de ciclo (c) y el área lineal requerida para cada estación (A).

TSALBP-c/R_erg

$$(Min \ z_2 = c) \wedge (Min \ z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}) \quad (4.76)$$

Satisfaciendo:

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.77)$$

$$R_{\phi} - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.78)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.79)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.80)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.81)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.82)$$

En el modelo, (4.76) expresa la minimización simultánea del tiempo de ciclo (c) y riesgo ergonómico medio agregado del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo (R).

TSALBP-A/R_erg

$$(Min \ z_3 = A) \wedge (Min \ z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}) \quad (4.83)$$

Satisfaciendo:

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.84)$$

$$R_\phi - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.85)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.86)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.87)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.88)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.89)$$

En el modelo, (4.83) expresa la minimización simultánea del área lineal requerida para cada estación (A) y riesgo ergonómico medio agregado del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo (R).

Nótese, que las restricciones de todos los modelos bi-objetivo coinciden con las restricciones de sus referentes modelos mono-objetivo.

MODELOS TRI-OBJETIVO

Por otro lado, si en lugar de optimizar dos de los atributos considerados en la familia TSALBP_erg, optimizamos tres, tenemos 4 nuevos modelos matemáticos, en función de la combinatora de los atributos, número de estaciones, tiempo de ciclo, área lineal y riesgo ergonómico, en grupos de tres.

TSALBP-m/c/A_erg

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_2 = c) \wedge (Min \ z_3 = A) \quad (4.90)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.91)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.92)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.93)$$

$$R_{\phi}^{min} \leq \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} x_{j,k} \leq R_{\phi}^{max} \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.94)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.95)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.96)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.97)$$

En el modelo, (4.90) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m), del tiempo de ciclo (c) y el área lineal requerida para cada estación (A).

TSALBP-m/c/R_erg

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_2 = c) \wedge (Min \ z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}) \quad (4.98)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.99)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.100)$$

$$R_{\phi} - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.101)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \leq A \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.102)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.103)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.104)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.105)$$

En el modelo, (4.98) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m), el tiempo de ciclo (c) y riesgo ergonómico medio agregado del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo (R).

TSALBP-m/A/R_erg

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_3 = A) \wedge (Min \ z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}) \quad (4.106)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.107)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.108)$$

$$R_{\phi} - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.109)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.110)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.111)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.112)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.113)$$

En el modelo, (4.106) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m), el área lineal requerida para cada estación (A) y riesgo ergonómico medio agregado del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo (R).

TSALBP-c/A/R_erg

$$(\text{Min } z_2 = c) \wedge (\text{Min } z_3 = A) \wedge (\text{Min } z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}) \quad (4.114)$$

Satisfaciendo:

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.115)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.116)$$

$$R_{\phi} - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.117)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \leq c \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.118)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad j = 1, \dots, |J| \quad (4.119)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.120)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.121)$$

En el modelo, (4.114) expresa la minimización simultánea del tiempo de ciclo (c), el área lineal requerida para cada estación (A) y riesgo ergonómico medio agregado del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo (R).

Tal como pasaba en los modelos bi-objetivo, las restricciones de los modelos tri-objetivo coinciden con las restricciones de sus referentes con un sólo criterio de optimización.

MODELOS TETRA-OBJETIVO

Finalmente, considerando los cuatro atributos conjuntamente, podemos definir un modelo tetra-objetivo, con el que se optimizan de forma simultánea el número de estaciones, el tiempo de ciclo de la línea, el área lineal máxima del conjunto de estaciones y el máximo riesgo ergonómico medio del conjunto de factores analizados.

TSALBP-m/c/A/R_erg

$$(Min \ z_1 = m) \wedge (Min \ z_2 = c) \wedge (Min \ z_3 = A) \wedge (Min \ z_4 = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}) \quad (4.122)$$

Satisfaciendo:

$$m - \sum_{k=1}^{m_{max}} k \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.123)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.124)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.125)$$

$$R_{\phi} - \sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad (\phi = 1, \dots, |\Phi|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.126)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} x_{j,k} = 1 \quad j = 1, \dots, |J| \quad (4.127)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.128)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{max}) \quad (4.129)$$

En el modelo, (4.122) expresa la minimización simultánea del número de estaciones de trabajo (m), el tiempo de ciclo (c), el área lineal requerida para cada estación (A) y riesgo ergonómico medio agregado del conjunto de factores Φ para cada estación de trabajo (R).

4.2.3. Ejemplo ilustrativo

Para ilustrar el efecto de la incorporación de las limitaciones del riesgo ergonómico al que están expuestos los trabajadores dentro de los problemas de equilibrado de líneas de montaje, utilizamos el siguiente ejemplo:

Dado un conjunto de ocho tareas ($|J| = 8$), con sus tiempos de operación, t_j ($j = 1, \dots, |J|$), espacios requeridos, a_j ($j = 1, \dots, |J|$), categorías de riesgo ergonómico χ_j ($j = 1, \dots, |J|$) y el grafo de precedencia que se muestra en la Figura 4.2, cada tarea debe ser asignada a una estación de forma que se satisfagan las siguientes limitaciones:

- Ninguna estación puede superar el tiempo de ciclo $c = 20$ s.
- Ninguna área lineal requerida por una estación debe ser mayor al área lineal disponible para cada estación $A = 20$ dm.
- Ninguna estación con riesgo ergonómico para un factor físico puede superar el máximo permitido $R^{max} = 60$ ergo-segundos (e-s)³.

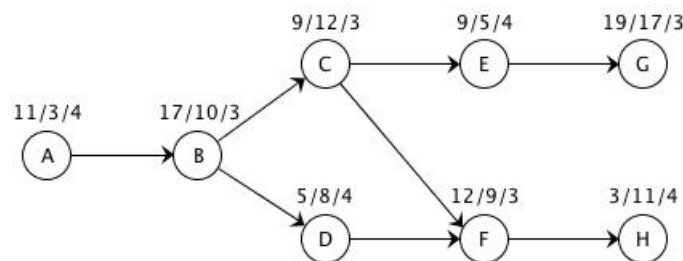


Figura 4.2: Grafo de precedencias. Cada vértice representa una tarea caracterizada por la terna tiempo de proceso (t_j) / área requerida (a_j) y categoría de riesgo asociada a un único factor de riesgo (χ_j).

En efecto, si consideramos el modelo SALBP-1, que minimiza el número de estaciones de trabajo, m , dado un valor fijo de tiempo de ciclo ($c = 20$ s), obtenemos como solución $m = 5$ estaciones de trabajo (ver Figura 4.3).

³Un ergo-segundo (e-s) es la unidad de tiempo, medida en segundos, que se utiliza para evaluar el riesgo ergonómico de una tarea, en relación a un tiempo de proceso de 1 segundo a actividad normal, con categoría 1 de riesgo ergonómico. Por lo tanto, esta escala mide el tiempo que los trabajadores necesitan para ejecutar la tarea (a actividad normal), teniendo en cuenta el nivel de riesgo ergonómico al que están expuestos.

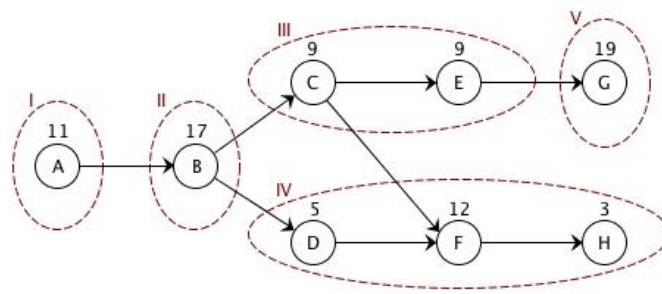
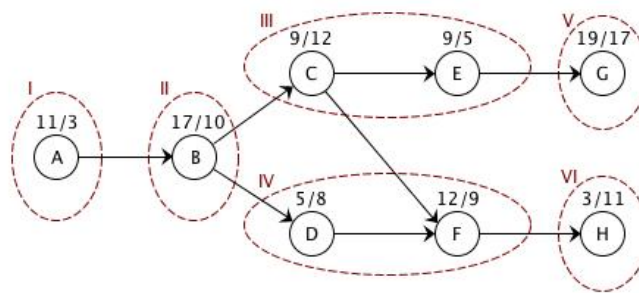


Figura 4.3: Solución obtenida para el modelo SALBP-1.

Por otro lado, si tenemos en cuenta el modelo TSALBP- m , que minimiza el número de estaciones de trabajo, m , dado un valor fijo de tiempo de ciclo ($c = 20$ s) y una área lineal disponible para cada estación de trabajo ($A = 20$ dm), podemos ver que el número de estaciones de trabajo obtenido supera el encontrado en el modelo SALBP-1 en una sola unidad ($m = 6$) (ver Figura 4.4).

Figura 4.4: Solución obtenida para el modelo TSALBP- m .

Finalmente, si consideramos la categoría del factor de riesgo, χ_j , y el tiempo de operación, t_j , como se muestra en la ecuación (4.3) podemos obtener el riesgo ergonómico asociado a cada tarea R_j ($j = 1, \dots, |J|$) (ver Tabla 4.2).

Tarea	A	B	C	D	E	F	G	H
t_j	11	17	9	5	9	12	19	3
χ_j	4	3	3	4	4	3	3	4
R_j	44	51	27	20	36	36	57	12

Tabla 4.2: Riesgo ergonómico.

Así, dado el riesgo asociado a cada tarea para un único factor de riesgo, podemos resolver el TSALBP- m .erg. Este modelo minimiza el número de estaciones, m , dado un valor fijo de tiempo de ciclo ($c = 20$ s), una área lineal disponible para cada estación de trabajo ($A = 20$ dm) y un riesgo

ergonómico máximo para cada estación ($R_{max} = 60 e-s$) (ver Figura 4.5).

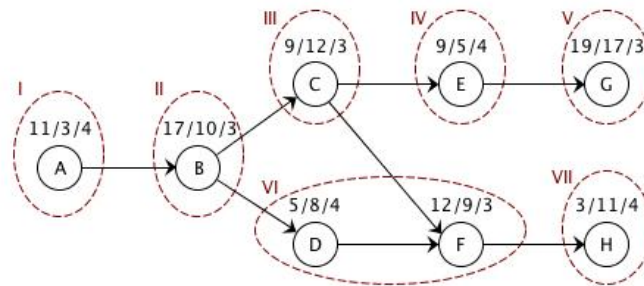


Figura 4.5: Solución obtenida para el modelo TSALBP-m_erg

En la solución que ofrece el modelo TSALBP-m_erg observamos que sólo dos tareas pueden ser agrupadas en una sola estación ($R(S_{VI}) = R_D + R_F = 20 + 36 = 56 \leq 60 e - s$), obteniendo como resultado $m = 7$ estaciones de trabajo.

En definitiva, como se puede ver en el ejemplo, dependiendo de las limitaciones que consideremos, el resultado del número de estaciones será uno u otro. Obviamente, a mayor número de factores condicionantes, mayor número de estaciones de trabajo.

4.3. Agregación de tareas elementales en bloques

4.3.1. Justificación

Por lo general, cientos y hasta miles de tareas elementales ($j \in J$) son desarrolladas en la fabricación de unidades en las líneas de montaje en el sector de la industria de automoción; sólo el montaje de motores en la línea supone 400 tareas elementales. Este gran volumen de toda esta información dificulta la agregación de estas tareas en las estaciones de trabajo, a menos que tengamos disponible un método razonable para su agregación.

En el entorno objeto de estudio, existen subconjuntos de tareas que pueden ser agrupadas de forma natural, ya sea porque deben hacerse, o bien por ser aconsejable, su realización de forma consecutiva. En cualquier caso, antes de equilibrar, sería conveniente una agregación previa de las tareas para simplificar el problema real y por lo tanto, resolverlo en dos fases: (1) creación de bloques de tareas y (2) equilibrado de líneas de estos bloques de tareas.

Obviamente, no todas las agregaciones serán posibles, pues se deberán respetar las reglas de precedencias impuestas por el propio proceso de montaje o fabricación. Por ello, proponemos los siguientes modelos de factibilidad, que resultarán útiles cuando no haya un procedimiento au-

tomático disponible para crear bloques de tareas.

4.3.2. Modelos de agregación ($M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R_{\phi}^{max})$ y $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R^{med})$).

Para la agregación de tareas elementales en bloques de tareas consideramos dos posibles vías de acción. Por un lado, la agregación manual de las tareas y su posterior comprobación en cuanto a precedencias de tareas y atributos. Y, por otro parte, una agregación automática mediante la optimización de algún criterio.

Así, en primer lugar proponemos un modelo de factibilidad, $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R_{\phi}^{max})$ que comprueba si una agrupación, establecida a priori, cumple las características del problema, en cuanto a tiempos, espacio, riesgos y orden de las tareas. A continuación se presentan los parámetros adicionales y las variables de dicho modelo.

Parámetros

\mathcal{H}	Conjunto de bloques de tareas ($h = 1, \dots, \mathcal{H} $).
T_h^{max}	Tiempo de proceso máximo para el bloque de tareas h ($h = 1, \dots, \mathcal{H} $).
A_h^{max}	Espacio o área lineal disponible máxima para el bloque de tareas h ($h = 1, \dots, \mathcal{H} $).
$R_{\phi,h}^{max}$	Riesgo ergonómico máximo para el bloque de tareas h ($h = 1, \dots, \mathcal{H} $) asociado al factor de riesgo ϕ ($\phi = 1, \dots, \Phi $).
$x_{j,h}^{\circ}$	Asignación de la tarea elemental j ($j = 1, \dots, J $) al bloque de tareas h ($h = 1, \dots, \mathcal{H} $). Parámetro binario con lógica positiva.

Variables

$x_{j,h}$	Variable binaria igual a 1 si la tarea elemental j ($j = 1, \dots, J $) es asignada al bloque h ($h = 1, \dots, \mathcal{H} $), y 0 en caso contrario.
-----------	--

Y la formulación matemática del modelo $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R_{\phi}^{max})$ es:

$$x_{j,h} = x_{j,h}^{\circ} \quad (j = 1, \dots, |J|; h = 1, \dots, |\mathcal{H}|) \quad (4.130)$$

$$\sum_{h=1}^{|\mathcal{H}|} x_{j,h} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (4.131)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_{j,h} \geq 1 \quad (h = 1, \dots, |\mathcal{H}|) \quad (4.132)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,h} \leq T_h^{max} \quad (h = 1, \dots, |\mathcal{H}|) \quad (4.133)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,h} \leq A_h^{max} \quad (h = 1, \dots, |\mathcal{H}|) \quad (4.134)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,h} \leq R_{\phi,h}^{max} \quad (h = 1, \dots, |\mathcal{H}|; \phi = 1, \dots, |\Phi|) \quad (4.135)$$

$$\sum_{h=1}^{|\mathcal{H}|} h(x_{i,h} - x_{j,h}) \leq 0 \quad (1 \leq i; j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4.136)$$

En el modelo la igualdad (4.130) sirve para fijar valores a las variables de asignación preestablecidas, $x_{j,h}^0 (\forall j \in J, \forall h \in \mathcal{H})$, de tareas elementales a bloques de tareas sobre la que se desea conocer su factibilidad. La igualdad (4.131) garantiza que cada tarea elemental sólo pueda ser asignada a un bloque de tareas. Las restricciones (4.132) garantizan que ningún bloque de tareas esté vacío. Las restricciones (4.133), (4.134) y (4.135) sirven para establecer los límites de los tiempos de proceso, las áreas lineales requeridas y los riesgos ergonómicos de los bloques de tareas respectivamente. Finalmente, la restricción (4.136) mantiene la coherencia en el orden de prioridad de las tareas.

Aunque con el modelo anterior, podemos comprobar si una determinada agrupación de tareas elementales es factible o no, esto no garantiza que los bloques de tareas resultantes estén equilibrados con respecto a algún criterio. Por esta razón, proponemos otro modelo, el $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R^{med})$, con el que las tareas son agregadas en bloques, de tal manera que todos los bloques tengan un riesgo ergonómico similar. Los parámetros y variables adicionales del modelo son:

Parámetros

R_{ϕ}^{med}	Riesgo ergonómico medio generado por los conjuntos de tareas asignadas a cada bloque de tarea, bajo la perspectiva del factor ϕ ($\phi = 1, \dots, \Phi $). Esto es: $R_{\phi}^{med} = \frac{1}{ \mathcal{H} } \cdot \sum_{j=1}^{ J } R_{\phi,j}$
$R_{\phi,h}$	Riesgo ergonómico para el bloque de tarea h ($h = 1, \dots, \mathcal{H} $) en relación con el factor de riesgo ϕ ($\phi = 1, \dots, \Phi $). Esto es: $R_{\phi,h} = \sum_{j \in h} R_{\phi,j}$

Variables

$\delta_{\phi,h}^+(R)$	Variable real que mide la diferencia positiva entre $R_{\phi,h}$ y R_{ϕ}^{med} $\delta_{\phi,h}^+(R) = [R_{\phi,h} - R_{\phi}^{med}]^+ \quad (h = 1, \dots, \mathcal{H} ; \phi = 1, \dots, \Phi).$
$\delta_{\phi,h}^-(R)$	Variable real que mide la diferencia positiva entre R_{ϕ}^{med} y $R_{\phi,h}$ $\delta_{\phi,h}^-(R) = [R_{\phi}^{med} - R_{\phi,h}]^+ \quad (h = 1, \dots, \mathcal{H} ; \phi = 1, \dots, \Phi).$

Y el modelo $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R^{med})$ es:

$$Min \Delta_R(R) = \sum_{h=1}^{|\mathcal{H}|} \left[\sum_{\phi=1}^{|\Phi|} [\lambda_{\phi} [\delta_{\phi,h}^+(R) + \delta_{\phi,h}^-(R)]] \right] \quad (4.137)$$

Sujeto de (4.131) a (4.136) del modelo $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R_{\phi}^{max})$.

$$\sum_{j=1}^{|\mathcal{J}|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,h} - \delta_{\phi,h}^+(R) + \delta_{\phi,h}^-(R) = R_{\phi}^{med} \quad (\forall \phi \in \Phi), (\forall h \in \mathcal{H}) \quad (4.138)$$

$$x_{j,h} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |\mathcal{J}|; h = 1, \dots, |\mathcal{H}|) \quad (4.139)$$

En el modelo, la función objetivo $\Delta_R(R)$ representa la minimización de discrepancia global entre el valor real y medio del riesgo ergonómico agregado para los bloques de tarea, siendo λ_{ϕ} un coeficiente escalar asociado al factor de riesgo $\phi \in \Phi$, con valores comprendidos entre 0 y 1 y satisfaciendo, $\sum_{\phi \in \Phi} \lambda_{\phi} = 1$ y $\lambda_{\phi} \geq 0 \quad (\forall \phi \in \Phi)$.

Cabe destacar que el último modelo aquí descrito, sirve tanto para: (1) simplificar el número de tareas elementales en bloques de tareas, para su posterior equilibrado en la línea y; (2) para equilibrar la línea, siempre y cuando el número de bloques de tareas fijados se corresponda con el número de estaciones de la línea.

Además, la agrupación de tareas en bloques también podría hacerse con el fin de equilibrar los bloques en cuanto al tiempo de proceso o en cuanto al área requerida por el conjunto de tareas que tengan asignadas.

4.4. Experiencia computacional con modelos de agregación

4.4.1. Conjunto de datos

Basaremos nuestro estudio en una línea de montaje de productos mixtos de la planta Nissan en Barcelona. En concreto, en esta línea se ensamblan nueve tipos de motores (p_1, \dots, p_9) con diferentes destinos y propiedades. Estos tipos de motores se agrupan en tres clases, en función del tipo de vehículo en el que se integren. Así, tenemos motores para vehículos 4 x 4 (p_1, \dots, p_3); motores para furgonetas (p_4, p_5); y motores para camiones de medio tonelaje (p_6, \dots, p_9).

Lógicamente, dada una demanda global, la demanda de cada uno de los nueve tipos de motores no es homogénea a lo largo del tiempo y no es igual para cada uno de ellos. Por lo tanto, aunque la capacidad diaria se mantenga lo más constante posible (siendo en nuestro caso, una demanda diaria de 270 motores), la línea debe ser capaz de adaptarse a los diversos planes de demanda, en los que las demandas parciales de cada tipo de motor son diferentes. Por esta razón, se han utilizado varias instancias correspondientes a diferentes mixes de producción para resolver los 3 tipos de problemas, SALBP-1, TSALBP-m y el TSALBP-m.erg.

Cada uno de estos programas de producción corresponden a un conjunto de tiempos medios de operación (Chica *et al.*, 2012), ponderados por la demanda de los nueve tipos de motor. Resumiendo, el cambio en el mix de producción afecta a la duración ponderada de cada operación involucrada en el proceso por lo que puede requerir un reajuste de la línea.

En concreto, para el estudio se han seleccionado nueve mixes de producción (ver Tabla 4.3) de las 23 instancias disponibles (ver tabla 7 de Bautista *et al.* (2012)). Para cada uno de estos nueve mixes de producción seleccionados, se determinarán los tiempos de proceso medios de cada una de las 140 operaciones, en función de la composición de cada plan.

Familia		Plan de demanda									
		1	2	3	6	9	10	11	12	18	
4x4	p_1	30	30	10	50	70	10	10	24	60	
	p_2	30	30	10	50	70	10	10	23	60	
	p_3	30	30	10	50	70	10	10	23	60	
Furgonetas	p_4	30	45	60	30	15	105	15	45	30	
	p_5	30	45	60	30	15	105	15	45	30	
Camiones de mediano tonelaje	p_6	30	23	30	15	8	8	53	28	8	
	p_7	30	23	30	15	8	8	53	28	8	
	p_8	30	22	30	15	7	7	52	27	7	
	p_9	30	22	30	15	7	7	52	27	7	

Tabla 4.3: Composición, por tipo de motor (p_1, \dots, p_9), de los planes o mixes de producción utilizados.

Dada la dureza del problema, para obtener la solución de los modelos SALBP-1, TSALBP-m y TSASALBP-m_erg en unos tiempos razonables dentro de un entorno industrial, resolveremos el conjunto de instancias en dos fases, una agregación de tareas en meta-operaciones y la resolución de los modelos; considerando, en todos los casos, únicamente el factor de riesgo físico (χ_j).

En primer lugar, agregamos el conjunto de 140 operaciones, derivadas de 378 tareas elementales (Chica *et al.*, 2010) en 36 meta-operaciones.⁴

En concreto, se han tenido en cuenta 2 conjuntos de bloques de tareas u operaciones. El conjunto \mathcal{H}_1 (Tabla 4.4) agregación realizada como resultado de la configuración de las estaciones para la mejor solución del TSALBP-m (modelo definido en el Capítulo 2, Sección 2.2, Subsección 2.2.2) y comprobada mediante el modelo de factibilidad $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R^{med})$; y el conjunto \mathcal{H}_2 (Tabla 4.5) agregación realizada a través del modelo $M_Block_ (T^{max}, A^{max}, R^{med})$.

h	$j \in h \subseteq \mathcal{H}_1$	h	$j \in h \subseteq \mathcal{H}_1$
1	1, 5, 9	19	68
2	3, 8, 10, 11, 13, 14, 20	20	69, 70, 71, 72, 73
3	7	21	74, 75, 76, 77, 78, 79, 80
4	4, 15, 18, 19	22	81, 82, 83, 84, 86
5	6, 12, 16, 17, 21	23	85, 87, 88, 91
6	22, 26, 27	24	89, 90, 92, 99
7	23, 24, 25, 28	25	93, 94
8	29, 30, 31, 32	26	95, 96, 97
9	2	27	98, 100, 101, 102, 103, 106
10	33	28	104
11	34, 35, 36, 37, 38, 40	29	105, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116
12	39, 42, 43	30	107
13	41, 59	31	117, 118, 119, 120, 128
14	44, 45, 46, 47, 49, 60	32	121, 122
15	48, 51	33	131, 132, 134
16	50, 52, 53, 54, 55, 56, 57	34	123, 124, 125, 126
17	58, 63, 64	35	127, 129, 130, 133, 135, 136, 137
18	61, 62, 65, 66, 67	36	138, 139, 140

Tabla 4.4: Conjunto de 36 bloques de tareas de \mathcal{H}_1 .

⁴En nuestro caso de estudio, una meta-operación es un conjunto de operaciones agregadas, cuya suma de tiempos de proceso no supera el tiempo de ciclo de la línea objeto de estudio, $c = 180 s$, cuya suma de áreas no superen el área máxima de la línea, $A = 400 cm$ y considerando, en todo momento, los vínculos de precedencia y/o sucesión entre las tareas elementales.

h	$j \in h \subseteq \mathcal{H}_2$	h	$j \in h \subseteq \mathcal{H}_2$
1	1, 9, 10	19	67, 68, 71
2	5, 7, 8, 11, 13	20	69, 70, 72, 73
3	3, 14, 15, 16, 18, 19, 20	21	74, 75, 76, 77, 78, 79
4	17, 21	22	80, 81, 82, 83, 84, 85
5	4, 22, 23, 24, 26, 27	23	87, 88, 90
6	25, 28, 29, 30	24	86, 89, 91
7	6, 31, 32, 35, 36	25	92, 99
8	33, 34, 37	26	94, 98
9	2, 39, 40	27	93, 100, 101, 102, 103
10	38, 42, 43, 60	28	95, 104, 106, 108, 110, 113
11	41	29	105, 109, 112, 114, 115
12	44, 45, 46	30	107, 111, 116, 119
13	12, 48, 49, 59	31	117, 118, 131
14	47, 55	32	97, 120, 121, 132
15	52, 53, 56	33	122, 123, 124, 125, 126, 127, 134, 135
16	50, 51, 54	34	128, 129, 130
17	57, 58, 61	35	136, 137, 138, 139
18	62, 63, 64, 65, 66	36	96, 133, 140

Tabla 4.5: Conjunto de 36 bloques de tareas de \mathcal{H}_2 .

Para la resolución de los diferentes modelos con los diferentes mixes de producción se utilizó el solver CPLEX v11.0 (single-processor license) ejecutado en un equipo con un MacPro 3.0 Intel Xeon GHz y 2 GB de RAM con Windows XP sin límite en el tiempo de CPU.

4.4.2. Evaluación del número de estaciones en función del mix de producción y del Riesgo máximo, R_{ϕ}^{max} .

Tras reducir el conjunto de datos de 140 operaciones a 36 meta-operaciones, por medio de los modelos de agregación de tareas, se resuelve el modelo TSALBP-m_erg con el plan de producción correspondiente al *Mix1* (Tabla 4.3), para cada uno de los conjuntos de bloques obtenidos. Esta parte de la experiencia computacional se realizó considerando los siguientes valores de los parámetros:

- $c = 180$ s;
- $A = 400$ cm;
- $R^{max} = \{320, 325, 330, 335, 340, 345, 350, 355, 360\}$ e-s (lo que equivale a una categoría de riesgo comprendida entre $[1,8 - 2]$; Consideración de un único factor de riesgo, el físico (χ_j).

De esta manera pudimos evaluar la influencia de las restricciones del riesgo ergonómico, asociado al factor físico, sobre el número de estaciones de la línea. Los resultados se muestran en la Tabla 4.6.

R	360	355	350	345	340	335	330	325	320
$m(\mathcal{H}_1)$	24	24	25	-	-	-	-	-	-
$m(\mathcal{H}_2)$	27	27	28	28	32	32	33	35	36

Tabla 4.6: Número de estaciones de trabajo obtenidas para $TSALBP-m_{erg}$ para los conjuntos \mathcal{H}_1 y \mathcal{H}_2

En la Tabla 4.6 se puede ver que el número de estaciones de trabajo aumenta cuando se reduce el riesgo ergonómico máximo permitido. Además, se observa que para el primer grupo de tareas elementales, \mathcal{H}_1 , agregadas sin tener en cuenta los criterios de los atributos, no hay solución posible cuando la limitación del riesgo ergonómico es inferior a 350 $e-s$, sin embargo, para el segundo conjunto \mathcal{H}_2 , encontramos una solución para todos los valores analizados.

Examinando el impacto que supone la reducción de los riesgos ergonómicos en la línea de montaje observamos que éste es muy significativo ya que si queremos mejorar la calidad de los empleos, la línea de montaje debe ser reconfigurada. Si estimamos que la pérdida de un motor supone un coste de 4.000 €, el tiempo de ciclo es de 180 y hay dos turnos de trabajo en un día, dicha reconfiguración representa un costo de alrededor de 1,3 millones de euros por pérdidas en las denominadas rampas cada vez que realizamos un nuevo equilibrado de la línea. Si consideramos que el beneficio dado por la línea es el 10 % sobre el valor de un motor, entonces las pérdidas son de 130.000 euros por equilibrado.

Debido a las bajas categorías de riesgo asumidas en la comparación de los resultados, obtenidos con los diferentes modelos de equilibrado, para cada uno de los bloques obtenidos; y debido también, a los mejores resultados obtenidos con el conjunto de bloque \mathcal{H}_1 cuando el riesgo máximo permitido aumenta; a continuación evaluamos los resultados de los tres modelos, dado el conjunto de datos \mathcal{H}_1 , para cada uno de los nueve planes de producción seleccionados (Tabla 4.3) y para un riesgo ergonómico de 465 $e - s$ (equivalente a una categoría de 2,6).

De esta manera, pudimos analizar el efecto que tiene la incorporación de atributos limitantes a las líneas y la composición del plan de producción sobre el número de estaciones de la línea, así como también, la reducción de dicho número al considerar un riesgo ergonómico mayor.

	Plan de demanda								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18
<i>SALBP-1</i>	19	20	20	19	19	20	20	20	19
<i>TSALBP-m</i>	21	21	21	21	21	21	21	21	21
<i>TSALBP-m_erg</i>	22	23	23	23	23	23	22	23	23

Tabla 4.7: Número de estaciones de trabajo obtenidas para SALBP-1, TSALBP-m y TSALBP-m_erg, dado el conjunto \mathcal{H}_1 y un riesgo máximo de $465 e - s$.

En la Tabla 4.7 se puede observar el número de estaciones de trabajo obtenidas para cada uno de los 3 problemas propuestos de equilibrado de líneas, descritos en esta tesis. Al igual que los resultados anteriores, éstos nos muestran cómo la adición de limitaciones en los modelos influye en el número de estaciones obtenidas. Es por ello, que si tenemos en cuenta sólo la restricción del tiempo de ciclo $c = 180 s$, obtenemos un número de estaciones de trabajo de 19 a 20 dependiendo del plan de producción utilizado. Por otra parte, si consideramos un área lineal máxima disponible de $A = 400 cm$ para el conjunto de meta-operaciones asignadas a una estación, el número de estaciones pasa a ser 21, dependiendo del mix de producción, aumentando en 1 o 2 estaciones la configuración de la línea obtenida con el modelo SALBP-1. Finalmente, si además del tiempo de ciclo y del área lineal máxima disponible, consideramos que el conjunto de meta-operaciones asignadas a una estación no puede superar un riesgo ergonómico máximo de $R^{max} = 465 e-s$ obtenemos un resultado de 22 y 23 estaciones de trabajo.

Por otro lado, si analizamos el número de estaciones obtenidas (Tabla 4.7) en función del mix de producción encontramos, por ejemplo, que para el *Mix1* el resultado alcanzado con el modelo SALBP-1 es de 19 estaciones de trabajo, mientras que para el modelo TSALBP-m_erg es de 22 estaciones de trabajo. Sin embargo, si consideramos el *Mix2*, obtenemos como solución 20 y 23 estaciones de trabajo, respectivamente.

Del mismo modo, a pesar de que en ocasiones el número de estaciones, dado un plan de producción u otro, coincide, la configuración de la estación de trabajo no es necesariamente la misma. La Tabla 4.8 muestra cómo la asignación, de las meta-operaciones a las estaciones de trabajo de la línea, obtenida con cada uno de los tres modelos, difiere de un mix a otro, independientemente de que el número de estaciones obtenido sea el mismo o no. En efecto, si nos fijamos en el *Mix1* y *Mix6* vemos cómo, en el caso del SALBP-1, la meta-operación 25 pertenece a la estación $k = 17$, cuando se considera el *Mix1*; mientras que, en el *Mix6*, dicha operación está asignada a la estación $k = 16$. Para el modelo TSALBP-m ocurre lo mismo para la meta-operación 28, que es asignada a la estación $k = 16$ para el *Mix1* y en la $k = 17$ para el *Mix6*. Finalmente, para el modelo TSALBP-m_erg, la configuración de la línea presenta más diferencias en función del mix, las estaciones 3, 6,

7, 13, 17, 19, 20, 21, 22, 23 y 24 tienen variaciones de la carga de trabajo cuando pasamos del *Mix1* al *Mix6*.

<i>Meta</i> <i>operación</i>	<i>SALBP-1</i>		<i>TSALBP-m</i>		<i>TSALBP-m_erg</i>	
	k_{Mix1}	k_{Mix6}	k_{Mix1}	k_{Mix6}	k_{Mix1}	k_{Mix6}
1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	6	3
4	3	3	3	3	3	3
5	4	4	4	4	4	4
6	5	5	5	5	5	5
7	5	5	5	5	5	5
8	5	5	6	6	6	6
9	19	19	6	6	13	6
10	6	6	7	7	6	7
11	6	6	7	7	7	7
12	6	6	8	8	8	8
13	7	7	8	8	8	8
14	7	7	9	9	9	9
15	8	8	9	9	10	10
16	8	8	10	10	11	11
17	9	9	10	10	12	12
18	9	9	11	11	12	13
19	10	10	11	11	13	13
20	10	10	12	12	14	14
21	11	11	13	13	15	15
22	11	11	14	14	16	16
23	12	12	14	14	16	16
24	12	12	15	15	17	17
25	17	16	15	15	17	24
26	19	19	15	15	21	24
27	13	13	16	16	18	18
28	14	14	16	17	19	19
29	14	14	17	17	19	19
30	14	14	17	17	19	20
31	15	15	18	18	20	20
32	15	15	18	18	21	20
33	16	16	19	19	22	21
34	16	16	19	19	22	21
35	17	17	20	20	23	22
36	18	18	21	21	24	23
<i>m</i>	19	19	21	21	24	24

Tabla 4.8: Configuraciones obtenidas con los modelos SALBP-1, TSALBP-m y TSALBP-m_erg, con $c = 180$ s, $A = 400$ cm y $R^{max} = 360$ e - s, dado el conjunto \mathcal{H}_1 , para el *Mix1* y 6.

Por último, teniendo en cuenta la variación del número de estaciones en función del riesgo ergonómico, para los tres modelos, para cada uno de los conjuntos de meta-operaciones y para riesgos comprendidos entre $360 - 320 e - s$; a continuación analizamos dicha variación, considerando únicamente el modelo *TSALBP-m.erg* (propuesto en esta tesis). En concreto, lanzamos el modelo con los 9 mixes de producción y riesgos comprendidos entre $360 - 540 e - s$ y los resultados obtenidos fueron los siguientes (ver Tabla 4.9):

R^{max}	Planes de producción									
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	
360	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
435	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
450	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
460	24	24	24	24	24	23	24	24	24	
465	22	23	23	23	23	23	22	23	23	
480	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
510	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
525	21	22	22	22	22	22	21	22	22	
530	21	21	21	21	21	22	21	21	21	
540	21	21	21	21	21	21	21	21	21	

Tabla 4.9: Número de estaciones de trabajo requeridas para el modelo *TSALBP-m.erg* con un tiempo de ciclo de $180 s$, un área lineal disponible de $400 cm$ y diferentes riesgos ergonómicos máximos R^{max} .

En particular, se observa que para un riesgo ergonómico máximo permitido de $360 e-s$ (que es el equivalente a un nivel máximo de intensidad o categoría para el factor de riesgo de 2 en todas las estaciones de trabajo) el número de estaciones de trabajo es de 24, para todos los planes de demanda estudiados, al igual que ocurría al considerar un riesgo de $355 e - s$ (Tabla 4.7). Sin embargo, cuando el riesgo ergonómico máximo es mayor, el número de estaciones decrece (por ejemplo para el $R^{max} = 480 e-s$ se obtienen 22 estaciones de trabajo para cada mix).

Por otra parte, la variación del número de estaciones de trabajo no es homogénea para todos los programas de producción. En efecto, se obtiene un número diferente de estaciones para determinados niveles de riesgo máximos. Por ejemplo, para $R^{max} = 525 e-s$ se requieren 21 estaciones para los *Mix1* y *Mix11*, mientras que para el resto de mixes, se requieren 22 estaciones; cuando $R^{max} = 530 e - s$, son necesarias 21 estaciones para todos los planes de producción, exceptuando el *Mix10*, que requiere 22 estaciones.

4.5. Resumen y conclusiones

En este capítulo hemos propuesto una extensión a la familia TSALBP-m, incorporando restricciones de riesgo ergonómico, definiendo dicho riesgo a partir de su categoría y de la duración de la tarea. Como resultado, obtenemos un nuevo modelo, TSALBP_erg compuesto por 16 tipologías distintas, que nos permite limitar, inferior y superiormente, el riesgo ergonómico asociado a la carga de trabajo asignada a una estación.

Estos modelos nos permiten observar como, dependiendo de las limitaciones a considerar, la línea posee un número menor o mayor de estaciones de trabajo.

No obstante, nos encontramos con la dificultad de trabajar con un gran número de tareas elementales en la línea de montaje. Por ello, proponemos dos modelos que permiten, por una parte, crear bloques de tareas para simplificar el problema real, y por otra, equilibrar la línea de dichos bloques de tareas otorgando, a cada bloque, un riesgo ergonómico similar.

Estudiando un caso de equilibrado de línea hemos observado que el impacto de la reducción de los riesgos ergonómicos en la línea de montaje es muy significativo. Si queremos mejorar la calidad de los empleados, la línea de montaje debe ser reconfigurada.

Si tenemos en cuenta que la pérdida de un motor supone un coste de 4.000 euros, el tiempo de ciclo es de 180 s, que existen dos turnos de trabajo en un día y que la reconfiguración de la línea tarda hasta dos semanas para alcanzar de nuevo el equilibrio de la línea, la reconfiguración, representa un costo de alrededor de 1,3 millones de euros por todas las pérdidas que supone la denominada la rampa de salida. Si consideramos que la línea representa el 10 % del producto, la pérdidas monetarias en cada equilibrado ascienden a 130.000€.

Una vez reducido el conjunto de datos (de 140 operaciones a 36 meta-operaciones), centramos el análisis en dos puntos, por una parte la variación del número de estaciones requeridas por el equilibrado de la línea y, por otra, la variación de la asignación de tareas a las estaciones de trabajo en función de dos factores: la variación de la demanda de motores y la variación del límite superior del riesgo ergonómico. El resultado obtenido nos permitió observar que la variación del mix de motores (con una demanda total constante igual a 270 motores) influye en el requerimiento de recursos humanos y de espacio reflejándose en un incremento del orden del 5 % respecto a la situación inicial.

A su vez, la reducción del riesgo ergonómico supone un incremento de los recursos humanos y del espacio de alrededor del 15 %. Tanto la variación del mix como la reducción del riesgo obligan a la reordenación de los puestos de trabajo con los consiguientes costes operativos y de adiestramiento del personal.

CAPÍTULO 5

MODELOS DE EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE POR ATRIBUTOS TEMPORALES, ESPACIALES Y ERGONÓMICOS

A partir de los modelos matemáticos de la familia TSALBP y la unificación de métodos ergonómicos para evaluar los factores de riesgo, se analizan, en este apartado, nuevas alternativas para el equilibrio de las líneas de montaje.

5.1. Antecedentes

Dado el conjunto de tareas elementales J y el conjunto de estaciones de trabajo K , conociendo de antemano que los problemas de equilibrado de líneas de montaje consisten en establecer asignaciones de tareas $j \in J$ en dichas estaciones $k \in K$ de forma que se satisfaga un conjunto de restricciones tecnológicas, económicas y ergonómicas, atendiendo además, a alcanzar unos objetivos vinculados con la demanda del producto y diversos costes.

En nuestro enfoque distinguiremos los siguientes aspectos del problema:

- (1) Objeto del que se ocupa el equilibrado de líneas.
- (2) Atributos asociados a cada objeto del equilibrado.
- (3) Caracterización del equilibrado de líneas.
- (4) Tipología de las restricciones y funciones participantes en el problema.

En primer lugar, consideramos que el equilibrado puede tener por objetivo:

- (1) Tiempo de proceso de cargas en las estaciones.
- (2) Espacio concedido a los operarios para realizar su trabajo.
- (3) Riesgo de lesiones en función de cargas asignadas a las operaciones.

A cada uno de estos objetos de estudio se le puede asociar una serie de atributos. Por ejemplo, podemos encontrar atributos temporales tales como el tiempo de proceso de una tarea, el tiempo de ciclo (c), el tiempo de carga de una estación de trabajo o la discrepancia entre este tiempo y un valor ideal del tiempo de carga de trabajo. También tenemos los atributos espaciales del área que requiere cada zona; el área lineal disponible en una estación de trabajo, el área vinculada a la carga de trabajo de una estación y el mínimo número de estaciones. Finalmente, el objeto de este problema puede asociarse con atributos relacionados con los riesgos a lesiones tales como, la categoría de riesgo de la tarea, el tiempo de proceso y el riesgo ergonómico de una tarea o estación de trabajo.

En cuanto a las líneas de producción, éstas pueden equilibrarse por tres vías: (1) imponiendo condiciones a los atributos (temporales, espaciales y ergonómicos) (2) optimizando uno o más atributos y (3) empleando a la vez restricciones y criterios de optimización.

Por su parte, las limitaciones de los atributos de equilibrado responden a asignaciones, incompatibilidades, agrupaciones, ligaduras de precedencia tanto restricciones como funciones y limitaciones del valor de referencia de los atributos. Las funciones objetivo que propondremos, servirán para alcanzar un valor mínimo compatible de uno o más atributos vinculados al tiempo, al espacio y al riesgo (problema de compatibilidad), o bien, para obtener soluciones cuyos atributos se ajusten lo mejor posible a unos valores de referencia de éstos (problemas de ajuste).

Como comentario final sobre este punto, deberemos tener en cuenta que el sector de automoción en los países de la OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) presenta ciertas características que condicionan la utilidad de algunos modelos de equilibrado de líneas. Los modelos deben tener en cuenta que (1) las líneas en automoción están orientadas a productos mixtos (por ejemplo, motores), (2) las demandas parciales y globales de los productos varían con frecuencia a lo largo del año (en ocasiones cada mes), (3) los regímenes de contratación de las plantillas son poco flexibles en la OECD, lo cual es conveniente para mantener la fidelidad de los operarios a la empresa, y (4) la variación de la demanda de los productos genera nuevas asignaciones de tareas en los puestos de trabajo y esto supone el entreno de operarios, que puede durar

semanas hasta alcanzar el régimen permanente.

Por todo lo anterior, proponemos unos modelos de equilibrado con plantilla fija, lo cual equivale a considerar un número fijo de estaciones m , y realizar la explotación de dichos modelos considerando la variación de la demanda de los productos.

5.2. Nomenclatura

A continuación, antes de definir nuevas funciones para el equilibrado de líneas de montaje de productos mixtos y formular nuevos modelos matemáticos, se presentan los parámetros y variables utilizados en los modelos de equilibrado por atributos.

Parámetros	
J	Conjunto de tareas elementales ($j = 1, \dots, J $).
K	Conjunto de tareas elementales ($k = 1, \dots, K $).
m	Número de estaciones, $m = K $, fijo y conocido.
Φ	Conjunto de factores de riesgo ergonómico ($\phi = 1, \dots, \Phi $).
t_j	Tiempo de proceso de la tarea elemental $j \in J$ medido a actividad normal.
a_j	Espacio o área lineal requerida para el desempeño de la tarea $j \in J$.
$\chi_{\phi,j}$	Categoría del riesgo ergonómico asociada a la tarea $j \in J$ según el factor de riesgo $\phi \in \Phi$.
$R_{\phi,j}$	Riesgo ergonómico asociado a la tarea $j \in J$ según el factor de riesgo $\phi \in \Phi$.
P_j	Conjunto de tareas precedentes a la tarea $j \in J$.
T_k^{max}	Tiempo de proceso máximo a actividad normal concedido a la estación $k \in K$.
T^{med}	Tiempo de proceso medio a actividad normal que corresponde a cada estación para realizar una unidad de producto. $T^{med} = \frac{1}{ K } \sum_{j=1}^{ J } \cdot t_j$.
A_k^{max}	Espacio o área lineal máxima disponible en la estación $k \in K$.
A^{med}	Espacio o área lineal media que corresponde a cada estación para realizar las áreas. $A^{med} = \frac{1}{ K } \sum_{j=1}^{ J } \cdot a_j$.
$R_{\phi,k}^{max}$	Riesgo ergonómico máximo permitido en la estación $k \in K$ según el factor de riesgo $\phi \in \Phi$.
R_{ϕ}^{med}	Riesgo ergonómico medio que debe asumir cada estación según el factor de riesgo $\phi \in \Phi$. Esto es: $R_{\phi}^{med} = \frac{1}{ K } \sum_{j=1}^{ J } \cdot R_{\phi,j} \quad \forall \phi \in \Phi$.
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 0 en caso contrario.

S_k	Carga de la estación k : Conjunto de tareas asignadas a la estación $k \in K$: $S_k = \{j \in J : x_{j,k} = 1\}$.
$T(S_k)$	Tiempo de proceso requerido a actividad normal para ejecutar la carga S_k : $T(S_k) = \sum_{j \in S_k} t_j$.
$A(S_k)$	Espacio o área lineal requerida por la carga S_k : $A(S_k) = \sum_{j \in S_k} a_j$.
$R_\phi(S_k)$	Riesgo ergonómico según el factor $\phi \in \Phi$ asociado a la carga S_k : $R_\phi(S_k) = \sum_{j \in S_k} R_{\phi,j}$.
$\delta_k^+(T)$	Exceso de tiempo de proceso requerido en la estaciones $k \in K$ medido a actividad normal respecto al valor medio: $\delta_k^+(T) = [T(S_k) - T^{med}]^+$, con $[x]^+ = \max\{0, x\}$.
$\delta_k^-(T)$	Defecto de tiempo de proceso requerido en la estaciones $k \in K$ medido a actividad normal respecto al valor medio: $\delta_k^-(T) = [T^{med} - T(S_k)]^+$, con $[x]^+ = \max\{0, x\}$.
$\delta_k^+(A)$	Exceso de área (lineal) necesaria en la estación $k \in K$ respecto a su media: $\delta_k^+(A) = [A(S_k) - A^{med}]^+$.
$\delta_k^-(A)$	Defecto de área lineal necesaria en la estación $k \in K$ respecto a su media: $\delta_k^-(A) = [A^{med} - A(S_k)]^+$.
$\delta_{\phi,k}^+(R)$	Exceso de riesgo ergonómico en la estación $k \in K$ según el factor $\phi \in \Phi$ respecto a su media: $\delta_{\phi,k}^+(R) = [R_\phi(S_k) - R_\phi^{med}]^+$.
$\delta_{\phi,k}^-(R)$	Defecto de riesgo ergonómico en la estación $k \in K$ según el factor $\phi \in \Phi$ respecto a su media: $\delta_{\phi,k}^-(R) = [R_\phi^{med} - R_\phi(S_k)]^+$.
T_k^{max}	Tiempo de proceso máximo a actividad normal concedido a la estación $k \in K$.
A_k^{max}	Espacio o área lineal máxima disponible en la estación $k \in K$.
$R_{\phi,k}^{max}$	Riesgo ergonómico máximo permitido en la estación $k \in K$ según el factor de riesgo $\phi \in \Phi$.

Nótese que los parámetros T_k^{max} , A_k^{max} y $R_{\phi,k}^{max}$ también pueden ser considerados como variables.

A partir de los parámetros y variables presentados, se formularan las siguientes funciones y modelos matemáticos.

5.3. Funciones de equilibrado

Las funciones objetivo que se encuentran en la literatura sobre el problema de equilibrio de líneas son numerosas y tienen en cuenta diversos atributos (ver Battaia y Dolgui (2013)). En nuestro caso, consideramos tres tipos de atributos: temporales, espaciales y de riesgo ergonómico; y dos tipos

de funciones: de compatibilidad y de ajuste.

FUNCIONES ELEMENTALES DE COMPATIBILIDAD

Este tipo de funciones limitan los valores de los atributos. Tendremos, por tanto, tres funciones diferentes en relación a los atributos temporales, espaciales y ergonómicos.

En primer lugar, tenemos la función que limita el atributo temporal.

$$c = \max_{k \in K} (T_k^{max}) \quad (5.1)$$

Donde c es el tiempo de ciclo (a minimizar) y T_k^{max} es, en este caso, una variable real que representa el tiempo de proceso a actividad normal que necesita la estación $k \in K$ para realizar las tareas asignadas a ella (S_k). Para la función (5.1), $A_k^{max} (\forall k)$ y $R_{\phi,k} (\forall k, \forall \Phi)$ son considerados parámetros.

En segundo lugar, teniendo en cuenta el atributo espacial, definimos la función que limita el área lineal para las estaciones de trabajo.

$$A = \max_{k \in K} (A_k^{max}) \quad (5.2)$$

Donde A es el área lineal concedida a cada estación (a minimizar) y A_k^{max} es, en este caso, el área lineal requerida por la carga (S_k). Para la función (5.2), $T_k^{max} (\forall k)$ y $R_{\phi,k} (\forall k, \forall \Phi)$ son considerados parámetros.

Por último, tenemos la función para el riesgo ergonómico.

$$R = \max_{k \in K} \{ \max_{\phi \in \Phi} (R_{\phi,k}) \} \quad (5.3)$$

Donde R es el riesgo ergonómico (a minimizar) que no puede ser superado en ninguna estación $k \in K$ ni por ningún factor $\phi \in \Phi$, y $R_{\phi,k}$ es el riesgo ergonómico que genera la carga (S_k) según el factor ϕ . Para la función (5.3), $T_k^{max} (\forall k)$ y $A_k^{max} (\forall k)$ son considerados parámetros.

FUNCIONES ELEMENTALES DE AJUSTE

Su objeto es reducir las discrepancias entre los valores reales que toman los atributos, para una asignación de tareas a estaciones, y los valores ideales de referencia que se fijan a los atributos.

Cuando empleamos estas funciones como objeto a minimizar, T_k^{max} , $A_k^{max}(\forall k)$ y $R_{\phi,k}^{max}(\forall k, \forall \phi)$ se considerarán parámetros con valor conocido o prefijado.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las diferentes medidas según las distancias, rectangular, euclídea y cuadrática, proponemos las siguientes funciones de ajuste:

a) Funciones con atributos temporales

$$\Delta_R(T) = \sum_{k=1}^{|K|} [\delta_k^+(T) + \delta_k^-(T)] \quad (5.4)$$

$$\Delta_E(T) = \sum_{k=1}^{|K|} \sqrt{\delta_k^+(T)^2 + \delta_k^-(T)^2} \quad (5.5)$$

$$\Delta_Q(T) = \sum_{k=1}^{|K|} [\delta_k^+(T)^2 + \delta_k^-(T)^2] \quad (5.6)$$

Donde $\Delta_R(T)$, $\Delta_E(T)$ y $\Delta_Q(T)$ son las discrepancias globales, de los tiempos de carga de las estaciones de trabajo respecto al valor medio, medidas según las distancias rectangular, euclídea y cuadrática, respectivamente.

b) Funciones con atributos espaciales

$$\Delta_R(A) = \sum_{k=1}^{|K|} [\delta_k^+(A) + \delta_k^-(A)] \quad (5.7)$$

$$\Delta_E(A) = \sum_{k=1}^{|K|} \sqrt{\delta_k^+(A)^2 + \delta_k^-(A)^2} \quad (5.8)$$

$$\Delta_Q(A) = \sum_{k=1}^{|K|} [\delta_k^+(A)^2 + \delta_k^-(A)^2] \quad (5.9)$$

Donde $\Delta_R(A)$, $\Delta_E(A)$ y $\Delta_Q(A)$ son las discrepancias globales (rectangular, euclídea y cuadrática) de las áreas lineales requeridas por las cargas S_k en las estaciones de trabajo respecto a la media.

c) Funciones con atributos de riesgo ergonómico

$$\Delta_R(R) = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} [\delta_{\phi,k}^+(R) + \delta_{\phi,k}^-(R)] \tag{5.10}$$

$$\Delta_E(R) = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} \sqrt{\delta_{\phi,k}^+(R)^2 + \delta_{\phi,k}^-(R)^2} \tag{5.11}$$

$$\Delta_Q(R) = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} [\delta_{\phi,k}^+(R)^2 + \delta_{\phi,k}^-(R)^2] \tag{5.12}$$

Donde $\Delta_R(R)$, $\Delta_E(R)$ y $\Delta_Q(R)$ son las discrepancias agregadas (rectangular, euclídea y cuadrática) de los riesgos ergonómicos respecto a los valores medios para cada factor de riesgo $\phi \in \Phi$.

A continuación, se presenta a modo de resumen, el conjunto de funciones por atributos definidas anteriormente.

Tipo	Nomenclatura	Objetivo
Funciones de compatibilidad	c	Maximizar la tasa de producción de la línea limitando A y R que equivale a minimizar c
	A	Minimizar el espacio requerido por la línea limitando c y R
	R	Minimizar el riesgo para los trabajadores de la línea, limitando c y A .
Funciones de ajuste	$\Delta_R(T), \Delta_E(T)$ y $\Delta_Q(T)$	Minimizar la discrepancia entre los tiempos de ciclo necesarios para hacer las operaciones en cada estación y el tiempo de ciclo medio asignado a cada estación, limitando A y R . Dichas discrepancias se pueden medir a través de distancias rectangulares, euclídeas y cuadráticas.
	$\Delta_R(A), \Delta_E(A)$ y $\Delta_Q(A)$	Minimizar la discrepancia entre el área lineal necesaria para hacer las operaciones en cada estación y el área lineal media asignada a cada estación, limitando c y R . Dichas discrepancias se pueden medir a través de distancias rectangulares, euclídeas y cuadráticas.
	$\Delta_R(R), \Delta_E(R)$ y $\Delta_Q(R)$	Minimizar la discrepancia entre el riesgo ergonómico necesario para hacer las operaciones en cada estación y el riesgo ergonómico medio asignado a cada estación, limitando c y A . Dichas discrepancias se pueden medir a través de distancias rectangulares, euclídeas y cuadráticas.

5.4. Modelo de factibilidad

El primer modelo que proponemos se basa en la caracterización del equilibrado de línea mediante restricciones asociadas con los atributos de los problemas. En este caso tendremos en cuenta los tres tipos de atributos considerados anteriormente: temporal, espacial y de riesgo de lesión.

Por lo tanto, dada una asignación de tareas a estaciones representada por los parámetros binarios $x_{j,k}^0 \in \{0, 1\} (\forall j \in J, \forall k \in K)$, diremos que es factible si satisface todas las restricciones del modelo M_{AALB_\emptyset} .

MODELO M_{AALB_\emptyset}

$$x_{j,k} = x_{j,k}^0 \quad (j = 1, \dots, |J|)(k = 1, \dots, |K|) \quad (5.13)$$

$$\sum_{k=1}^{|K|} x_{j,k} = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (5.14)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_{j,k} \geq 1 \quad (k = 1, \dots, |K|) \quad (5.15)$$

$$\sum_{k=1}^{|K|} k(x_{i,k} - x_{j,k}) \leq 0 \quad i \in P_j, j = 1, \dots, |J| \quad (5.16)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} \leq T_k^{max} \quad (k = 1, \dots, |K|) \quad (5.17)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} \leq A_k^{max} \quad (k = 1, \dots, |K|) \quad (5.18)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \leq R_{\phi,k}^{max} \quad (k = 1, \dots, |K|)(\phi = 1, \dots, |\Phi|) \quad (5.19)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j \cdot x_{j,k} - \delta_k^+(T) + \delta_k^-(T) = T^{med} \quad (k = 1, \dots, |K|) \quad (5.20)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j \cdot x_{j,k} - \delta_k^+(A) + \delta_k^-(A) = A^{med} \quad (k = 1, \dots, |K|) \quad (5.21)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} - \delta_{\phi,k}^+(R) + \delta_{\phi,k}^-(R) = R_{\phi}^{med} \quad (k = 1, \dots, |K|)(\phi = 1, \dots, |\Phi|) \quad (5.22)$$

$$\delta_k^+(T), \delta_k^+(A), \delta_k^-(T), \delta_k^-(A) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, |K|) \quad (5.23)$$

$$\delta_{\phi,k}^+(R), \delta_{\phi,k}^-(R) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, |K|)(\phi = 1, \dots, |\Phi|) \quad (5.24)$$

En el modelo $M_AALB_Ø$, la igualdad (5.13) establece la asignación de tareas a estaciones de trabajo y comprueba si esta asignación es factible o no. La restricción 5.14 indica que cada tarea sólo puede ser asignada a una estación de trabajo. La restricción (5.15) fuerza que ninguna de las estaciones de trabajo $|K|$ esté vacía. La restricción (5.16) permite que se satisfagan las ligaduras de precedencias. Las restricciones (5.17), (5.18) y (5.19) imponen la limitación máxima del tiempo de carga, el área requerida de la carga y el riesgo ergonómico generado por dicha carga de trabajo. Las restricciones (5.20), (5.21) y (5.22) definen las discrepancias temporales, de espacio y riesgo ergonómico, tanto positivas como negativas, entre los valores medios y los valores reales para cada estación de trabajo. Por último, las restricciones (5.23) y (5.24) establecen la no negatividad de las variables.

5.5. Modelos de optimización

La segunda propuesta consiste en la optimización de uno o más atributos. Así, a partir del modelo de factibilidad $M_AALB_Ø$ y las funciones de equilibrado definidas anteriormente, podemos formular una familia de modelos de optimización para el equilibrado de líneas de montaje, donde el número de estaciones de trabajo es un parámetro fijado previamente. Su objetivo es reducir al mínimo el tiempo de ciclo, el área lineal requerida y/o el riesgo ergonómico o la discrepancia entre el valor real e ideal de dichos atributos.

Para ello, primero debemos definir los conjuntos de funciones siguientes:

$$\mathfrak{S}_T = \{c, \Delta_R(T), \Delta_E(T), \Delta_Q(T)\} \quad (5.25)$$

$$\mathfrak{S}_A = \{A, \Delta_R(A), \Delta_E(A), \Delta_Q(A)\} \quad (5.26)$$

$$\mathfrak{S}_R = \{R, \Delta_R(R), \Delta_E(R), \Delta_Q(R)\} \quad (5.27)$$

MODELOS MONO-OBJETIVO

$$\left\{ (\text{Min } f_T \in \mathfrak{S}_T) \vee (\text{Min } f_A \in \mathfrak{S}_A) \vee (\text{Min } f_R \in \mathfrak{S}_R) \right\} \quad (5.28)$$

Sujeto de (5.14) a (5.24) del modelo $M_AALB_Ø$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|)(k = 1, \dots, |K|) \quad (5.29)$$

MODELOS BI-OBJETIVO

$$\left\{ \begin{array}{l} [(Minf_T \in \mathfrak{S}_T) \wedge (Minf_A \in \mathfrak{S}_A)] \vee \\ [(Minf_T \in \mathfrak{S}_T) \wedge (Minf_R \in \mathfrak{S}_R)] \vee \\ [(Minf_A \in \mathfrak{S}_A) \wedge (Minf_R \in \mathfrak{S}_R)] \end{array} \right\} \quad (5.30)$$

Sujeto de (5.14) a (5.24) del modelo M_{AALB_\emptyset}

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|)(k = 1, \dots, |K|) \quad (5.31)$$

MODELO TRI-OBJETIVO

$$(Minf_T \in \mathfrak{S}_T) \wedge (Minf_A \in \mathfrak{S}_A) \wedge (Minf_R \in \mathfrak{S}_R) \quad (5.32)$$

Sujeto de (5.14) a (5.24) del modelo M_{AALB_\emptyset}

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|)(k = 1, \dots, |K|) \quad (5.33)$$

MODELOS CON PONDERACIÓN DE ATRIBUTOS

Son válidas las siguientes funciones de ponderación de atributos:

$$\Gamma(T, A, R) = \mu_T \cdot c + \mu_A \cdot A + \mu_R \cdot R \quad (5.34)$$

$$\Delta_R(T, A, R) = \mu_T \cdot \Delta_R(T) + \mu_A \cdot \Delta_R(A) + \mu_R \cdot \Delta_R(R) \quad (5.35)$$

$$\Delta_E(T, A, R) = \mu_T \cdot \Delta_E(T) + \mu_A \cdot \Delta_E(A) + \mu_R \cdot \Delta_E(R) \quad (5.36)$$

$$\Delta_Q(T, A, R) = \mu_T \cdot \Delta_Q(T) + \mu_A \cdot \Delta_Q(A) + \mu_R \cdot \Delta_Q(R) \quad (5.37)$$

Donde μ_T (medido en segundos⁻¹), μ_A (medida en centímetros⁻¹) y μ_R (medida en ergo-segundos⁻¹) son los multiplicadores de los atributos tiempo de carga, área lineal requerida y riesgo ergonómico, respectivamente y deben satisfacer:

$$\mu_T \cdot T^{med} + \mu_A \cdot A^{med} + \mu_R \cdot R^{med} = 1 \quad (5.38)$$

$$R^{med} = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi=1}^{|\Phi|} R_{\phi}^{med} \quad (5.39)$$

$$\mu_T, \mu_A, \mu_R \geq 0 \quad (5.40)$$

En tales condiciones, podemos escribir:

$$\text{Min } f \in \{\Gamma(T, A, R), \Delta_R(T, A, R), \Delta_E(T, A, R), \Delta_Q(T, A, R)\} \quad (5.41)$$

Sujeto de (5.14) a (5.24) del modelo M_AALB_O

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|)(k = 1, \dots, |K|) \quad (5.42)$$

Este último modelo será la base de nuestro caso de estudio, específicamente, con el uso de la función de ponderación $\Delta_R(T, A, R)$.

5.6. Toma de decisiones incorporando afinidad y robustez

5.6.1. Definiciones previas

GRADO DE SIMILITUD ENTRE SOLUCIONES

Dada dos configuraciones, $\hat{\varepsilon}_1$ y $\hat{\varepsilon}_2$, obtenidas por $M_AALB_R(T, A, R)$ y caracterizadas por sus cargas en las estaciones de trabajo $(S_1^{\hat{\varepsilon}_1}, \dots, S_m^{\hat{\varepsilon}_1})$ y $(S_1^{\hat{\varepsilon}_2}, \dots, S_m^{\hat{\varepsilon}_2})$, definimos el siguiente índice de afinidad para cada estación de trabajo ($\forall k \in K$).

$$\mathcal{A}(S_k^{\hat{\varepsilon}_1}, S_k^{\hat{\varepsilon}_2}) = \frac{2|S_k^{\hat{\varepsilon}_1} \cap S_k^{\hat{\varepsilon}_2}|}{|S_k^{\hat{\varepsilon}_1}| + |S_k^{\hat{\varepsilon}_2}|} \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (5.43)$$

Coherentemente, el índice de afinidad entre las configuraciones $\hat{\varepsilon}_1$ y $\hat{\varepsilon}_2$ será:

$$\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2) = \frac{\sum_{k=1}^m \mathcal{A}(S_k^{\hat{\varepsilon}_1}, S_k^{\hat{\varepsilon}_2})}{m} \quad (5.44)$$

Diremos que la afinidad entre las dos configuraciones, $\hat{\varepsilon}_1$ y $\hat{\varepsilon}_2$, es completa cuando el índice $\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2)$ adopte el valor 1.

ROBUSTEZ DE UNA SOLUCIÓN

Para medir el grado de robustez de una configuración de línea, según sus atributos, nos centraremos en dos tipos de indicadores:

- (1) Los excesos máximos que se producen al variar la demanda sobre los valores medios del tiempo de carga, el área lineal requerida y el riesgo ergonómico sobre los operarios (índice tipo g_1).
- (2) Los excesos globales, considerando toda la línea y todos los planes sobre los valores medios del tiempo, el área y el riesgo ergonómico (índice tipo g_2).

Antes de definir los índices de robustez, determinaremos los siguientes parámetros:

$S_{k,\hat{\varepsilon}}$	Carga de la estación $k \in K$ (conjunto de tareas asignadas) correspondiente a la mejor solución $\hat{\varepsilon}$ para el plan de demanda $\#\varepsilon \in E$; $E(\#\varepsilon = 1, \dots, E)$.
$t(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon)$	Tiempo de carga correspondiente a la carga $S_{k,\hat{\varepsilon}}$ cuando se emplean los tiempos de proceso de las tareas vinculadas al plan de demanda $\#\varepsilon \in E$.
$a(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon)$	Espacio o área lineal correspondiente a la carga $S_{k,\hat{\varepsilon}}$ cuando se emplean las áreas requeridas por las tareas vinculadas al plan de demanda $\#\varepsilon \in E$.
$R_\phi(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon)$	Riesgo ergonómico correspondiente a la carga $S_{k,\hat{\varepsilon}}$, según el factor de riesgo $\phi \in \Phi$, cuando se emplean los riesgos ergonómicos de las tareas vinculadas al plan de demanda $\#\varepsilon \in E$.

$\bar{T}(\#\varepsilon)$	Tiempo de proceso medio a actividad normal que corresponde a cada estación para realizar una unidad de producto cuando se emplean los tiempos de proceso de las tareas vinculadas al plan de demanda $\#\varepsilon \in E$.
$\bar{A}(\#\varepsilon)$	Espacio o área lineal media que corresponde a cada estación para realizar las tareas cuando se emplean las áreas requeridas por las tareas vinculadas al plan de demanda $\#\varepsilon \in E$. En nuestro caso $\bar{A}(\#\varepsilon) = cte \quad \forall \#\varepsilon \in E$.
$\bar{R}_\phi(\#\varepsilon)$	Riesgo ergonómico medio, según el factor $\phi \in \Phi$, para cada estación empleando los riesgos del plan de demanda $\#\varepsilon \in E$.

Por lo tanto, dado el conjunto de estaciones de trabajo k ($k = 1, \dots, m = |K|$), el conjunto de planes de demanda E ($\#\varepsilon = 1, \dots, |E|$) y una configuración de estaciones de trabajo que corresponde a la mejor solución de equilibrado de línea obtenida a partir del plan de demanda $\hat{\varepsilon} \in E$, podemos definir los siguientes índices de no-resiliencia.

- (a) Proporción de los sobre-excesos máximos de los atributos, tiempo de proceso, área lineal requerida y riesgo ergonómico, sobre los valores medios de dichos atributos

$$g_1(\hat{\varepsilon}, T) = \max_{k \in K} \max_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{T}(\#\varepsilon)} [t(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{T}(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.45)$$

$$g_1(\hat{\varepsilon}, A) = \max_{k \in K} \max_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{A}(\#\varepsilon)} [a(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{A}(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.46)$$

$$g_1(\hat{\varepsilon}, R_\phi) = \max_{k \in K} \max_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{R}_\phi(\#\varepsilon)} [R_\phi(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{R}_\phi(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.47)$$

- (b) Proporción de los sobre-excesos globales de los atributos, tiempos de proceso, área lineal requerida y riesgo ergonómico, sobre los valores medios de dichos atributos

$$g_2(\hat{\varepsilon}, T) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{T}(\#\varepsilon)} [t(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{T}(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.48)$$

$$g_2(\hat{\varepsilon}, A) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{A}(\#\varepsilon)} [a(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{A}(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.49)$$

$$g_2(\hat{\varepsilon}, R_\phi) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{R}_\phi(\#\varepsilon)} [R_\phi(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{R}_\phi(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.50)$$

Análogamente, son válidos los índices de no-robustez que consideran los valores máximos de los atributos. Estos son:

- (a) Proporción de los sobre-excesos máximos de los atributos, tiempo de proceso, área lineal requerida y riesgo ergonómico, sobre los valores máximos permitidos de dichos atributos

$$g_1^{max}(\hat{\varepsilon}, T) = \max_{k \in K} \max_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{T_k^{max}} [t(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{T}(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.51)$$

$$g_1^{max}(\hat{\varepsilon}, A) = \max_{k \in K} \max_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{A_k^{max}} [a(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{A}(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.52)$$

$$g_1^{max}(\hat{\varepsilon}, R_\phi) = \max_{k \in K} \max_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{R_{\phi,k}^{max}} [R_\phi(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{R}_\phi(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.53)$$

- (b) Proporción de los sobre-excesos globales de los atributos, tiempo de proceso, área lineal requerida y riesgo ergonómico, sobre los valores máximos permitidos de dichos atributos

$$g_2^{max}(\hat{\varepsilon}, T) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{T_k^{max}} [t(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{T}(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.54)$$

$$g_2^{max}(\hat{\varepsilon}, A) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{A_k^{max}} [a(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{A}(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.55)$$

$$g_2^{max}(\hat{\varepsilon}, R_\phi) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{R_{\phi,k}^{max}} [R_\phi(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{R}_\phi(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad (5.56)$$

5.6.2. Toma de decisiones con robustez y grado de similitud

Nuestra propuesta de selección de soluciones se estructura en las siguientes etapas:

Etap 1. Recopilación de los distintos planes de demanda, correspondientes a diferentes escenarios con tiempos de proceso, áreas requeridas y categorías de riesgo de las operaciones distintas. Determinación de los límites de los atributos temporales, espaciales y de riesgo.

Etap 2. Búsqueda de configuraciones de línea: Dado un rango de valores para el riesgo ergonómico máximo, R^{max} , y el número de estaciones de trabajo, m , buscamos las configuraciones de la línea $(S_k, \dots, \forall k \in K)$ que satisfagan los planes de demanda.

Etap 3. Selección de configuraciones de línea dominantes: Desde el conjunto de configuraciones encontradas anteriormente, seleccionamos aquellas configuraciones que: (1) son válidas para todos los planes de demanda, (2) son soluciones dominantes, es decir, soluciones que satisfagan la

condición (1) y logren valores óptimos para R^{max} y m .

Etapa 4. Selección de configuraciones afines: Determinación del grado de afinidad entre cada par de configuraciones de la línea resultantes de la Etapa 3 y, si el grado de afinidad es igual o mayor que un valor establecido previamente, ($A^{lim} \geq 0,90$), una de estas configuraciones es rechazada.

Etapa 5. Ordenación de soluciones por robustez: Medición de la robustez de cada configuración de la Etapa 4 (según índices), y luego, ordenación de las configuraciones de menor a mayor grado de robustez, de acuerdo con el valor del índice g_1, g_2, g_1^{max} y g_2^{max} .

A continuación, a modo resumen, se muestra el diagrama de toma de decisiones (Figura 5.1).

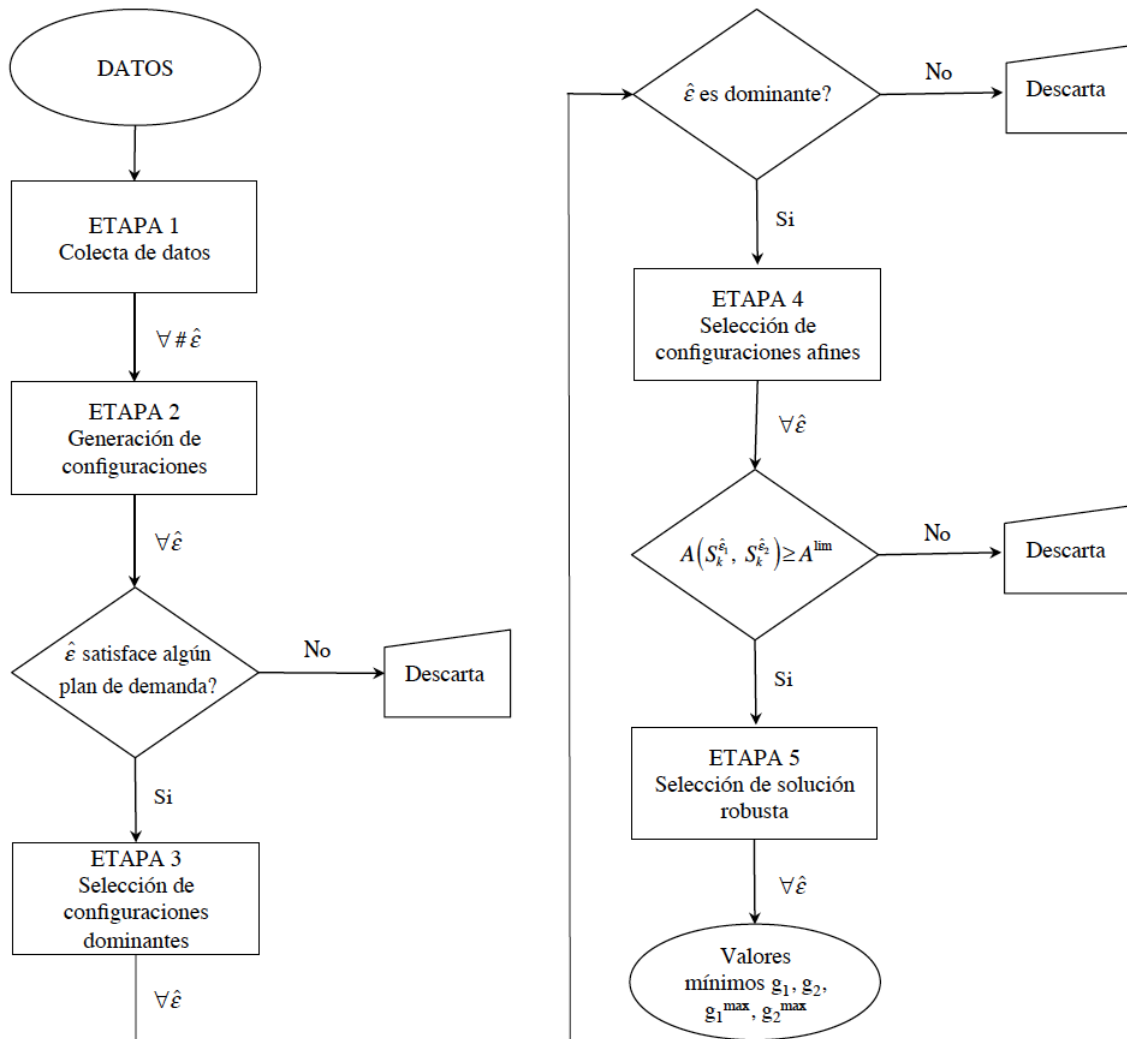


Figura 5.1: Diagrama de toma de decisiones.

5.7. Experiencia computacional con equiponderación de discrepancias rectangulares de atributos

5.7.1. Conjunto de datos

Se ha evaluado el impacto considerando los atributos temporales, espaciales y de riesgo ergonómico de las estaciones de trabajo y para ello, se ha utilizado el modelo de ponderación de atributos con la función rectangular, $\Delta_R(T,A,R)$ asignando el mismo peso a cada uno de los atributos ($\mu_T T^{med} = \mu_A A^{med} = \mu_R R^{med} = 1/3$).

El modelo se aplicó para los diferentes planes de demanda, los distintos valores máximos permitidos para el riesgo ergonómico de las estaciones de trabajo y diferente número de estaciones de trabajo en la línea para evaluar los siguientes puntos:

- El impacto de la variación de la composición del mix de producción en la configuración de la línea.
- El grado de similitud de las configuraciones de líneas asociadas a los diferentes escenarios de demanda.
- El grado de robustez o resiliencia de una configuración frente a la variación de la producción o de los planes de demanda.

Nuestro estudio se basa en la línea de montaje de productos mixtos de la planta Nissan en Barcelona. En concreto, en la línea se ensamblan nueve tipos de motores con diferentes destinos y propiedades agrupados en tres clases tal y como se ha definido en el Capítulo 4, Sección 4.4 (ver Tabla 4.3).

A pesar de sus diferencias, el conjunto de las tres clases de motores requieren 378 tareas elementales (incluyendo el test rápido). Estas tareas se han agrupado en 140 operaciones manteniendo las restricciones de precedencia y considerando un área lineal máxima disponible y un tiempo de carga de trabajo en las estaciones, facilitando la agregación en las diferentes estaciones de trabajo de la línea en el momento del equilibrado.

Teniendo en cuenta la demanda global, la demanda de cada uno de los nueve tipos de motores no es homogénea en el tiempo y no es igual para cada uno. Por lo tanto, aunque la capacidad de producción diaria se mantiene constante, la línea debe ser capaz de adaptarse a los diferentes planes de demanda sobre la base de las demandas parciales de cada tipo de motor. Como resultado, cada uno de estos programas de producción corresponde a un conjunto de tiempos promedios de operación (Chica *et al.*, 2012), ponderados por la demanda de los nueve tipos de motor. Resumiendo,

el cambio en el mix de producción afecta a la duración ponderada de cada operación involucrada en el proceso por lo que puede requerir un reajuste de la línea.

Por esta razón las nueve instancias, del conjunto E , correspondientes a los diferentes mix de producción, han sido escogidas para resolver el problema que se plantea en este estudio. Todas ellos son equivalentes a la producción de un día de trabajo (demanda total de 270 motores) con un tiempo efectivo de 13.30 horas divididas en partes iguales entre dos turnos, mañana y tarde, y corresponden a las diferentes situaciones que pueden presentarse en la práctica y que afectan al mix de producción de los nueve motores (ver Tabla 4.3 del Capítulo 4).

La Tabla 5.2 presenta las operaciones necesarias para ensamblar todos los motores ($|J| = 140$) con las relación de precedencia ($P_j, \forall j \in J$), tiempo de proceso promedio para cada plan de demanda ($t_j, \forall j \in J$ medido en segundos, $\forall \# \varepsilon \in E$), área lineal requerida para cada operación ($a_j, \forall j \in J$) medida en centímetros y categoría del riesgo ergonómico asociada con cada operación ($\chi_j, \forall j \in J$).

j	P_j	$t_j(\#\varepsilon)$										a_j	χ_j
		1	2	3	6	9	10	11	12	18			
1	-	60.00	59.56	58.76	60.38	61.18	57.45	60.05	59.44	60.56	300	1	
2	3, 31	75.00	75.03	75.44	74.60	74.18	75.51	75.39	75.18	74.40	200	2	
3	1	20.00	19.78	20.11	19.46	19.13	19.46	20.76	19.96	19.18	50	1	
4	3, 5	60.00	59.90	59.02	60.81	61.69	58.75	59.25	59.63	61.20	100	1	
5	1	20.00	19.99	20.33	19.67	19.32	20.32	20.32	20.10	19.49	50	1	
6	4, 5	60.00	60.26	59.33	61.17	62.10	60.10	58.60	59.88	61.76	150	1	
7	1	45.00	44.95	44.80	45.13	45.28	44.68	44.90	44.91	45.18	100	2	
8	1	10.00	10.01	10.09	9.93	9.85	10.10	10.07	10.03	9.89	50	2	
9	1	20.00	19.82	19.93	19.73	19.63	19.40	20.44	19.91	19.59	50	2	
10	1	30.00	30.20	30.27	30.13	30.07	30.87	29.67	30.15	30.20	50	2	
11	1	15.00	14.90	14.79	14.99	15.10	14.47	15.12	14.90	15.00	50	2	
12	11	15.00	15.05	15.11	15.00	14.95	15.27	14.94	15.05	15.00	50	2	
13	1	15.00	14.86	14.63	15.09	15.32	14.20	15.05	14.83	15.13	100	1	
14	1, 13	10.00	9.93	10.02	9.84	9.75	9.81	10.22	9.98	9.76	50	2	
15	9, 10, 11, 13, 14	8.00	8.10	8.06	8.14	8.17	8.35	7.77	8.05	8.20	100	2	
16	9, 10, 11, 13, 14	8.00	8.03	7.91	8.16	8.28	8.01	7.81	7.98	8.23	50	2	
17	9, 10, 11, 13, 14	80.00	79.80	80.00	79.60	79.40	79.40	80.60	79.91	79.40	100	2	
18	9, 10, 11, 13, 14	40.00	39.70	39.50	39.88	40.09	38.58	40.44	39.76	39.84	50	2	
19	9, 10, 11, 13, 14	5.00	5.01	4.97	5.05	5.09	5.00	4.93	4.99	5.08	50	2	
20	9, 10, 11, 13, 14	5.00	5.03	5.05	5.01	4.99	5.14	4.96	5.03	5.01	50	2	
21	9, 10, 11, 13, 14	5.00	5.02	4.94	5.10	5.17	5.01	4.88	4.99	5.15	50	2	
22	26, 27	7.00	6.97	6.90	7.04	7.12	6.81	6.99	6.96	7.06	50	2	
23	26, 27	7.00	7.00	6.99	7.01	7.02	7.00	6.99	7.00	7.01	50	2	
24	26, 27	30.00	30.14	30.27	29.98	29.86	30.66	29.91	30.14	29.99	50	2	
25	26, 27	30.00	30.29	30.72	29.86	29.43	31.60	29.85	30.34	29.79	50	2	
26	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	5.00	4.96	4.88	5.04	5.12	4.77	5.00	4.95	5.06	50	2	
27	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	5.00	5.00	4.94	5.08	5.14	4.95	4.92	4.98	5.11	50	2	

Continúa en la página siguiente.

j	P_j	$t_j(\#\varepsilon)$									a_j	χ_j
		1	2	3	6	9	10	11	12	18		
28	22, 23, 24, 25	30.00	29.92	30.00	29.85	29.77	29.77	30.22	29.98	29.77	100	2
29	28	10.00	9.98	10.06	9.90	9.82	9.99	10.13	10.01	9.85	50	2
30	29	15.00	14.98	15.03	14.94	14.89	14.99	15.07	15.00	14.91	100	2
31	6, 7, 8, 30	10.00	10.02	10.20	9.85	9.67	10.27	10.12	10.07	9.77	0	2
32	31	15.00	14.90	14.84	14.97	15.03	14.56	15.11	14.91	14.95	50	2
33	32	30.00	29.77	29.30	30.25	30.72	28.62	29.97	29.68	30.37	100	3
34	32	10.00	10.11	10.14	10.07	10.04	10.47	9.82	10.08	10.11	50	3
35	36	5.00	4.99	4.98	4.99	4.99	4.94	5.02	4.99	4.99	50	3
36	32	25.00	25.10	25.29	24.94	24.75	25.61	24.95	25.14	24.90	100	2
37	32, 35	15.00	15.04	14.89	15.19	15.34	15.01	14.76	14.97	15.29	0	3
38	33, 34, 36, 37	5.00	5.01	4.92	5.11	5.20	4.95	4.88	4.98	5.16	50	3
39	33, 34, 36, 37	5.00	5.00	5.01	4.99	4.98	5.00	5.02	5.00	4.98	50	3
40	33, 34, 36, 37	5.00	4.99	5.03	4.95	4.91	5.00	5.06	5.01	4.92	50	3
41	38, 39, 40	60.00	59.76	60.67	58.83	57.93	59.93	61.43	60.16	58.26	50	3
42	38, 39, 40	15.00	15.07	14.96	15.18	15.29	15.17	14.74	15.01	15.27	150	3
43	38, 39, 40	15.00	14.99	14.88	15.09	15.19	14.84	14.92	14.95	15.14	150	3
44	41, 42, 43	25.00	24.87	24.54	25.19	25.52	24.13	24.96	24.81	25.29	50	3
45	41, 42, 43	25.00	25.20	25.28	25.14	25.06	25.90	24.65	25.15	25.20	50	3
46	44, 45	5.00	5.04	5.07	5.00	4.97	5.18	4.96	5.04	5.00	50	3
47	46	35.00	35.38	35.51	35.25	35.13	36.65	34.37	35.29	35.38	50	3
48	46	35.00	34.99	35.38	34.60	34.22	35.35	35.41	35.14	34.41	50	3
49	42, 43	5.00	4.98	4.84	5.11	5.25	4.78	4.91	4.94	5.17	50	3
50	47, 48, 49	15.00	14.89	14.67	15.13	15.36	14.36	14.96	14.85	15.19	50	3
51	47, 48, 49	25.00	25.17	25.22	25.11	25.05	25.72	24.72	25.13	25.17	0	3
52	47, 48, 49	30.00	29.93	29.72	30.11	30.32	29.49	29.99	29.90	30.18	0	3
53	47, 48, 49	15.00	15.02	15.03	15.02	15.01	15.11	14.96	15.02	15.02	0	3
54	47, 48, 49	15.00	15.22	15.18	15.24	15.27	15.82	14.55	15.13	15.37	0	3
55	47, 48, 49	20.00	19.88	19.78	19.99	20.09	19.43	20.13	19.89	19.98	0	3
56	47, 48, 49	10.00	9.92	9.87	9.98	10.04	9.64	10.09	9.93	9.97	0	3
57	50, 51, 52, 53, 54, 55, 56	10.00	9.92	10.01	9.84	9.75	9.77	10.24	9.98	9.75	50	3
58	57, 59, 60	20.00	20.16	20.44	19.89	19.60	20.92	19.95	20.20	19.82	50	2
59	41	5.00	4.98	5.06	4.90	4.83	4.99	5.12	5.01	4.85	0	3
60	42, 43	20.00	19.91	19.82	20.01	20.10	19.57	20.07	19.92	20.01	50	3
61	57, 58	45.00	44.97	45.85	44.08	43.20	45.75	45.97	45.28	43.62	100	2
62	61	30.00	30.18	30.79	29.59	28.99	31.36	30.21	30.32	29.38	50	2
63	57	30.00	30.26	30.83	29.67	29.09	31.59	30.09	30.38	29.51	50	2
64	57	10.00	10.07	10.21	9.94	9.80	10.42	9.99	10.09	9.90	50	2
65	61, 62, 63, 64	5.00	5.03	5.08	4.98	4.93	5.18	4.99	5.04	4.97	0	2
66	61, 62, 63, 64	10.00	10.01	9.75	10.26	10.51	9.77	9.74	9.92	10.39	50	2
67	66	15.00	14.80	14.62	14.99	15.17	14.03	15.21	14.81	14.98	50	2
68	65, 67	60.00	59.87	60.36	59.38	58.89	59.96	60.76	60.08	59.07	150	2
69	68	10.00	10.10	9.94	10.25	10.41	10.23	9.65	10.01	10.38	50	2
70	67	30.00	29.74	29.49	29.99	30.25	28.72	30.27	29.74	29.99	100	2
71	68	10.00	9.95	9.79	10.11	10.27	9.65	9.93	9.92	10.17	50	2
72	68	10.00	9.98	10.17	9.78	9.59	10.09	10.24	10.05	9.68	50	2
73	71, 72	40.00	40.20	39.84	40.59	40.95	40.46	39.19	39.99	40.87	150	2
74	68, 69, 70, 73	25.00	24.73	24.47	24.99	25.24	23.66	25.28	24.73	24.98	50	2
75	74	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	50	2
76	74	10.00	10.06	10.27	9.85	9.64	10.45	10.08	10.11	9.77	100	2
77	75	15.00	15.14	14.97	15.31	15.48	15.39	14.54	15.04	15.46	50	2

Continúa en la página siguiente.

j	P_j	$t_j(\#\varepsilon)$									a_j	χ_j
		1	2	3	6	9	10	11	12	18		
78	79	15.00	15.13	15.01	15.25	15.37	15.39	14.62	15.04	15.38	50	2
79	74	15.00	14.92	14.81	15.03	15.14	14.57	15.05	14.91	15.05	50	2
80	76, 77, 78	10.00	10.08	10.30	9.85	9.63	10.53	10.08	10.13	9.78	50	2
81	76, 77, 78	10.00	10.04	10.15	9.94	9.84	10.28	10.01	10.06	9.91	100	2
82	80, 81	10.00	10.00	10.09	9.91	9.82	10.10	10.08	10.03	9.87	0	2
83	82	20.00	19.78	20.11	19.46	19.13	19.46	20.76	19.96	19.18	50	2
84	83	10.00	10.01	9.96	10.06	10.12	10.01	9.92	10.00	10.10	0	2
85	75, 84	20.00	19.90	19.79	20.03	20.14	19.50	20.06	19.89	20.03	50	3
86	82	25.00	25.04	25.04	25.06	25.07	25.18	24.89	25.02	25.08	50	2
87	82	20.00	20.07	20.14	20.00	19.93	20.35	19.92	20.07	20.00	50	2
88	84	15.00	15.03	15.17	14.89	14.75	15.26	15.09	15.07	14.83	25	3
89	88	20.00	20.30	20.43	20.15	20.01	21.30	19.57	20.25	20.23	50	3
90	88	30.00	29.80	29.73	29.87	29.93	29.13	30.33	29.85	29.80	50	3
91	85, 86, 87, 88	20.00	19.93	20.03	19.85	19.75	19.84	20.21	19.98	19.77	50	3
92	89, 90, 91	25.00	25.01	24.94	25.10	25.17	25.00	24.88	24.99	25.14	50	3
93	92	10.00	9.97	9.74	10.20	10.43	9.66	9.82	9.90	10.30	50	3
94	89, 90, 91	5.00	4.99	4.94	5.05	5.11	4.91	4.96	4.98	5.08	50	3
95	94	20.00	19.98	19.71	20.26	20.52	19.65	19.75	19.90	20.38	50	3
96	93, 95, 99	10.00	10.08	10.22	9.94	9.81	10.46	9.98	10.10	9.92	50	3
97	93, 95, 99	5.00	5.02	5.03	5.01	5.00	5.09	4.96	5.01	5.02	50	3
98	92	80.00	79.62	79.08	80.21	80.74	77.99	80.12	79.52	80.28	0	2
99	89, 90, 91	30.00	29.59	29.29	29.89	30.20	28.06	30.51	29.63	29.84	0	3
100	98, 99	10.00	10.05	10.28	9.81	9.57	10.42	10.15	10.11	9.71	50	2
101	98, 99	10.00	10.04	10.08	9.99	9.95	10.18	9.98	10.04	9.99	50	2
102	100, 101	20.00	20.16	19.99	20.33	20.50	20.45	19.52	20.04	20.49	50	2
103	100, 101	30.00	29.91	29.44	30.37	30.84	29.18	29.73	29.78	30.56	50	2
104	102, 103	5.00	5.02	5.03	5.01	5.01	5.09	4.97	5.02	5.02	0	3
105	106	30.00	30.23	30.40	30.05	29.88	31.08	29.73	30.22	30.08	50	2
106	100, 101	25.00	25.08	25.28	24.89	24.69	25.53	25.03	25.11	24.83	50	2
107	100, 101, 104	5.00	5.00	5.01	4.99	4.98	5.00	5.01	5.00	4.98	0	3
108	100, 101, 104	5.00	5.00	4.96	5.05	5.09	4.97	4.95	4.99	5.07	0	2
109	108	5.00	4.97	4.95	4.99	5.01	4.86	5.04	4.97	4.99	50	2
110	108	5.00	5.05	5.08	5.02	4.99	5.24	4.94	5.05	5.03	0	2
111	109, 11	10.00	10.02	9.83	10.22	10.41	9.91	9.76	9.95	10.32	0	2
112	109, 11	10.00	9.97	9.99	9.94	9.92	9.89	10.09	9.98	9.92	0	2
113	108	15.00	14.87	14.74	15.00	15.12	14.36	15.13	14.87	15.00	50	2
114	113	20.00	19.84	19.75	19.94	20.03	19.28	20.21	19.86	19.91	0	2
115	113	20.00	19.90	19.77	20.05	20.18	19.50	20.03	19.89	20.07	0	2
116	111, 112, 114, 115	45.00	44.59	44.18	44.97	45.37	42.92	45.47	44.58	44.96	100	2
117	118	20.00	20.11	20.56	19.68	19.23	20.90	20.20	20.22	19.51	50	2
118	116	25.00	25.38	25.23	25.53	25.68	26.38	24.09	25.20	25.80	0	2
119	116	25.00	24.81	24.69	24.93	25.05	24.10	25.27	24.83	24.89	0	2
120	119	20.00	19.91	19.90	19.92	19.92	19.63	20.17	19.94	19.88	50	2
121	105, 107, 117, 120	45.00	44.83	44.42	45.23	45.65	43.90	44.95	44.76	45.35	150	2
122	121	15.00	15.08	15.19	14.97	14.86	15.43	14.95	15.09	14.96	50	1
123	122	10.00	9.91	9.84	9.97	10.03	9.57	10.12	9.91	9.96	50	1
124	123	10.00	10.08	10.13	10.03	9.98	10.36	9.89	10.06	10.04	0	1
125	124	20.00	19.97	20.29	19.64	19.33	20.19	20.39	20.09	19.47	100	1
126	125	30.00	29.86	29.88	29.84	29.82	29.45	30.30	29.92	29.76	50	2
127	126	10.00	9.91	9.97	9.85	9.80	9.71	10.24	9.96	9.78	50	2

Continúa en la página siguiente.

j	P_j	$t_j(\#\varepsilon)$									a_j	χ_j
		1	2	3	6	9	10	11	12	18		
128	117, 12	25.00	24.99	25.27	24.72	24.44	25.24	25.28	25.08	24.57	50	2
129	126	30.00	30.02	29.68	30.34	30.68	29.71	29.66	29.91	30.52	50	2
130	127, 128, 129	30.00	30.10	30.31	29.91	29.70	30.63	29.98	30.14	29.85	75	2
131	117, 12	40.00	40.08	40.46	39.70	39.31	40.69	40.22	40.20	39.54	50	2
132	131	25.00	25.02	24.91	25.16	25.28	25.00	24.79	24.97	25.23	100	1
133	130	25.00	25.15	25.46	24.81	24.50	25.89	25.05	25.22	24.73	50	1
134	132	20.00	20.16	19.77	20.55	20.94	20.25	19.29	19.98	20.83	50	1
135	134	15.00	15.09	15.03	15.14	15.20	15.28	14.78	15.04	15.21	50	1
136	135	20.00	19.99	19.81	20.17	20.35	19.80	19.83	19.94	20.26	50	1
137	136	30.00	29.91	29.74	30.07	30.23	29.47	30.02	29.87	30.11	50	2
138	136	30.00	29.89	30.01	29.76	29.63	29.67	30.37	29.97	29.64	50	2
139	137, 138	15.00	14.91	14.76	15.05	15.20	14.47	15.04	14.89	15.08	100	2
140	133, 139	120.00	120.93	121.60	120.20	119.53	124.33	118.93	120.91	120.33	0	1

Tabla 5.2: Datos correspondientes a los nueve planes de demanda seleccionados.

Finalmente, para aplicar el experimento, se utilizó la Programación Matemática Solver (la v11.0 Solver CPLEX) en un equipo MacPro con un procesador Intel Xeon CPEU 3.0 GHz y 2 GB de RAM con Windows XP con límite de tiempo CPU de 7200 s.

5.7.2. Factibilidad de planes de demanda en función de m y R_ϕ^{max}

El propósito de esta primera fase es obtener las mejores configuraciones de la línea en base al equilibrio de los atributos (tiempo de carga, área y riesgo ergonómico), teniendo en cuenta diversos escenarios relativos al mix de la demanda.

En concreto, para cada uno de los nueve motores de los planes de demanda seleccionados ($\#\varepsilon = 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 18$), dado un tiempo de ciclo máximo, $c = 180$ s, y un área lineal requerida máxima, $A = 400$ cm, se determina si es posible encontrar una configuración de línea candidata. Usando el modelo $M_AALB_A_R(T, A, R)$ con un tiempo límite CPU de 7200 s, tratamos de encontrar una solución mediante el establecimiento de los siguientes parámetros:

- Valores para el número de estaciones de trabajo: $m = \{21, 22, 23, 24\}$.
- Nueve valores para el riesgo ergonómico máximo permitido que corresponden a líneas con categoría de riesgo, χ_ϕ , comprendidas entre 2 y 2.44 donde $R_\phi^{max} = \chi_\phi \cdot c$:
 $R_\phi^{max} = \{360, 370, 380, 390, 400, 410, 420, 430, 440\}(e - s)$.

Considerando el número de instancias seleccionadas y el barrido de número de estaciones de trabajo y el riesgo ergonómico máximo, este experimento envuelve 324 ejecuciones (9x4x9) del

solver de optimización para obtener configuraciones de la línea cuando exista una solución para cada juego de datos o, simplemente, concluir que no hay solución. Obviamente, este número podría reducirse si se considera que una solución para un plan de demanda específica y el riesgo ergonómico será factible si aumentamos el riesgo máximo.

En la Tabla 5.3 podemos ver los resultados obtenidos. Para cada par de valores de m y R_ϕ^{max} se indican los planes de demanda ($\#\varepsilon$) para los que se ha hallado una configuración de línea. Por ejemplo, para $m = 23$ y $R_\phi^{max} = 360$ e-s el modelo $M_AALB_A\Delta_R(T, A, R)$ encuentra soluciones para cada plan de demanda.

R_ϕ^{max}	$m = 21$	$m = 22$	$m = 23; 24$
360	–	1, 9, 10, 11, 12, 18	1,...,18
370	–	1, 2, 3, 9, 10, 11, 12, 18	1,...,18
380	–	1,...,18	1,...,18
390	1	1,...,18	1,...,18
400	1	1,...,18	1,...,18
410	1, 10	1,...,18	1,...,18
420	1, 10, 11, 12	1,...,18	1,...,18
430	1, 3, 9, 10, 11, 12	1,...,18	1,...,18
440	1, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 18	1,...,18	1,...,18

Tabla 5.3: Planes de demanda ($\#\varepsilon$) satisfechos para cada par de valores m y R_ϕ^{max} con $c = 180$ s y $A = 400$ cm fijos.

A la vista de la Tabla 5.3 podemos concluir cómo la composición del mix de producción afecta al equilibrado de la línea bajo las condiciones temporales, espaciales y de riesgo de los atributos. En concreto se observa que si la línea tiene $m = 21$ estaciones de trabajo, y a pesar de permitir un riesgo ergonómico máximo de 440 e-s ésta no es factible con todos los planes de demanda estudiados. De hecho para 21 estaciones de trabajo y un riesgo máximo de 440 e-s, el solucionador CPLEX encuentra configuraciones posibles para todos los mixes de producción, excepto para el plan de demanda número #2.

También observamos que con $m = 21$ no se encuentra ninguna configuración en ningún plan de demanda cuando el riesgo ergonómico es inferior o igual a 380 e-s. Cuando nos fijamos en el número de estaciones de trabajo $m = 22$, el riesgo ergonómico máximo más bajo que ofrece soluciones para todos los casos es 380 e-s o más. Finalmente, vemos que 23 es el número más bajo de estaciones de trabajo que permite toda la gama de riesgos ergonómicos.

5.7.3. Impacto del Mix de Producción sobre la carga de las estaciones de la línea

Una vez ejecutado el modelo $M_AALB_Δ_R(T, A, R)$ para diferentes números de estaciones de trabajo y valores máximos de riesgo, comprobaremos si una determinada configuración de línea, obtenida de los valores de los atributos y del tiempo de proceso de las operaciones asociadas a un plan de demanda específico, satisface todas condiciones de equilibrado de los planes de demanda restantes.

A partir de las configuraciones de la línea obtenida por el modelo $M_AALB_Δ_R(T, A, R)$ y los valores fijados de los atributos, iguales a $m = 23$, $c = 180 s$, $A = 400 cm$ y $R_φ^{max} = 360 e-s$, para cada plan de demanda ($\#ε = 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 18$) verificamos, a través del modelo $M_AALB_∅$, si las soluciones son factibles para el resto de los planes de demanda.

Los resultados de esta fase de la investigación que corresponden a 81 ejecuciones (9 soluciones de configuraciones por 9 planes de demanda) se recogen en la Tabla 5.4. En esta tabla se indica si la configuración ($\hat{ε}$) satisface el plan de demanda ($\#ε$) con el símbolo (*)

	Plan de demanda ($\#ε$)								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*			*	*	*	
6	*	*	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	*	*	*	*		*		*	*
11	*						*		
12	*	*	*	*		*		*	*
18	*			*	*				*

Tabla 5.4: Matriz de satisfactibilidad de los planes de demanda para una configuración de la línea $\hat{ε}$

Los resultados obtenidos nos permiten seleccionar las configuraciones de la línea 1, 2, 6 y 9, obtenidas por $M_AALB_Δ_R(T, A, R)$ como las más robustas frente a variaciones de demanda, ya que todas ellas son realizables sea cual sea el plan de demanda. Estas cuatro configuraciones satisfacen todas las limitaciones ($m = 23$, $c = 180 s$, $A = 400 cm$ y $R_φ^{max} = 360 e-s$) requeridas por los planes de demanda a pesar de tener distintos tiempos de procesos de las tareas (ver Tablas 5.5 y 5.6).

k	$\hat{\varepsilon} = 1$			$\hat{\varepsilon} = 2$				
	<i>Operaciones asignadas</i> (S_k)	T	A	R	<i>Operaciones asignadas</i> (S_k)	T	A	R
1	1, 3, 10	110	400	140	1, 9, 10	109.58	400	159.6
2	5, 8, 9, 11, 13, 14, 18	130	400	225	11, 13, 14, 17, 19, 20	129.52	400	244.19
3	4, 6, 16, 19, 21	138	400	156	5, 7, 15, 16, 18, 21	125.8	400	231.6
4	15, 17, 20, 25, 26, 27	133	400	266	3, 4, 22, 25, 26, 27	126.91	350	174.14
5	7, 22, 23, 24, 28, 29	129	400	258	6, 23, 24, 28	127.33	350	194.4
6	30, 31, 32, 33, 35, 36, 37	115	400	280	2, 8, 29, 30, 31	120.01	400	240.03
7	34, 38, 39, 40, 41, 42	100	400	300	32, 33, 34, 35, 36, 37	99.91	350	259.71
8	43, 44, 45, 46, 48, 59	110	350	330	38, 39, 40, 41, 42, 59	94.81	350	284.42
9	12, 47, 49, 51, 55, 60	120	200	345	43, 44, 45, 46, 47	105.48	350	316.43
10	50, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 64	125	200	345	12, 48, 49, 52, 53, 55	119.86	150	344.53
11	61, 62, 63, 66, 67	130	300	260	50, 51, 54, 56, 57, 58, 60, 64	125.26	250	345.55
12	65, 68, 69, 70, 71, 72	125	400	250	61, 62, 63, 66, 67	130.23	300	260.45
13	73, 74, 75, 77, 78, 79	120	400	240	65, 68, 71, 72, 73	125.03	400	250.06
14	76, 80, 81, 82, 83, 84, 88, 90	115	375	275	69, 70, 74, 75, 77, 78, 79	119.76	400	239.51
15	2, 85, 89	115	300	270	76, 80, 81, 82, 83, 84, 88, 90	114.81	375	274.45
16	86, 87, 91, 92, 93, 99	130	250	345	85, 86, 87, 89, 91, 92	130.26	300	345.65
17	98, 100, 101, 102, 103	150	200	300	98, 99, 100, 101, 103	159.2	150	348
18	104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116	135	200	275	102, 104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116	154.34	250	313.7
19	106, 117, 118, 131, 132, 134	155	300	265	106, 117, 118, 131, 132, 134	155.83	300	266.48
20	105, 107, 119, 120, 121, 122	140	300	270	105, 107, 119, 120, 121, 122, 123	149.75	350	279.52
21	110, 123, 124, 125, 126, 128, 129, 135	145	350	235	124, 125, 126, 127, 128, 129, 135	139.91	350	234.69
22	127, 130, 133, 136, 137, 138	145	325	245	93, 110, 130, 133, 136, 137, 138	150.06	325	264.95
23	94, 95, 96, 97, 139, 140	175	300	270	94, 95, 96, 97, 139, 140	175.9	300	270.95

Tabla 5.5: Configuraciones $\hat{\varepsilon} = 1$ y 2 dada por $M_AALB_ \Delta_R(T, A, R)$ considerando $m = 23$, $c = 180$ s, $A = 400$ cm y $R_\phi^{max} = 360$ e-s.

k	$\hat{\varepsilon} = 6$			$\hat{\varepsilon} = 9$				
	<i>Operaciones asignadas</i> (S_k)	T	A	R	<i>Operaciones asignadas</i> (S_k)	T	A	R
1	1, 9, 10	110.24	400	160.1	1, 3, 10	110.4	400	140.4
2	3, 5, 7, 8, 11, 13	124.26	400	194.3	5, 7, 9, 11, 13, 14	124.4	400	214.2
3	14, 15, 17, 19, 20, 21	112.74	400	225.47	15, 16, 17, 19, 20, 21	111.1	400	222.2
4	16, 18, 22, 24, 25, 26, 27	125.04	350	250.08	18, 22, 23, 24, 25, 26, 27	123.8	350	247.6
5	4, 23, 28, 29, 30	122.51	400	184.21	4, 8, 28, 29, 30	126	400	190.3
6	6, 31, 32, 33, 34	126.31	350	231.78	6, 31, 32, 33, 34	127.6	350	233.8
7	2, 35, 36, 37	119.72	350	259.62	2, 35, 36, 37	119.3	350	258.9
8	38, 39, 40, 41, 42, 59	93.96	350	281.88	38, 39, 40, 41, 42, 59	93.13	350	279.4
9	43, 44, 45, 46, 47	105.67	350	317.01	43, 44, 45, 46, 47	105.9	350	317.6
10	48, 49, 50, 51, 54, 60	115.21	200	345.64	12, 48, 49, 50, 55, 56, 60	120	250	345.1
11	12, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 64	129.76	200	344.46	51, 52, 53, 54, 57, 58, 64	124.8	150	345
12	61, 62, 63, 66, 67	128.58	300	257.16	61, 62, 63, 66, 67	127	300	253.9
13	65, 68, 71, 72, 73	124.84	400	249.68	65, 68, 69, 70, 71, 72	124.4	400	248.7
14	69, 70, 74, 75, 77, 78, 79	120.83	400	241.66	73, 74, 75, 77, 78, 79	122.2	400	244.4
15	76, 80, 81, 82, 83, 84, 88, 90	113.83	375	272.41	76, 80, 81, 82, 83, 84, 88, 90	112.9	3.75	270.4
16	85, 86, 87, 89, 91, 92	130.18	300	345.49	85, 86, 87, 89, 91, 92	130.1	300	345.2
17	98, 99, 100, 101, 102	150.22	150	330.34	98, 99, 100, 101, 102	151	150	332.1
18	103, 104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116	165.54	250	336.1	103, 104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 115, 116	167	250	339

Continúa en la página siguiente.

k	$\hat{\varepsilon} = 6$			$\hat{\varepsilon} = 9$				
	<i>Operaciones asignadas</i> (S_k)	T	A	R	<i>Operaciones asignadas</i> (S_k)	T	A	R
19	106, 117, 118, 131, 132, 134	155.51	300	265.3	106, 107, 117, 118, 131, 132, 134	160.1	300	279
20	105, 107, 119, 120, 121, 122, 123	150.06	350	280.16	105, 119, 120, 121, 122, 123	145.4	350	265.9
21	124, 125, 126, 135, 136, 137, 138	154.65	350	244.32	110, 124, 125, 126, 128, 135, 136, 137	154.3	350	243.8
22	93, 110, 127, 128, 129, 130, 133	134.85	325	255.09	93, 127, 129, 130, 133, 138	134.7	325	255.4
23	94, 95, 96, 97, 139, 140	175.52	300	271.09	94, 95, 96, 97, 139, 140	175.2	300	271.3

Tabla 5.6: Configuraciones $\hat{\varepsilon} = 6$ y 9 dada por $M_AALB_A_R(T, A, R)$ considerando $m = 23$, $c = 180$ s, $A = 400$ cm y $R_\phi^{max} = 360$ e-s.

5.7.4. Afinidad entre configuraciones de línea ante la variación del Mix de Producción

En la primera fase del experimento, las configuraciones obtenidas para los planes de demanda #1, #2, #6 y #9 fueron seleccionadas como configuraciones válidas para otros casos, cumpliendo todas las restricciones, pese a la variación de tiempos de proceso y riesgo ergonómico de las operaciones. Sin embargo, podemos mejorar el proceso de selección, teniendo en cuenta los criterios de selección tanto cualitativos como cuantitativos. Por lo tanto, se establece aquí un criterio de selección basado en el grado de similitud entre estaciones de trabajo.

Los resultados de esta fase experimental se muestran en la Tabla 5.7. En ellos podemos observar cómo las configuraciones 6 y 9 son las más similares y las más cercanas a las configuraciones 1 y 2. En efecto, ambas configuraciones son las que presentan mayor valor del índice de afinidad promedio, \bar{A} , y por tanto son las más robustas frente los posibles cambios de demandas.

	1	2	6	9	\bar{A}
1	1.000	0.470	0.448	0.471	0.597
2	0.470	1.000	0.748	0.735	0.738
6	0.448	0.748	1.000	0.870	0.767
9	0.471	0.735	0.870	1.000	0.769

Tabla 5.7: Índice de afinidad entre las cuatro configuraciones seleccionadas en la fase previa

Estas configuraciones permiten cambiar a otras configuraciones mediante un mínimo número de cambios en las estaciones de trabajo. Esto supone un menor número de herramientas, estanterías y equipos de movimientos, además de una menor formación de los trabajadores para adaptarse a la nueva situación.

5.7.5. Configuraciones robustas ante la variación del Mix de Producción

Estableciendo los valores de los parámetros ($m=23$, $c=180$ s, $A=400$ cm y $R_{\phi}^{max} = 360$ e-s) y teniendo en cuenta las cuatro configuraciones consideradas como robustas (1, 2, 6 y 9), se determinan los índices g_1 , g_2 , g_1^{max} y g_2^{max} para cada configuración de la línea y para cada atributo. Los resultados se recogen en la Tabla 5.8.

	g_1			g_2			g_1^{max}			g_2^{max}		
	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$
1	0.353	0.219	0.298	0.05	0.097	0.065	0.255	0.179	0.221	0.036	0.08	0.048
2	0.353	0.219	0.321	0.059	0.083	0.074	0.255	0.179	0.221	0.043	0.068	0.055
6	0.353	0.219	0.295	0.059	0.083	0.074	0.255	0.179	0.221	0.043	0.068	0.055
9	0.353	0.219	0.296	0.059	0.083	0.074	0.255	0.179	0.221	0.043	0.068	0.055

Tabla 5.8: Valores de los índice g_1 , g_2 , g_1^{max} y g_2^{max} para los atributos T , A y R mediante las configuraciones más similares (1, 2, 6 y 9).

A la vista de la Tabla 5.8, si atendemos al índice g_1 (medida de los excesos máximos de los atributos respecto a la media) las configuraciones que suponen menor exceso de riesgo ergonómico punta son la 6, 9 y 1. No obstante, si atendemos al índice g_2 la configuración con menor exceso global es justamente la 1, la resultante de un mix de producción completamente equilibrado.

5.8. Resumen y conclusiones

Como hemos visto, después de la recopilación de datos en relación a los planes de demanda vinculados a la planta Nissan de Barcelona (Etapa1), hemos seguido con el proceso de toma de decisiones, definida en el apartado 3, para seleccionar las configuraciones más robustas frente a la variación del mix de producción y al nivel de riesgo ergonómico.

Posteriormente, en la etapa 2, se ha obtenido una configuración de la línea para cada plan de demanda diaria de motores, dado un rango de valores del factor de riesgo máximo (R_{ϕ}^{max}). A continuación, teniendo en cuenta los valores de los atributos para los cuales el modelo matemático ha encontrado solución, se han seleccionado 9 configuraciones de línea después de realizar 324 ejecuciones del modelo $M_AALB_A_R(T, A, R)$. Las configuraciones seleccionadas corresponden a $m = 23$ y $R_{\phi}^{max} = 360$ e-s.

En la etapa 3, para cada configuración de la línea seleccionada en la etapa 2, hemos elegido aquellas que satisfacen todos los planes de demanda estudiados considerando el riesgo ergonómico

mínimo. Como resultado, hemos obtenido 4 configuraciones que satisfacen todos los requisitos establecidos por la empresa. Estas configuraciones de línea se muestran en las Tablas 5.5 y 5.6.

En la etapa 4, ha determinado el índice de afinidad, definida en la ecuación (5.44), como criterio para medir la similitud entre dos configuraciones de línea. Gracias a este criterio, hemos sido capaces de seleccionar la configuración más similar a todas las candidatas.

Finalmente, en la etapa 5, como alternativa a la etapa anterior, se determinó un criterio para discriminar aquellas configuraciones que generan mayores excesos máximos de atributos temporales, espaciales y ergonómicos con respecto a los valores medios de éstos. Esta alternativa se ha basado en el cálculo de los índices (g_1 , g_2 , g_1^{max} y g_2^{max}), de acuerdo con las ecuaciones (5.51) - (5.56)

La Tabla 5.9 recoge a modo de resumen las configuraciones seleccionadas en función de los criterios de selección propuestos:

Etapa	Criterio	Resultado
1	$\hat{\varepsilon}$ factible con $\min\{m, R_\phi^{max}\}$	$m = 23$; $R_\phi^{max} = 360$ $\hat{\varepsilon} = 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 18$
2	Satisfactibilidad $\hat{\varepsilon} \forall \# \varepsilon \in E$	$\hat{\varepsilon} = 1, 2, 6, 9$
3	Afinidad media: $\max \mathcal{A}(\hat{\varepsilon})$	$\hat{\varepsilon} = 1, 2, 6, 9$
4	Exceso máximo: $\min g_1(T, A, R)$; $\min g_1^{max}(T, A, R)$	$\hat{\varepsilon} = 1, 6, 9^1$.
	Exceso global: $\min g_2(T, A, R)$; $\min g_2^{max}(T, A, R)$	$\hat{\varepsilon} = 1$

Tabla 5.9: Configuraciones seleccionadas

Con todo lo anterior, en este capítulo, hemos hecho hincapié en la importancia de considerar el concepto de riesgo ergonómico en los problemas de equilibrado de líneas de montaje. Para ello, hemos definido un nuevo modelo, dentro de la familia TSALBP, para equilibrar la línea considerando atributos temporales, espaciales y ergonómicos.

A partir de un modelo básico de factibilidad, hemos presentado modelos de optimización mono, bi y tri objetivo utilizando las funciones elementales de los atributos. Además, también hemos presentado 4 nuevos modelos basados en funciones de ponderación de atributos.

A lo largo del proceso, hemos propuesto una metodología que permite obtener el equilibrado de línea más robusta para satisfacer el máximo número de escenarios, dada la variación de la deman-

¹Nótese que a las configuraciones 1, 6 y 9 les corresponden valores mínimos en los sobre-excesos máximos del atributo de riesgo ergonómico que consideramos técnicamente empatados y descartamos, por lo tanto, la configuración 2.

da. También hemos definido cuatro criterios diferentes para determinar qué configuraciones son más robustas frente a los cambios que puedan presentar los planes de demanda. Estos criterios, que miden el grado de factibilidad de una configuración, dado un plan de demanda, son: (1) la factibilidad de las configuraciones dados unos determinados valores para los atributos; (2) la factibilidad de las configuraciones obtenidas para todos los planes de demanda; (3) la similitud entre las configuraciones alternativas; y (4) los excesos medios de los atributos (temporales, espaciales y ergonómicos) con respecto a sus valores promedios y máximos.

Así pues, hemos escogido las configuraciones 1, 6 y 9 como las mejores, debido a que éstas satisfacen los requerimientos solicitados por la empresa. Dichas configuraciones presentan los mejores valores para el índice de afinidad y el índice de robustez, por lo cual, podemos afirmar que las configuraciones 1, 6 y 9 son las que mejor se adaptan a cualquier plan de demanda sin suponer un coste excesivo en relación a la formación de los operarios.

Por último, destacar que el caso de estudio nos ha permitido detectar la importancia de controlar el riesgo ergonómico de las estaciones de trabajo. En efecto, un riesgo elevado puede ser el causante de lesiones que, con el paso del tiempo, conlleven enfermedades crónicas suponiendo un gran coste económico, no sólo a la empresa sino también a la sociedad. Por otro lado, si aumentamos el número de estaciones de trabajo con el fin de mejorar la salud del trabajador, la configuración de la línea también sufriría modificaciones que supondrían un costo. Por lo tanto, sería importante alcanzar un equilibrio adecuado a ambos factores, el riesgo ergonómico y los cambios en la configuración de la línea.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de esta tesis se han estudiado los problemas de equilibrado de líneas de montaje contemplando individual y simultáneamente el tratamiento de atributos temporales, espaciales y ergonómicos. Para ello, se ha partido de las hipótesis: (1) la aparición de dolencias vinculadas a la carga física pone de manifiesto que existen ciertos riesgos que deben ser tratados y evaluados; (2) la adaptación del puesto de trabajo garantiza el confort y la seguridad del trabajador; (3) la incorporación de nuevos empleados en las líneas de montaje de productos mixtos pueden llegar a reducir los riesgos asociados a las tareas que deben realizar cada uno de los trabajadores durante su jornada laboral; (4) los daños físicos y psíquicos dependen en gran medida de la frecuencia y duración de exposición al que se somete el trabajador y, tienen una repercusión económica en los costes indirectos sociales; (5) la posibilidad de incorporar limitaciones a los riesgos ergonómicos mejora la productividad; (6) la mejor productividad, fruto de una correcta adaptación del puesto de trabajo, aumenta los beneficios de la empresa y a su vez reduce los costes indirectos y (7) la reducción de los costes indirectos conlleva beneficios sociales en el ámbito de la salud.

Todas estas hipótesis han dado lugar al estudio de nuevas variantes de los problemas de equilibrados de líneas de montaje. En efecto, esta tesis es el resultado de este largo estudio en el que, además de un estudio de la bibliografía, se han propuesto nuevos modelos matemáticos que han sido evaluados por medio de un caso de estudio. En concreto en el Capítulo 2, MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA, se han descrito los conceptos objeto de esta investigación; la ergonomía y las líneas de montaje; en el Capítulo 3, EVALUACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO, se ha presentado una unificación subjetiva de tres métodos ergonómicos (RULA, OCRA y NIOSH) para obtener un valor global del riesgo ergonómico; en el Capítulo 4, INCORPORACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO AL EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE, se ha formulado un nuevo modelo denominado TSALBP_erg basado en la familia TSALBP; y en el Capítulo 5, MODELOS DE EQUILIBRADO DE

LÍNEAS DE MONTAJE POR ATRIBUTOS TEMPORALES, ESPACIALES Y ERGONÓMICOS, se ha propuesto una nueva visión para resolver el equilibrado de la línea de montaje teniendo en cuenta atributos temporales, espaciales y ergonómicos a la vez.

En cuanto a los modelos, se ha partido de la familia TSALBP como referencia, para el desarrollo teórico-práctico de nuestras propuestas.

Por su lado, en cuanto a la evaluación de los riesgos ergonómicos de una línea de montaje de modelos-mixtos, tras una revisión de la literatura relativa a métodos de evaluación de riesgo ergonómico, surge la necesidad de homogeneizar y unificar los valores del riesgo ergonómico que se asignan a las tareas elementales que se ejecutan en las líneas de montaje. Esto nos llevó a proponer una clasificación subjetiva y unificada que divide las tareas en cuatro categorías de riesgos, integrando simultáneamente los riesgos por levantamiento de cargas, los riesgos por movimientos repetitivos y los riesgos por posturas forzadas..

Así, en base a los modelos TSALBP de referencia y a la clasificación unificada de riesgos física propuesta, se ha incorporado el riesgo ergonómico a los problemas de equilibrado de líneas.

En concreto, dicha incorporación ha pasado por varias fases: (1) En primer lugar se han establecido los principios básicos para determinar el riesgo ergonómico de conjuntos de operaciones o tareas a partir de los riesgos ergonómicos elementales; (2) posteriormente se ha propuesto una nueva familia de modelos, denominada TSALBP_erg, que tiene como punto de partida la familia TSALBP; (3) por consideraciones prácticas, se han establecido dos vías para agregar tareas elementales en bloques de tareas; (4) como resultado del punto (3), se han formulado los modelos de agregación que permiten realizar una experiencia computacional, compuesta por dos experimentos en los que se estudia (a) la incorporación de riesgo ergonómico sobre el número de estaciones y (b) la variación de la composición de las líneas, respectivamente.

Finalmente, como aportación relevante de la tesis, se han establecido también, a través de modelos, nuevas formas de equilibrado de línea en función de los atributos temporales, espaciales y ergonómicos definidos en este trabajo. Al igual que el caso anterior, para validar la aplicabilidad de estos modelos, se han realizado una experiencia computacional, en la que además se ha evaluado la robustez de las configuraciones de línea ofrecidas por los modelos, ante las variaciones de demanda y el nivel de riesgo admisible. En concreto, esta validación de las soluciones se ha basado en una metodología, propuesta en esta tesis, que ha consistido en los siguientes puntos: (1) comprobación de la satisfacción o no de la demanda en función del número de estaciones de la línea y el riesgo ergonómico de las tareas; (2) evaluación de la influencia del mix de producción

sobre el reparto de trabajo entre las estaciones; (3) estudio de la afinidad entre distintas líneas de montaje cuyos diseños resultan de considerar distintos mixes de producción; (4) determinación del grado de robustez de las configuraciones de línea.

En resumen, a lo largo de esta tesis, se han propuesto nuevos modelos para el equilibrado de líneas de montaje de modelos mixtos y se han evaluado a través de un caso de estudio vinculado a la planta de motores de Nissan en Barcelona. Todo esto, nos ha permitido observar, la influencia que tiene la consideración de los riesgos ergonómicos en el diseño de la línea y nos ha permitido obtener una metodología para evaluar la robustez de las configuraciones. De esta manera, es posible obtener una configuración de línea que respete las condiciones tecnológicas, de gestión y ergonómicas impuestas y que, además, se adapte en la mayor medida a las variaciones de demanda que puede aparecer en los sistemas productivos actuales.

6.1. Trabajos futuros

La índole exploratoria de este trabajo, permite finalmente, proponer algunas nuevas líneas de investigación que contribuyan a su enriquecimiento posterior. Estas líneas pueden ser definidas en los siguientes puntos:

(1) Valoración económica entre los beneficios para la mejora ergonómica y el coste social.

A lo largo de los años se han desarrollado diversas investigaciones sobre qué factores debemos considerar cuando hablamos de costes en PRL. Heinrich (1959) los clasificó en dos grandes grupos, costes directos (bajas médicas, indemnizaciones, incorporación de un sustituto, multas) y costes indirectos (pérdida de tiempo, recuperación del trabajador, análisis de los accidentes).

La literatura científica aporta varios estudios sobre métodos de cálculo de costes (Jallon *et al.*, 2011) definiéndolos y enumerándolos, entendiendo que, para los costes indirectos es necesario reflejarlos con mayor claridad y fiabilidad. ¿Cuáles son realmente los costes indirectos? Alguna de las teorías apunta únicamente a variables asociadas a TME (Marcoulaki *et al.*, 2012) y otras en cambio, engloban los TME con factores psicosociales (Abbe *et al.*, 2011).

Entendemos que los costes indirectos son costes variables (difíciles de cuantificar) y que muchos de ellos no son cubiertos por el seguro, corriendo a cargo de la propia empresa y provocando una reducción en el beneficio del negocio, pero ¿a qué son debidos?

Muchas de las empresas desconocen el motivo del absentismo laboral que se produce en su organización, revelando una fuerte inopia en un fenómeno que tiene un gran peso en el rendimiento y la productividad. Los motivos de dicho absentismo pueden ser tanto mentales como físicos (falta de promoción, tareas monótonas y repetitivas, necesidades familiares no cubiertas, estrés, depresión, contexto social, características del trabajo, etc.) provocando un incremento de pérdidas de horas de trabajo, incremento de trabajadores de sustitución, pago de horas extras, bajo nivel de productividad, etc. ¿Podría existir una relación estrecha entre las dolencias que padece un trabajador a causa de su puesto de trabajo y el absentismo que se produce en las organizaciones?

Es por ello que resultaría interesante crear una nueva línea de investigación que analice si el puesto de trabajo es un factor de riesgo al que está sometido el trabajador generando costes indirectos no evaluados por las empresas.

(2) Factores psicosociales a los que pueden estar sometidos los trabajadores durante su jornada laboral

Si analizamos las diversas investigaciones observamos que existe una relación estrecha entre los TME y los factores psicosociales (Nancy, 2007). Algunos de estos estudios analizan dichas vinculaciones mediante herramientas validadas en numerosas ocasiones, sin embargo promueven un inconveniente, su evaluación previa. Dicha evaluación se descompone por una parte en los riesgos psicosociales para, posteriormente, relacionarlos con las tensiones asociadas a los factores TME, dejando de lado el posible estudio de vinculación inicial. Los principales razonamientos que tratan de explicar la cohesión entre los factores psicosociales y los TME son: conflicto de rol, control en el trabajo y liderazgo, incluyendo dentro de ellos estrés, tensión, frustración, ansiedad, depresión, etc.

No obstante, existe un verdadero obstáculo cuando intentamos diseminar el término "psicosocial" ya que este es complejo, subjetivo y depende del individuo. En 2006, la Generalitat de Catalunya y más concretamente, el Departamento de Trabajo y la Dirección General de Relaciones Laborales (Gencat, 2006) desarrollaron la teoría de las diferentes dimensiones de los riesgos psicosociales concretándolas como entidades diferenciadas y cuantificables, en total, 20 dimensiones agrupadas en 5 bloques. En cambio algunos autores, actuales, prefieren especificarlas mediante la analogía de los elementos más citados y con mayor relevancia desde la década de los 90 (Lanfranchi y Duveau, 2008).

Reconocer y poder llegar a valorar los riesgos psicosociales a los que están expuestos los trabajadores de una línea de montaje mixto es una ardua y complicada tarea atendiendo a que muchas

de las sintomatologías son intrínsecas del propio individuo siendo muy difíciles de medir y cuantificar.

Diversas investigaciones han concluido que para disminuir y evitar al máximo las pérdidas de productividad que originan los factores mencionados anteriormente, no sólo es necesario cambiar y adaptar el equipamiento a los puestos de trabajo, sino la necesidad de crear una rotación de puestos que favorezcan la variación y diversidad de las tareas induciendo a un cambio en la conducta de los trabajadores mediante la satisfacción, el desarrollo de habilidades dispares, toma de decisiones, adquisición de nuevos conocimientos, etc. Aleccionar a un trabajador como empleado polivalente proporciona grandes beneficios no sólo a nivel empresarial sino a nivel personal, pero la pregunta aflora cuando nos cuestionamos si somos capaces de fomentar y enseñar una correcta formación y participación de los trabajadores en aspectos ergonómicos y matices psicosociales que puedan modificar su actitud y aptitud frente los TME, o por el contrario, sólo somos capaces de modificar las herramientas de trabajo e informar sobre los posibles riesgos a los que se exponen.

Podemos llegar a comprender que existe una relación estrecha entre la rotación de puestos y los beneficios que aporta a la empresa gracias a un aumento en la producción pero... ¿todos los factores de riesgo quedan anulados? Es probable que algunos trabajadores se sientan atemorizados por las nuevas características físicas y psíquicas del puesto, por la exclusión y empeoramiento de la relación entre compañeros, etc. ¿Es imposible eliminar por completo los factores psicosociales que derivan en TME? ¿existe por lo tanto, una dependencia vital entre los factores psicosociales y los TME?. Estas preguntas constituirían el análisis y estudio de una segunda línea de investigación.

(3) Incorporación de los factores de actividad y saturación al problema TSALPB_erg

Además de los requerimientos psicofísicos a los que se encuentran sometidos los trabajadores a lo largo de su jornada laboral, considerados ya en esta tesis, en futuros trabajos incorporaremos a los problemas de equilibrado de líneas condiciones laborales pactadas entre sindicatos y compañías por medio de convenios laborales.

En concreto en un primer lugar se tendrá en cuenta la variación de la actividad o ritmo de trabajo de los operarios lo largo de su jornada laboral respetando en todo momento, los límites establecidos por convenio. Ésta variación afectará directamente a los tiempos de proceso de las operaciones e indirectamente al riesgo ergonómico asociado a cada una de las tareas. En efecto, en caso que el operario realice una determinada tarea con un ritmo superior al normal establecido el tiempo de proceso de dicha tarea se verá reducida y elongado en caso contrario. Éste hecho podrá afectar a la configuración de la línea por lo que nuestro objetivo será encontrar la configuración de línea

que mejor se adapte ante esta posible variabilidad.

En segundo lugar otro de los aspectos que se tendrán en cuenta es la saturación de los operarios en las estaciones de trabajo, entendiendo como saturación el nivel de ocupación del operario durante su jornada laboral. Esta nueva limitación afectará la configuración de la línea pues la carga asignada a una estación de trabajo no podrá superar la saturación media máxima establecida por convenio.

Obviamente, en una primera etapa se incorporarán ambos conceptos por separado dando lugar a una segunda etapa donde se consideren tanto saturación como actividad de forma simultánea.

Dichas investigaciones partirían de trabajos e investigaciones ya realizadas (Bautista *et al.* (2014a); Bautista *et al.* (2014c); Bautista *et al.* (2014b); Bautista *et al.* (2014e); Bautista *et al.* (2013)) así como con la colaboración con los investigadores que en ellas aparecen.

CAPÍTULO 7

PUBLICACIONES REALIZADAS

En este capítulo se enumeraran por orden cronológico, los artículos aceptados y en proceso de revisión, los capítulos de libro y las diversas comunicaciones a congresos que se han llevado a cabo mediante la realización e investigación de la presente Tesis Doctoral. También se enumeraran aquellas publicaciones que se han realizado aún no estando directamente relacionadas con la Tesis. Asimismo, haremos mención de los diferentes Technicals Reports desarrollados.

7.1. Publicaciones vinculadas al TSALBP

7.1.1. Artículos

- **MODELS FOR ASSEMBLY LINE BALANCING BY TEMPORAL, SPACIAL AND ERGONOMIC RISK ATTRIBUTES.**

BAUTISTA, J., BATALLA-GARCÍA, C. y ALFARO-POZO, R. 2014. European Journal of Operational Research. Proceso de 2ª revisión.

- **DESIGN AND BALANCING OF ASSEMBLY LINES THAT MINIMIZE ERGONOMIC RISK. A CASE STUDY OF NISSAN'S BARCELONA PLANT.**

BAUTISTA, J., BATALLA-GARCÍA, C., ALFARO-POZO, R., LLOVERA, S y FORTUNY-SANTOS, J. 2015. Journal of Manufacturing Systems. Submission.

7.1.2. Capítulos de Libro

- **INCORPORATING ERGONOMICS FACTORS INTO THE TSALBP.**

BAUTISTA, J., BATALLA, C. y ALFARO, R. 2012. *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services IFIP Advances in Information and Communication Technology Volume 397*, ISBN: 978-3-642-40351-4 (Print) 978-3-642-40352-1 (Online), Springer, Holanda, pag. 413-420. (Scopus).

- **ERGONOMIC RISK MINIMISATION IN ASSEMBLY LINE BALANCING.**

BAUTISTA, J., BATALLA-GARCÍA, C. y ALFARO-POZO, R. 2015. *Enhancing Synergies in a Collaborative Environment. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*, Springer International Publishing, Switzerland, pag. 85-93. ISBN: 978-3-319-14077-3.

7.1.3. Congresos

- **INCORPORATING ERGONOMICS FACTORS INTO THE TSALBP.**

BAUTISTA, J., BATALLA, C. y ALFARO, R. 2012. *Comunicación, Proceedings(CD), International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2012), Rodas (Grecia)*. (Scopus).

- **EXTENDED MODELS FOR TSALBP WITH ERGONOMIC RISK CONSTRAINTS.**

BAUTISTA, J., BATALLA, C., ALFARO, R. y CANO, A. 2013. *Comunicación, Preprints (CD), IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013), San Petersburgo (Rusia)*. (Scopus).

- **IMPACT OF ERGONOMIC RISK REDUCTION IN THE TSALBP-1.**

BAUTISTA, J., BATALLA, C., ALFARO, R. y CANO, A. 2013. *Comunicación, Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings*. ISBN: 978-84-616-5410-9, pags 436-444, VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid.

- **ERGONOMIC RISK MINIMISATION IN ASSEMBLY LINE BALANCING.**

BAUTISTA, J., BATALLA, C. y ALFARO, R. 2014. *The global reach of industrial engineering. Enhancing synergies in a collaborative environment. Book of Abstracts*. ISBN: 978-84-617-0923-6, Pág.

60, 8th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XX International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, International IIE Conference 2014, Málaga.

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

BAUTISTA, J., BATALLA, C. y ALFARO, R. 2014. *Comunicación, XXIV Congreso Nacional de ACEDE, ACEDE 2014, Castellón.*

- **ALGORITMOS GRASP PARA EL EQUILIBRADO DE LÍNEAS CON RIESGO ERGONÓMICO MÍNIMO.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. y LLOVERA, S. 2015. *X Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2015). Mérida-Almendralejo. Comunicación Aceptada.*

- **IMPACTO DE LA LIMITACIÓN DEL ÁREA LINEAL SOBRE EL EQUILIBRADO DE LÍNEAS CON RIESGO ERGONÓMICO MÍNIMO.**

BAUTISTA, J., BATALLA, C. y ALFARO, R. 2015. *XXXV Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. IX Jornadas de Estadística Pública (SEIO 2015). Pamplona. Comunicación Aceptada.*

- **DELIMITING THE LINEAR AREA ON THE PROBLEMS OF ASSEMBLY LINE BALANCING WITH MINIMAL ERGONOMIC RISK.**

BAUTISTA, J., BATALLA-GARCÍA, C. y ALFARO-POZO, R. 2015. *9th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XXI International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. International IIE Conference 2015; Aveiro, Portugal. July 6-8, 2015. Comunicación Aceptada.*

7.1.4. Technical Reports

- **ERGONOMÍA Y EVALUACIÓN DEL RIESGO ERGONÓMICO.**

BATALLA, C., BAUTISTA, J. y ALFARO, R. 2015. *Report number: OPE-WP.2015/01 (20150117). URI: <http://hdl.handle.net/2117/26070>. Affiliation: Univesitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech.*

- **DESIGN AND BALANCING OF ASSEMBLY LINES THAT MINIMIZE ERGONOMIC RISK.**

BAUTISTA, J., BATALLA-GARCÍA, C., ALFARO-POZO, R., LLOVERA, S. y FORTUNY-SANTOS, J. 2015. DOI: 10.13140/2.1.5066.7841 Report number: OPE-WP.2015/02, Affiliation: Univesitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech.

7.2. Otras Publicaciones.

7.2.1. Artículos.

- **MODELING AND SOLVING THE MIXED-MODEL SEQUENCING PROBLEM TO IMPROVE PRODUCTIVITY.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R. y BATALLA, C. *International Journal of Production Economics*. 2015; Volumen 161, 83-95. doi:10.1016/j.ijpe.2014.11.018. (JCR).

- **CONSIDERATION OF HUMAN RESOURCES IN THE MIXED-MODEL SEQUENCING PROBLEM WITH WORK OVERLOAD MINIMIZATION: LEGAL PROVISIONS AND PRODUCTIVITY IMPROVEMENT.**

BAUTISTA, J., ALFARO-POZO, R. y BATALLA-GARCÍA, C. *Expert Systems With Applications*. *Proceso de Revisión*.

7.2.2. Capítulos de Libro

- **IMPACT OF THE PRODUCTION MIX PRESERVATION ON THE ORV PROBLEM.**

BAUTISTA, J., CANO, A., ALFARO, R. y BATALLA, C. 2013. *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science Volume 8109*, Springer, Holanda, pag. 250-259. ISBN: 978-3-642-40642-3.

- **INCORPORATING THE WORK PACE CONCEPT INTO THE MMSP-W.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. y CANO, A. 2014. *Managing Complexity, Challenges for Industrial Engineering and Operations Management*, Springer, Holanda, pag. 261-268. ISBN: 978-3-319-04704-1.

- **MIXED-MODEL SEQUENCING PROBLEM IMPROVING LABOUR CONDITIONS.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. y LLOVERA, S.M. 2015. *Enhancing Synergies in a Collaborative Environment. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering, Springer International Publishing, Switzerland, pag. 3-10. ISBN: 978-3-319-14077-3.*

7.2.3. Congresos

- **HYBRID PROCEDURE BASED ON BOUNDED DYNAMIC PROGRAMMING AND LINEAR PROGRAMMING FOR SOLVING A VARIANT OF THE MMSP-W.**

BAUTISTA, J., CANO, A., ALFARO, R. y BATALLA, C. 2013. *Comunicación, Preprints (CD), IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013), San Petersburgo (Rusia).*

- **SOLVING THE MIXED MODEL SEQUENCING PROBLEM WITH WORKLOAD MINIMIZATION WITH PRODUCT MIX PRESERVATION.**

BAUTISTA, J., CANO, A., ALFARO, R. y BATALLA, C. 2013. *Comunicación, Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings. ISBN: 978-84-616-5410-9, pags 409-417, VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid.*

- **INCORPORATING THE WORK PACE CONCEPT INTO THE MMSP-W.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. y CANO, A. 2013. *Comunicación, Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings. ISBN: 978-84-616-5410-9, pág. 427-435, VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid.*

- **ALGORITMOS GRASP PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA BLOCKING FLOW SHOP.**

BAUTISTA, J., CANO, A., ALFARO, R. y BATALLA, C. 2013. *Comunicación, Actas. ISBN: 978-84-695-8348-7. Pág. 443-452, IX Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2013), Madrid.*

- **IMPACT OF THE PRODUCTION MIX PRESERVATION ON THE ORV PROBLEM.**

BAUTISTA, J., CANO, A., ALFARO, R. y BATALLA, C. 2013. *Comunicación, Lecture Notes in Computer Science Volume 8109, pag. 250-259, XV Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial (CAEPIA), Madrid. (Scopus).*

- **MODELOS PARA LA LOCALIZACIÓN Y CUBRIMIENTO DEL SERVICIO DE DESFIBRILACIÓN SEMIAUTOMÁTICA EN ESPACIOS PÚBLICOS DE BARCELONA.**

BAUTISTA, J., SORIANO, J. M., ALFARO, R., BATALLA, C. y LLOVERA, S. *Comunicación, Archivos de Prevención de riesgos laborales. ISSN: 1138-9672, Volume 17, Especial Congreso 1, pag. 40, XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014), Zaragoza.*

- **UNIFYING METRICS OF RISK ASSESSMENT METHODS FOR APPLICATION TO MIXED MODELS ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEMS.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. y SÁNCHEZ, P. *Comunicación, Archivos de Prevención de riesgos laborales. ISSN: 1138-9672, Volume 17, Especial Congreso 1, pag. 27, XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014), Zaragoza.*

- **IMPACT DUE TO THE SATURATION CONCEPT IN ASSEMBLY LINES ON THE WORK OVERLOAD.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. y CANO, A. 2014. *XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014). Zaragoza. Abstarct-Conference Paper. Archivos de Prevención de riesgos laborales. Especial Congreso 1, vol. 17, 27. ISSN: 1138-9672.*

- **MIXED-MODEL SEQUENCING PROBLEM IMPROVING LABOUR CONDITIONS.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. y LLOVERA, S.M. 2014. *Comunicación, The global reach of industrial engineering. Enhancing synergies in a collaborative environment. Book of Abstracts. ISBN: 978-84-617-0923-6, Pág. 86, 8th International Conference on industrial Engineering and Industrial Management, XX International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, International IIE Conference 2014, Málaga.*

- **INCORPORANDO CONDICIONES LABORALES A PROBLEMAS DE SECUENCIAS EN LÍNEAS DE PRODUCTOS MIXTOS.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R. y BATALLA, C. 2014. *Comunicación, XXIV Congreso Nacional de ACEDE, ACEDE 2014, Castellón.*

- **EXTENSIONES DEL MMSP-W MEDIANTE LA ACTIVACIÓN DE LOS OPERADORES.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R. y BATALLA, C. 2015. *XXXV Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. IX Jornadas de Estadística Pública (SEIO 2015). Pamplona. Comunicación Aceptada.*

- **PRODUCTIVITY IMPROVEMENT, CONSIDERING LEGAL CONDITIONS AND JUST IN TIME PRINCIPLES IN THE MIXED-MODEL SEQUENCING PROBLEM.**

BAUTISTA, J., ALFARO-POZO, R. y BATALLA-GARCÍA, C. 2015. *XXI International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. International IIE Conference 2015; Aveiro, Portugal. July 6-8, 2015. Comunicación Aceptada.*

7.2.4. Technical Reports

- **INCORPORATING WORKING CONDITIONS TO A MIXED-MODEL SEQUENCING PROBLEM.**

BAUTISTA, J., ALFARO, R., LLOVERA, S. y BATALLA, C. 2014. DOI: 10.13140/2.1.2810.8486
Report number: OPE-WP.2014/10 (<http://hdl.handle.net/2117/24726>), Affiliation: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) BarcelonaTech.

ANEXOS A

RESULTADOS EXPERIENCIAS COMPUTACIONALES

A.1. Incorporación del factor ergonómico a la familia TSALBP.

A continuación, presentamos los resultados obtenidos por el contraste de la influencia de las restricciones relativas al factor ergonómico sobre el número de estaciones de la línea requeridas por SALBP-m y TSALBP-m, gracias al caso de estudio que corresponde a una línea de motores de la planta de Nissan en Barcelona.

Para el montaje de un motor (Pathfinder) se precisan 378 tareas (incluida la prueba rápida) las cuales hemos agrupado en 36 operaciones. Tras fijar coherentemente las ligaduras de precedencia entre las 36 operaciones, a partir de las ligaduras de precedencia de las 378 tareas originales, y considerar un tiempo de ciclo de 180 s, un área lineal disponible de 400 cm y un riesgo ergonómico máximo de 400 e-s (segundos ergonómicos), se han resuelto, mediante CPLEX, los tres problema objeto de estudio (SALBP-m, TSALBP-m y TSALBP-m- erg), obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla A.1, en la que se indica el número de la estación a la que queda asignada cada operación para cada uno de los tres problemas.

Las soluciones mostradas en la tabla A.1 son óptimas, quedando reflejada la necesidad de más operarios cuando se tienen en cuenta condiciones más realistas en los problemas de equilibrado de líneas.

j	t	a	R	P	$SALBP - m$	$TSALBP - m$	$TSALBP - m - erg$
1	100	400	200	-	1	1	1
2	105	400	210	1	2	2	2
3	45	100	90	1	3	3	3

Continúa en la página siguiente.

j	t	a	R	P	$SALBP - m$	$TSALBP - m$	$TSALBP - m - erg$
4	113	300	226	1, 2	3	3	3
5	168	400	336	1, 2, 4	4	4	4
6	17	150	34	2, 4, 5	5	5	5
7	97	250	194	6	5	5	5
8	50	200	100	2, 3, 7	5	6	6
9	75	200	150	2, 8	19	6	6
10	30	100	90	8	6	7	7
11	65	300	195	8, 10	6	7	7
12	35	350	105	10, 11	6	8	8
13	65	50	195	11, 12	7	8	8
14	115	300	345	12, 13	7	9	9
15	60	50	180	14	8	9	10
16	115	100	345	14, 15	8	10	11
17	60	150	120	13, 14, 16	9	10	12
18	105	250	210	16, 17	9	11	12
19	60	150	120	18	10	11	13
20	100	400	200	18, 19	10	12	14
21	100	400	200	19, 20	11	13	15
22	75	200	150	21, 22	11	14	16
23	75	175	225	21, 22	12	14	16
24	105	150	315	23	12	15	17
25	15	100	45	23, 24	17	15	17
26	35	150	105	24, 25	19	15	20
27	175	250	350	24	13	16	18
28	5	0	15	27	14	17	18
29	165	250	330	27, 28	14	17	19
30	5	0	15	27, 28	14	17	19
31	115	150	230	5, 29	15	18	20
32	60	200	120	29, 30, 31	15	18	21
33	85	200	170	5, 31	16	19	22
34	70	200	140	32	16	19	21
35	160	375	320	31, 33, 34	17	20	23
36	165	150	330	35	18	21	24

Tabla A.1: Soluciones obtenidas para SALBP-m, TSALBP-m y TSALBP-m-erg

A.2. Modelo extendido al problema TSALBP con restricciones de riesgo ergonómico.

Se muestran en la presente tabla, un ejemplo para el *Mix1* de una extensión al problema TSALBP (Time and Space Constrained Assambly Line Balancing) que incorpora restricciones relativas al riesgo ergonómico centrandose en el análisis de la variación del número de estaciones requeridas

por el equilibrado de la línea y en la variación de la asignación de tareas a las estaciones de trabajo en función de dos factores: (1) la variación de la demanda de motores y (2) la variación del límite superior del riesgo ergonómico. Dichos cálculos se realizaron para cada uno de los 9 Mixes y un valor del riesgo ergonómico máximo permitido $R_{\phi}^{max} = \{360, 370, 380, 390, 400, 410, 420, 430, 440\}$.

j	t	a	R	$R \cdot t$	P	j	t	a	R	$R \cdot t$	P
1	100.00	400	1.20	120	0	19	60.00	150	2.00	120	18
2	105.00	400	1.67	175	1	20	100.00	400	2.00	200	18, 19
3	45.00	100	2.00	90	1	21	100.00	400	2.00	200	19, 20
4	113.00	300	1.47	166	1.2	22	75.00	200	2.00	150	21
5	168.00	400	1.64	276	1, 2, 4	23	75.00	175	2.73	205	21, 22
6	17.00	150	2.00	34	2, 4, 5	24	105.00	150	3.00	315	23
7	97.00	250	2.00	194	6	25	15.00	100	3.00	45	23, 24
8	50.00	200	2.00	100	2, 3, 5, 7	26	35.00	150	3.00	105	24, 25
9	75.00	200	2.00	150	2, 8	27	175.00	250	2.00	350	24
10	30.00	100	3.00	90	8	28	5.00	0	3.00	15	27
11	65.00	300	2.62	170	8, 10	29	165.00	250	2.00	330	2, 27, 28
12	35.00	350	3.00	105	10, 11	30	5.00	0	3.00	15	27, 28
13	65.00	50	3.00	195	11, 12	31	115.00	150	2.00	230	5, 29
14	115.00	300	3.00	345	12, 13	32	60.00	200	1.75	105	29, 30, 31
15	60.00	50	3.00	180	14	33	85.00	200	1.47	125	5, 31
16	115.00	100	3.00	345	14, 15	34	70.00	200	1.43	100	32
17	60.00	150	2.00	120	13, 14, 16	35	160.00	375	1.63	260	31, 33, 34
18	105.00	250	2.00	210	16, 17	36	165.00	150	1.27	210	35

Tabla A.2: Resultado TSALBP-erg con riesgo 360 para el *Mix1*

A.3. Modelo de equilibrado de líneas de montaje por atributos temporales, espaciales y ergonómicos.

I. Análisis del impacto de la variación de la demanda sobre la configuración de la línea

A continuación se presentan, a modo de ejemplo, algunos de los resultados obtenidos para encontrar las mejores configuraciones de la línea. Estas configuraciones se han alcanzado mediante la utilización del solver CEPLEX v11.0 (single-processor license) con límite de tiempo CPU de 7200 segundos para cada uno de los nueve motores del plan de demanda dado un tiempo de ciclo máximo ($c = 180$ s) y un área lineal máxima requerida ($A = 400$ cm). Se ha establecido el número de estaciones ($m = \{21, 22, 23, 24\}$) y el valor del riesgo ergonómico máximo permitido $R_{\phi}^{max} = \{360, 370, 380, 390, 400, 410, 420, 430, 440\}$.

Mix1 con 23 estaciones y Riesgo 360

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

Tabla A.3: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el Mix1 con $m = 23$ y Riesgo 360

Deltas							Deltas						
<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	20	0.7174	0	0	127.17	13	0	10	0.7174	0	0	27.174
2	0	0	0.7174	0	0	42.174	14	0	15	0.4674	0	78.261	0
3	8	0	0.7174	0	0	111.17	15	0	15	0	0.2826	28.261	0
4	3	0	0.7174	0	0	11.739	16	0	0	0	0.7826	77.826	0
5	0	1	0.7174	0	0	91.739	17	20	0	0	12.826	32.826	0
6	0	15	0.7174	0	12.826	0	18	5	0	0	12.826	78.261	0
7	0	30	0.7174	0	32.826	0	19	25	0	0	0.2826	0	21.739
8	0	20	0.2174	0	62.826	0	20	10	0	0	0.2826	28.261	0
9	0	10	0	12.826	77.826	0	21	15	0	0.2174	0	0	32.174
10	0	5	0	12.826	77.826	0	22	15	0	0	0.0326	0	22.174
11	0	0	0	0.2826	0	71.739	23	45	0	0	0.2826	28.261	0
12	0	5	0.7174	0	0	17.174							

Tabla A.4: Mix1 con $m = 23$ y Riesgo 360

Elapsed real time = 7034,03sec. (tree size = 49,38MB, solutions = 82)

31,38%

Root node processing (before b & c): Real time = 7,69

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7192,28

Sync time (average) = 1041,02

Wait time (average) = 1699,02

Total (root+branch & cut) = 7199,97sec.

Mix2 con 23 estaciones y Riesgo 360

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

Tabla A.5: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el Mix2 con $m = 23$ y Riesgo 360

Deltas							Deltas						
<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	20.399	0.7174	0	0	107.48	13	0	4.9495	0.7174	0	0	17.026
2	0	0.4575	0.7174	0	0	22.9	14	0	10.225	0.7174	0	0	27.577
3	0	4.1838	0.7174	0	0	35.485	15	0	15.172	0.4674	0	7.3594	0
4	0	3.0672	0.2174	0	0	92.943	16	0.2749	0	0	0.2826	78.566	0
5	0	2.651	0.2174	0	0	72.691	17	29.224	0	0	1.7826	80.911	0
6	0	9.9654	0.7174	0	0	27.058	18	24.36	0	0	0.7826	46.615	0
7	0	30.075	0.2174	0	0	7.3761	19	25.853	0	0	0.2826	0	0.6045
8	0	35.174	0.2174	1E-16	17.332	0	20	19.774	0	0.2174	0	12.431	0
9	0	24.503	0.2174	0	49.343	0	21	9.9285	0	0.2174	0	0	32.403
10	0	10.121	0	1.7826	77.438	0	22	20.08	0	0	0.0326	0	2.1367
11	0	4.7215	0	0.7826	78.463	0	23	45.923	0	0	0.2826	3.8596	0
12	0.247	0	0	0.2826	0	6.6332							

Tabla A.6: Mix2 con $m = 23$ y Riesgo 360

Elapsed real time = 7190,01sec. (tree size = 102,85MB, solutions = 94)

26,42 %

Root node processing (before b & c): Real time = 27,09

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7172,87

Sync time (average) = 1104,73

Wait time (average) = 1810,86

Total (root+branch & cut) = 7199,97sec.

Mix10 con 23 estaciones y Riesgo 360

<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>
1	1	29	5	57	10	85	15	113	18
2	17	30	6	58	10	86	15	114	18
3	2	31	6	59	7	87	15	115	18
4	2	32	6	60	10	88	14	116	18
5	1	33	6	61	11	89	15	117	19
6	3	34	7	62	11	90	14	118	19
7	5	35	6	63	11	91	15	119	20
8	2	36	6	64	10	92	15	120	20
9	2	37	6	65	12	93	18	121	20
10	1	38	7	66	11	94	23	122	21
11	3	39	7	67	11	95	23	123	21
12	10	40	7	68	12	96	23	124	21
13	2	41	7	69	13	97	23	125	21
14	2	42	8	70	13	98	16	126	21
15	4	43	7	71	12	99	16	127	22
16	3	44	8	72	12	100	16	128	21
17	4	45	8	73	12	101	16	129	21
18	3	46	8	74	13	102	17	130	22
19	4	47	8	75	13	103	17	131	19
20	3	48	9	76	14	104	17	132	19
21	3	49	9	77	13	105	20	133	22

<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación
22	5	50	9	78	13	106	19	134	19
23	5	51	10	79	13	107	20	135	20
24	4	52	9	80	14	108	17	136	22
25	5	53	9	81	14	109	18	137	22
26	4	54	10	82	14	110	21	138	22
27	4	55	9	83	14	111	18	139	23
28	5	56	10	84	14	112	18	140	23

Tabla A.7: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el Mix10 con $m = 23$ y Riesgo 360

Deltas							Deltas						
<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	21.27	0.7174	0	0	127.33	13	0	11.943	0.7174	0	0	30.904
2	1.8227	0	0.7174	0	0	95.789	14	0	14.69	0.4674	0	7.9969	0
3	1.391	0	0.7174	0	0	64.331	15	1.2632	0	0	0.2826	81.15	0
4	3.224	0	0.7174	0	0	0.5692	16	0	3.2616	0	2.2826	14.522	0
5	0	0.0562	0.7174	0	0	7.1295	17	5.2877	0	0	0.2826	8.6484	0
6	0	15.896	0.7174	0	9.7632	0	18	0.4503	0	0	0.7826	3.5389	0
7	0	24.724	0.7174	0	48.719	0	19	28.838	0	0	0.2826	5.4052	0
8	1E-14	22.888	0.2174	0	54.228	0	20	9.0801	0	0	0.2826	0.8613	0
9	0	11.405	0	1.7826	88.677	0	21	15.277	0	0.2174	0	0	32.008
10	0	2.7764	0	0.7826	67.958	0	22	15.247	0	0	0.0326	0	22.207
11	2.5927	0	0	0.2826	0	1.8318	23	49.007	0	0	0.2826	6.785	0
12	0	4.5695	0.7174	0	0	16.156							

Tabla A.8: Mix10 con $m = 23$ y Riesgo 360

Elapsed real time = 6728,55sec. (tree size = 117,54MB, solutions = 72)

0,01 %

Root node processing (before b & c): Real time = 97,17

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7081,39

Sync time (average) = 1116,87

Wait time (average) = 1750,48

Total (root+branch & cut) = 7178,56sec. (optimum solution)

Mix3 con 23 estaciones y Riesgo 400

<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación
1	1	29	5	57	11	85	16	113	18
2	7	30	5	58	11	86	15	114	18
3	2	31	6	59	8	87	16	115	18
4	4	32	6	60	11	88	15	116	18
5	1	33	6	61	12	89	16	117	19
6	6	34	6	62	12	90	15	118	19
7	2	35	7	63	11	91	16	119	20

Continúa en la página siguiente.

<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>
8	5	36	7	64	11	92	16	120	20
9	2	37	7	65	13	93	22	121	20
10	1	38	8	66	12	94	23	122	20
11	2	39	8	67	12	95	23	123	20
12	3	40	8	68	13	96	23	124	21
13	2	41	8	69	14	97	23	125	21
14	2	42	8	70	12	98	17	126	21
15	3	43	9	71	13	99	16	127	22
16	3	44	9	72	13	100	17	128	21
17	3	45	9	73	13	101	17	129	22
18	4	46	9	74	14	102	17	130	22
19	3	47	9	75	14	103	17	131	19
20	3	48	10	76	14	104	18	132	19
21	4	49	10	77	14	105	20	133	22
22	4	50	10	78	14	106	19	134	19
23	4	51	10	79	14	107	20	135	21
24	5	52	11	80	15	108	18	136	21
25	5	53	10	81	15	109	18	137	21
26	4	54	10	82	15	110	22	138	22
27	4	55	10	83	15	111	18	139	23
28	5	56	11	84	15	112	18	140	23

Tabla A.9: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el Mix3 con $m = 23$ y Riesgo 400

<i>m</i>	Deltas						<i>m</i>	Deltas					
	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>		<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	20.608	0.7174	0	0	127.46	13	0	4.7301	0.7174	0	0	16.616
2	0	5.6912	0.7174	0	0	53.277	14	0	30.491	0.7174	0	0	68.138
3	0	8.8653	0.7174	0	0	24.887	15	0.5939	0	0	0.0326	38.938	0
4	0	2.7909	0.7174	0	0	71.76	16	4.6551	0	0	0.7826	116.63	0
5	0	3.7968	0.7174	0	0	14.749	17	18.907	0	0	1.2826	30.658	0
6	0	6.1412	0.2174	0	0	39.327	18	3.2402	0	0	1.2826	4.3524	0
7	0	9.3598	0.2174	0	0	6.0032	19	26.238	0	0	0.2826	0.6431	0
8	0	34.326	0.2174	0	19.828	0	20	19.483	0	0.2174	6E-17	11.784	0
9	0	24.689	0.2174	0	48.739	0	21	20.185	0	0.2174	0	0	32.044
10	0.1384	0	0	1.7826	123.22	0	22	10.294	0	0	0.0326	0	2.2902
11	0.9328	0	0	0.7826	64.128	0	23	46.285	0	0	0.2826	3.7061	0
12	0.5384	0	0.2174	0	0	6.0791							

Tabla A.10: Mix3 con $m = 23$ y Riesgo 400

Elapsed real time = 7196,20sec. (tree size = 212,28MB, solutions = 63) 15,03 %

Root node processing (before b & c): Real time = 12,84

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7187,03

Sync time (average) = 1178,22

Wait time (average) = 1943,51

Total (root+branch & cut) = 7199,87sec.

Mix12 con 23 estaciones y Riesgo 400

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

Tabla A.11: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el Mix12 con $m = 23$ y Riesgo 400

Deltas							Deltas						
<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	20.429	0.7174	0	0	127.41	13	0	4.9092	0.7174	0	0	16.968
2	0	10.211	0.7174	0	0	62.504	14	0	30.153	0.7174	0	0	67.456
3	0	4.1086	0.7174	0	0	15.367	15	0.1428	0	0	0.0326	38.062	0
4	0	0.8786	0.7174	0	0	8.9069	16	4.8186	0	0	0.7826	117.22	0
5	0	5.3333	0.7174	0	0	77.445	17	19.508	0	0	1.2826	31.866	0
6	0	5.3538	0.2174	0	0	37.977	18	4.1282	0	0	1.2826	6.1242	0
7	0	9.7086	0.2174	0	0	6.608	19	25.698	0	0	0.2826	0	0.7013
8	0	34.877	0.2174	0	18.203	0	20	19.765	0	0.2174	6E-17	12.376	0
9	0	24.679	0.2174	0	48.795	0	21	10.08	0	0.2174	1E-16	0	32.185
10	0.143	0	0	1.2826	123.26	0	22	20.103	0	0	0.0326	0	2.1991
11	0.3715	0	0	1.2826	63.283	0	23	45.802	0	0	0.2826	3.5301	0
12	0.0801	0	0.2174	0	0	6.9897							

Tabla A.12: Mix12 con $m = 23$ y Riesgo 400

Elapsed real time = 7182,52sec. (tree size = 62,71MB, solutions = 118) 33,88 %

Root node processing (before b & c): Real time = 48,03

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7151,97

Sync time (average) = 1191,37

Wait time (average) = 1903,28

Total (root+branch & cut) = 7200,00sec.

Mix18 con 23 estaciones y Riesgo 400

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

Tabla A.13: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el Mix18 con $m = 23$ y Riesgo 400

<i>m</i>	Deltas						<i>m</i>	Deltas					
	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>		<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	19.652	0.7174	0	0	106.92	13	0	8.7614	0.7174	0	0	24.585
2	0	0.4842	0.7174	0	0	23.164	14	0	16.758	0.4674	0	4.0515	0
3	0.8288	0	0.7174	0	0	24.895	15	0.2552	0	0	0.2826	78.617	0
4	2.3767	0	0.7174	0	0	82.69	16	0	0.177	0	2.2826	22.424	0
5	8.4362	0	0.7174	0	0	51.952	17	1.4275	0	0	1.2826	0.8134	0
6	0	31.427	0.7174	0	28.656	0	18	4.2571	0	0	0.2826	6.4312	0

<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
7	0	9.7086	0.2174	0	0	6.608	19	25.742	0	0	0.2826	0	1.6374
8	0	39.376	0	0.2826	4.8106	0	20	15.108	0	0.2174	0	0	1.7564
9	5.1554	0	0	0.2826	123.4	0	21	9.4715	0	0.2174	0	0	7.3296
10	0.1745	0	0	1.7826	93.735	0	22	19.797	0	0	0.0326	0	27.667
11	0	2.1144	0	0.2826	0	11.291	23	45.795	0	0	0.2826	4.585	0
12	0	5.2442	0.7174	0	0	17.551							

Tabla A.14: *Mix18* con $m = 23$ y *Riesgo* 400

Elapsed real time = 7160,70sec. (tree size = 74,82MB, solutions = 90) 27,90 %

Root node processing (before b & c): Real time = 34,72

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7165,28

Sync time (average) = 1154,11

Wait time (average) = 1773,53

Total (root+branch & cut) = 7200,00sec.

Mix6 con 23 estaciones y Riesgo 440

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

Tabla A.15: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el *Mix6* con $m = 23$ y *Riesgo* 440

Deltas							Deltas						
<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	19.761	0.7174	0	0	107	13	0	8.8357	0.7174	0	0	24.771
2	0.0282	0	0.7174	0	0	22.133	14	0	16.173	0.4674	0	5.3073	0
3	0.4923	0	0.7174	0	0	25.782	15	0.1819	0	0	0.2826	78.383	0
4	2.3049	0	0.7174	0	0	82.757	16	0	0.1033	0	2.2826	22.588	0
5	7.9363	0	0.7174	0	0	52.394	17	5.3541	0	0	0.2826	8.6221	0
6	0	14.866	0.7174	0	13.604	0	18	5.3106	0	0	0.7826	13.725	0
7	0	30.961	0.7174	0	30.019	0	19	25.508	0	0	0.2826	0	1.7983
8	0	39.583	0	0.2826	4.1526	0	20	10.083	0	0	0.2826	3.0832	0
9	0.068	0	0	0.7826	108.1	0	21	9.6791	0	0.2174	1E-16	0	42.527
10	5.1495	0	0	1.2826	108.53	0	22	19.589	0	0	0.0326	0	12.91
11	0	1.42	0	0.2826	0	9.94	23	45.514	0	0	0.2826	3.9915	0
12	0	5.4968	0.7174	0	0	18.094							

Tabla A.16: *Mix6* con $m = 23$ y *Riesgo* 440

Elapsed real time = 7180,55sec. (tree size = 50,75MB, solutions = 94) 29,58 %

Root node processing (before b & c): Real time = 73,89

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7123,13

Sync time (average) = 1093,13

Wait time (average) = 1724,38

Total (root+branch & cut) = 7200,02sec.

Mix9 con 23 estaciones y Riesgo 440

<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>
1	1	29	5	57	10	85	15	113	17
2	18	30	6	58	10	86	15	114	17
3	2	31	6	59	8	87	15	115	17
4	2	32	6	60	8	88	14	116	18
5	2	33	6	61	11	89	15	117	19
6	3	34	7	62	11	90	14	118	19
7	5	35	6	63	11	91	15	119	20
8	3	36	6	64	10	92	15	120	20
9	1	37	6	65	12	93	21	121	20
10	1	38	7	66	11	94	23	122	20
11	2	39	7	67	11	95	23	123	20
12	10	40	7	68	12	96	23	124	21
13	2	41	7	69	13	97	23	125	21
14	2	42	8	70	13	98	16	126	21
15	4	43	7	71	12	99	16	127	21
16	3	44	8	72	12	100	16	128	21
17	4	45	8	73	12	101	16	129	21
18	3	46	9	74	13	102	17	130	22
19	3	47	9	75	13	103	17	131	19
20	4	48	9	76	14	104	17	132	19
21	3	49	9	77	13	105	20	133	22

<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación
22	5	50	9	78	13	106	19	134	19
23	5	51	10	79	13	107	18	135	22
24	5	52	10	80	14	108	17	136	22
25	4	53	10	81	14	109	17	137	22
26	4	54	9	82	14	110	21	138	22
27	4	55	9	83	14	111	17	139	23
28	5	56	10	84	14	112	18	140	23

Tabla A.17: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el Mix9 con $m = 23$ y Riesgo 440

Deltas							Deltas						
<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	19.145	0.7174	0	0	106.54	13	0	8.1251	0.7174	0	0	23.321
2	10.295	0	0.7174	0	0	101.94	14	0	17.172	0.4674	0	3.2625	0
3	0.551	0	0.7174	0	0	68.065	15	0.0536	0	0	0.2826	78.11	0
4	2.2427	0	0.7174	0	0	2.5859	16	0.4399	0	0	2.2826	24.004	0
5	0	1.1602	0.7174	0	0	9.3917	17	2.1786	0	0	1.2826	2.2928	0
6	0	14.617	0.7174	0	14.751	0	18	4.4268	0	0	0.2826	6.7578	0
7	0	31.77	0.7174	0	27.638	0	19	25.122	0	0	0.2826	0	3.0459
8	0	39.221	0	0.2826	5.2845	0	20	15.37	0	0.2174	6E-17	0	1.2242
9	0.2742	0	0	0.7826	123.77	0	21	9.4366	0	0.2174	0	0	7.0714
10	4.5071	0	0	1.2826	92.114	0	22	19.593	0	0	0.0326	0	27.932
11	0	3.0558	0	0.2826	0	13.183	23	45.153	0	0	0.2826	4.145	0
12	0	5.3791	0.7174	0	0	17.83							

Tabla A.18: Mix9 con $m = 23$ y Riesgo 440

Elapsed real time = 7196,69sec. (tree size = 103,49MB, solutions = 136) 17,48 %

Root node processing (before b & c): Real time = 35,59

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7164,39

Sync time (average) = 1082,23

Wait time (average) = 1722,94

Total (root+branch & cut) = 7199,98sec.

Mix11 con 23 estaciones y Riesgo 440

<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación	<i>j</i>	N. de la Estación
1	1	29	6	57	11	85	16	113	18
2	6	30	6	58	11	86	15	114	18
3	1	31	6	59	8	87	16	115	18
4	3	32	6	60	11	88	15	116	18
5	2	33	7	61	12	89	16	117	19
6	3	34	7	62	12	90	15	118	19
7	5	35	7	63	11	91	16	119	20
8	5	36	7	64	11	92	16	120	20

Continúa en la página siguiente.

<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>	<i>j</i>	<i>N. de la Estación</i>
9	2	37	7	65	13	93	22	121	20
10	1	38	8	66	12	94	23	122	20
11	2	39	8	67	12	95	23	123	20
12	7	40	8	68	13	96	23	124	21
13	2	41	8	69	14	97	23	125	21
14	2	42	8	70	12	98	17	126	21
15	3	43	9	71	13	99	16	127	21
16	2	44	9	72	13	100	17	128	21
17	4	45	9	73	13	101	17	129	21
18	2	46	9	74	14	102	17	130	22
19	4	47	10	75	14	103	17	131	19
20	3	48	9	76	14	104	18	132	19
21	4	49	10	77	14	105	20	133	22
22	5	50	11	78	14	106	19	134	19
23	5	51	10	79	14	107	19	135	21
24	5	52	10	80	15	108	18	136	22
25	4	53	10	81	15	109	18	137	22
26	4	54	11	82	15	110	22	138	22
27	4	55	10	83	15	111	18	139	23
28	5	56	11	84	18	112	18	140	23

Tabla A.19: Variables binarias ($x_{j,k}$) para el *Mix11* con $m = 23$ y *Riesgo 440*

Deltas							Deltas						
<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>	<i>m</i>	<i>t+</i>	<i>t-</i>	<i>a+</i>	<i>a-</i>	<i>R+</i>	<i>R-</i>
1	0	19.538	0.7174	0	0	127.18	13	0	4.8998	0.7174	0	0	17.093
2	0	0.6043	0.7174	0	0	43.878	14	0	30.788	0.7174	0	0	68.87
3	0.5592	0	0.7174	0	0	124.02	15	1.1476	0	0	0.0326	40.421	0
4	0.1672	0	0.2174	0	0	6.9585	16	5.135	0	0	0.7826	118.21	0
5	0	0.9296	0.7174	0	0	9.1521	17	19.482	0	0	1.2826	31.67	0
6	0	4.2009	0.7174	0	0	15.695	18	5.6305	0	0	1.2826	8.9334	0
7	0	30.557	0.2174	0	0	8.8396	19	28.613	0	0	0.2826	10.871	0
8	0	33.765	0.2174	1E-16	21.427	0	20	15.166	0	0.2174	0	0	2.0289
9	0	25.115	0.2174	0	47.377	0	21	10.537	0	0.2174	1E-16	0	31.282
10	0	0.9437	0	2.2826	119.89	0	22	19.992	0	0	0.0326	0	2.3698
11	0	0.0746	0	0.2826	62.466	0	23	43.61	0	0	0.2826	0.6487	0
12	1.3752	0	0.2174	0	0	4.5426							

Tabla A.20: *Mix11* con $m = 23$ y *Riesgo 440*

Elapsed real time = 7131,67sec. (tree size = 60,15MB, solutions = 127) 36,71 %

Root node processing (before b & c): Real time = 8,73

Parallel b & c, 8 threads: Real time = 7191,27

Sync time (average) = 1091,70

Wait time (average) = 1773,35

Total (root+branch & cut) = 7200,00sec.

II. Factibilidad

En la tabla A.21 se muestra, si es posible realizar los 9 planes de demanda dado:

- Tiempo de ciclo máximo de 180 s
- Área máxima de $A = 400 \text{ cm}$
- $m = \{21, 22, 23, 24.\}$
- $R_{\phi}^{max} = \{360, 370, 380, 390, 400, 410, 420, 430, 440\}$

m	R^{max}	Mix1	Mix2	Mix3	Mix6	Mix9	Mix10	Mix11	Mix12	Mix18
21	360	No	No	No	No	No	No	No	No	No
21	370	No	No	No	No	No	No	No	No	No
21	380	No	No	No	No	No	No	No	No	No
21	390	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
21	400	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
21	410	Si	No	No	No	No	Si	No	No	No
21	420	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No
21	430	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	No
21	440	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	360	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	370	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	380	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	390	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	400	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	410	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	420	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	430	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
22	440	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	360	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	370	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	380	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	390	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	400	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	410	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	420	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	430	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
23	440	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	360	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	370	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	380	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	390	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	400	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Continúa en la página siguiente.

m	R^{max}	Mix1	Mix2	Mix3	Mix6	Mix9	Mix10	Mix11	Mix12	Mix18
24	410	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	420	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	430	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
24	440	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla A.21: Factibilidad entre los 9 motores del plan de demanda estableciendo 4 número de estaciones de trabajo y nueve valores para el riesgo ergonómico.

III. Matrices de Afinidad entre los 9 Mix

Mediante las diversas configuraciones y las cargas en sus estaciones se determina el índice de afinidad para cada una de las estaciones de trabajo. De este modo, obtendremos el grado de afinidad entre las configuraciones siendo completa cuando ésta adopte el valor 1.

Se define para cada estación de trabajo ($\forall k \in K$) el siguiente índice de afinidad dada mediante dos configuraciones, $\hat{\varepsilon}_1$ y $\hat{\varepsilon}_2$, obtenidas por $M_AALB_A_R(T, A, R)$ y caracterizadas por sus cargas en las estaciones de trabajo ($S_1^{\hat{\varepsilon}_1}, \dots, S_m^{\hat{\varepsilon}_1}$) y ($S_1^{\hat{\varepsilon}_2}, \dots, S_m^{\hat{\varepsilon}_2}$):

$$\mathcal{A}(S_k^{\hat{\varepsilon}_1}, S_k^{\hat{\varepsilon}_2}) = \frac{2|S_k^{\hat{\varepsilon}_1} \cap S_k^{\hat{\varepsilon}_2}|}{|S_k^{\hat{\varepsilon}_1}| + |S_k^{\hat{\varepsilon}_2}|} \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (\text{A.1})$$

Coherentemente, el índice de afinidad entre las configuraciones $\hat{\varepsilon}_1$ y $\hat{\varepsilon}_2$ será:

$$\mathcal{A}(\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2) = \frac{\sum_{k=1}^m \mathcal{A}(S_k^{\hat{\varepsilon}_1}, S_k^{\hat{\varepsilon}_2})}{m} \quad (\text{A.2})$$

		$R = 360$									Promedio
		$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	
$R = 360$	$\hat{\varepsilon}_{.01}$	1.000	0.470	0.738	0.448	0.471	0.725	0.747	0.483	0.774	0.651
	$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.470	1.000	0.364	0.748	0.735	0.358	0.488	0.784	0.398	0.594
	$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.738	0.364	1.000	0.352	0.363	0.948	0.739	0.433	0.853	0.643
	$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.448	0.748	0.352	1.000	0.870	0.358	0.415	0.818	0.384	0.599
	$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.471	0.735	0.363	0.870	1.000	0.380	0.417	0.871	0.385	0.610
	$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.725	0.358	0.948	0.358	0.380	1.000	0.745	0.423	0.851	0.643
	$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.747	0.488	0.739	0.415	0.417	0.745	1.000	0.440	0.718	0.634

	$R = 360$									<i>Promedio</i>
	$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	
$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.483	0.784	0.433	0.818	0.871	0.423	0.440	1.000	0.434	0.632
$\hat{\varepsilon}_{.18}$	0.774	0.398	0.853	0.384	0.385	0.851	0.718	0.434	1.000	0.644
<i>Promedio</i>	0.651	0.594	0.643	0.599	0.610	0.643	0.634	0.632	0.644	

Tabla A.22: Matriz de afinidad $R = 360$ versus $R = 360$ para los 9 Mix con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

	$R = 400$									<i>Promedio</i>
	$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	
$\hat{\varepsilon}_{.01}$	0.514	0.465	0.489	0.726	0.799	0.514	0.461	0.522	0.664	0.573
$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.743	0.715	0.745	0.443	0.450	0.748	0.725	0.732	0.457	0.640
$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.408	0.431	0.436	0.791	0.829	0.453	0.387	0.410	0.738	0.542
$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.873	0.821	0.843	0.396	0.408	0.839	0.822	0.835	0.342	0.686
$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.794	0.836	0.842	0.404	0.397	0.830	0.837	0.837	0.373	0.683
$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.433	0.417	0.415	0.777	0.811	0.433	0.398	0.396	0.744	0.536
$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.481	0.404	0.503	0.837	0.759	0.521	0.506	0.494	0.789	0.588
$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.814	0.827	0.834	0.439	0.409	0.825	0.759	0.794	0.406	0.679
$\hat{\varepsilon}_{.18}$	0.452	0.406	0.412	0.791	0.866	0.436	0.418	0.449	0.806	0.560
<i>Promedio</i>	0.612	0.591	0.613	0.623	0.636	0.622	0.590	0.608	0.591	

Tabla A.23: Matriz de afinidad $R = 360$ versus $R = 400$ para los 9 Mix con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

	$R = 440$									<i>Promedio</i>
	$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	
$\hat{\varepsilon}_{.01}$	0.783	0.465	0.734	0.750	0.728	0.744	0.546	0.766	0.533	0.672
$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.382	0.744	0.387	0.472	0.419	0.399	0.798	0.393	0.740	0.526
$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.786	0.389	0.926	0.782	0.812	0.925	0.450	0.942	0.416	0.714
$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.369	0.750	0.374	0.415	0.365	0.380	0.700	0.388	0.829	0.508
$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.377	0.790	0.396	0.411	0.387	0.390	0.725	0.371	0.778	0.514
$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.820	0.402	0.934	0.771	0.806	0.933	0.430	0.909	0.414	0.713
$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.748	0.395	0.783	0.828	0.725	0.777	0.478	0.799	0.467	0.667
$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.425	0.835	0.446	0.433	0.413	0.433	0.748	0.441	0.799	0.553
$\hat{\varepsilon}_{.18}$	0.793	0.406	0.850	0.792	0.852	0.850	0.470	0.830	0.455	0.700
<i>Promedio</i>	0.609	0.575	0.648	0.628	0.612	0.648	0.594	0.649	0.603	

Tabla A.24: Matriz de afinidad $R = 360$ versus $R = 440$ para los 9 Mix con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

	$R = 360$									<i>Promedio</i>	
	$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$		
$R = 400$	$\hat{\varepsilon}_{.01}$	0.514	0.743	0.408	0.873	0.794	0.433	0.481	0.814	0.452	0.612
	$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.465	0.715	0.431	0.821	0.836	0.417	0.404	0.827	0.406	0.591
	$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.489	0.745	0.436	0.843	0.842	0.415	0.503	0.834	0.412	0.613
	$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.726	0.443	0.791	0.396	0.404	0.777	0.837	0.439	0.791	0.623
	$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.799	0.450	0.829	0.408	0.397	0.811	0.759	0.409	0.866	0.636
	$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.514	0.748	0.453	0.839	0.830	0.433	0.521	0.825	0.436	0.622
	$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.461	0.725	0.387	0.822	0.837	0.398	0.506	0.759	0.418	0.590
	$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.522	0.732	0.410	0.835	0.837	0.396	0.494	0.794	0.449	0.608
	$\hat{\varepsilon}_{.18}$	0.664	0.457	0.738	0.342	0.373	0.744	0.789	0.406	0.806	0.591
	<i>Promedio</i>	0.573	0.640	0.542	0.686	0.683	0.536	0.588	0.679	0.560	

Tabla A.25: Matriz de afinidad $R = 400$ versus $R = 360$ para los 9 Mix con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

	$R = 400$									<i>Promedio</i>	
	$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$		
$R = 400$	$\hat{\varepsilon}_{.01}$	1.000	0.771	0.841	0.445	0.472	0.828	0.831	0.824	0.402	0.713
	$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.771	1.000	0.824	0.394	0.413	0.820	0.778	0.786	0.373	0.684
	$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.841	0.824	1.000	0.472	0.449	0.932	0.837	0.890	0.407	0.739
	$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.445	0.394	0.472	1.000	0.831	0.484	0.456	0.475	0.862	0.602
	$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.472	0.413	0.449	0.831	1.000	0.466	0.458	0.469	0.802	0.596
	$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.828	0.820	0.932	0.484	0.466	1.000	0.841	0.914	0.424	0.746
	$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.831	0.778	0.837	0.456	0.458	0.841	1.000	0.817	0.429	0.716
	$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.824	0.786	0.890	0.475	0.469	0.914	0.817	1.000	0.410	0.732
	$\hat{\varepsilon}_{.18}$	0.402	0.373	0.407	0.862	0.802	0.424	0.429	0.410	1.000	0.568
	<i>Promedio</i>	0.713	0.684	0.739	0.602	0.596	0.746	0.716	0.732	0.568	

Tabla A.26: Matriz de afinidad $R = 400$ versus $R = 400$ para los 9 Mix con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

	$R = 440$									<i>Promedio</i>	
	$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$		
$R = 400$	$\hat{\varepsilon}_{.01}$	0.455	0.776	0.449	0.471	0.429	0.4491	0.7658	0.451	0.8857	0.570
	$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.386	0.794	0.418	0.405	0.39	0.4294	0.6932	0.416	0.7726	0.523
	$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.442	0.755	0.443	0.497	0.395	0.449	0.7884	0.4787	0.8505	0.567
	$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.804	0.367	0.843	0.936	0.802	0.8082	0.4563	0.8373	0.4379	0.699
	$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.825	0.396	0.83	0.844	0.903	0.8413	0.4977	0.8748	0.4941	0.723
	$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.461	0.747	0.462	0.508	0.412	0.4669	0.7918	0.4962	0.8116	0.573
	$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.401	0.727	0.413	0.457	0.416	0.395	0.7494	0.4166	0.8544	0.537
	$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.428	0.77	0.412	0.488	0.412	0.4238	0.7982	0.4531	0.84	0.558

		<i>R</i> = 440									
		$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	<i>Promedio</i>
$\hat{\varepsilon}_{.18}$		0.771	0.364	0.786	0.846	0.899	0.762	0.4283	0.7518	0.388	0.666
<i>Promedio</i>		0.553	0.633	0.562	0.606	0.562	0.558	0.663	0.575	0.704	

Tabla A.27: Matriz de afinidad *R* = 400 versus *R* = 440 para los 9 Mix con *m* = 23. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

		<i>R</i> = 360									
		$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	<i>Promedio</i>
<i>R</i> = 440	$\hat{\varepsilon}_{.01}$	0.783	0.382	0.786	0.369	0.377	0.820	0.748	0.425	0.793	0.609
	$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.465	0.744	0.389	0.750	0.790	0.402	0.395	0.835	0.406	0.575
	$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.734	0.387	0.926	0.374	0.396	0.934	0.783	0.446	0.850	0.648
	$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.750	0.472	0.782	0.415	0.411	0.771	0.828	0.433	0.792	0.628
	$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.728	0.419	0.812	0.365	0.387	0.806	0.725	0.413	0.852	0.612
	$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.744	0.399	0.925	0.380	0.390	0.933	0.777	0.433	0.850	0.648
	$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.546	0.798	0.450	0.700	0.725	0.430	0.478	0.748	0.470	0.594
	$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.766	0.393	0.942	0.388	0.371	0.909	0.799	0.441	0.830	0.649
	$\hat{\varepsilon}_{.18}$	0.533	0.740	0.416	0.829	0.778	0.414	0.467	0.799	0.455	0.603
<i>Promedio</i>		0.672	0.526	0.714	0.508	0.514	0.713	0.667	0.553	0.700	

Tabla A.28: Matriz de afinidad *R* = 440 versus *R* = 360 para los 9 Mix con *m* = 23. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

		<i>R</i> = 400									
		$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	<i>Promedio</i>
<i>R</i> = 440	$\hat{\varepsilon}_{.01}$	0.455	0.386	0.442	0.804	0.825	0.461	0.401	0.428	0.771	0.553
	$\hat{\varepsilon}_{.02}$	0.776	0.794	0.755	0.367	0.396	0.747	0.727	0.770	0.364	0.633
	$\hat{\varepsilon}_{.03}$	0.449	0.418	0.443	0.843	0.830	0.462	0.413	0.412	0.786	0.562
	$\hat{\varepsilon}_{.06}$	0.471	0.405	0.497	0.936	0.844	0.508	0.457	0.488	0.846	0.606
	$\hat{\varepsilon}_{.09}$	0.429	0.390	0.395	0.802	0.903	0.412	0.416	0.412	0.899	0.562
	$\hat{\varepsilon}_{.10}$	0.449	0.429	0.449	0.808	0.841	0.467	0.395	0.424	0.762	0.558
	$\hat{\varepsilon}_{.11}$	0.766	0.693	0.788	0.456	0.498	0.792	0.749	0.798	0.428	0.663
	$\hat{\varepsilon}_{.12}$	0.451	0.416	0.479	0.837	0.875	0.496	0.417	0.453	0.752	0.575
	$\hat{\varepsilon}_{.18}$	0.886	0.773	0.851	0.438	0.494	0.812	0.854	0.840	0.388	0.704
<i>Promedio</i>		0.570	0.523	0.567	0.699	0.723	0.573	0.537	0.558	0.666	

Tabla A.29: Matriz de afinidad *R* = 440 versus *R* = 400 para los 9 Mix con *m* = 23. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

	$R = 440$									<i>Promedio</i>
	$\varepsilon_{.01}$	$\varepsilon_{.02}$	$\varepsilon_{.03}$	$\varepsilon_{.06}$	$\varepsilon_{.09}$	$\varepsilon_{.10}$	$\varepsilon_{.11}$	$\varepsilon_{.12}$	$\varepsilon_{.18}$	
$\varepsilon_{.01}$	1.000	0.393	0.862	0.816	0.804	0.861	0.468	0.845	0.459	0.723
$\varepsilon_{.02}$	0.393	1.000	0.409	0.367	0.383	0.389	0.732	0.368	0.791	0.537
$\varepsilon_{.03}$	0.862	0.409	1.000	0.826	0.826	0.965	0.458	0.928	0.436	0.746
$\varepsilon_{.06}$	0.816	0.367	0.826	1.000	0.778	0.837	0.492	0.841	0.445	0.711
$\varepsilon_{.09}$	0.804	0.383	0.826	0.778	1.000	0.825	0.456	0.815	0.436	0.702
$\varepsilon_{.10}$	0.861	0.389	0.965	0.837	0.825	1.000	0.458	0.940	0.430	0.745
$\varepsilon_{.11}$	0.468	0.732	0.458	0.492	0.456	0.458	1.000	0.480	0.765	0.590
$\varepsilon_{.12}$	0.845	0.368	0.928	0.841	0.815	0.940	0.480	1.000	0.452	0.741
$\varepsilon_{.18}$	0.459	0.791	0.436	0.445	0.436	0.430	0.765	0.452	1.000	0.580
<i>Promedio</i>	0.723	0.537	0.746	0.711	0.702	0.745	0.590	0.741	0.580	

Tabla A.30: Matriz de afinidad $R = 440$ versus $R = 440$ para los 9 Mix con $m = 23$. $\hat{\varepsilon}$ corresponde a un Mix y ε corresponde al propio Mix.

IV. Sobrecarga de las estaciones

Para encontrar la sobrecarga de las estaciones partiremos de las 4 configuraciones más robustas de la línea, *Mix1*, *Mix2*, *Mix6* y *Mix9*, versus todas las demás configuraciones, y unos valores establecidos ($m = 23$, $c = 180$ s, $A = 400$ cm y $R_{\phi}^{max} = 360$ e - s).

En las tablas A.31; A.32; A.33; A.34; A.35; A.36; A.37 y A.38, se presentan las soluciones obtenidas para encontrar los índices de sobre-exceso máximos (g_1) y sobre-excesos globales (g_2) (ver Tabla A.40), de los atributos, tiempo de proceso, área lineal requerida y riesgo ergonómico, sobre los valores medios de dichos atributos.

Por otra parte, se presentan las tablas A.41; A.42; A.43; A.44; A.45; A.46; A.47 y A.48, para encontrar el sobre-exceso máximos (g_1^{mas}) y sobre-excesos globales (g_2^{mas}) (ver Tabla A.50) de los atributos, tiempo de proceso, área lineal requerida y riesgo ergonómico, sobre los valores máximos permitidos de dichos atributos.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>									<i>Areas</i>									<i>Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	110.00	109.54	109.13	109.97	110.38	107.78	110.48	109.55	109.94	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	140.00	139.74	139.40	140.10	140.44	138.64	140.14	139.70	140.14
2	130.00	129.20	129.28	129.13	129.06	126.89	131.67	129.52	128.70	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	225.00	223.56	223.59	223.50	223.47	219.25	227.96	224.10	222.77
3	138.00	138.22	136.18	140.28	142.32	136.87	135.48	137.48	141.41	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	156.00	156.28	154.01	158.59	160.86	154.88	153.10	155.44	159.87
4	133.00	133.19	133.65	132.72	132.26	134.22	133.09	133.25	132.59	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	266.00	266.38	267.30	265.45	264.52	268.43	266.18	266.50	265.17
5	129.00	128.97	129.02	128.91	128.86	128.91	129.14	128.99	128.87	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	258.00	257.94	258.03	257.81	257.72	257.82	258.28	257.99	257.73
6	115.00	114.80	114.54	115.14	115.40	114.01	115.00	114.76	115.17	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	280.00	279.40	278.25	280.71	281.86	276.60	279.74	279.16	280.98
7	100.00	99.94	100.73	99.13	98.34	100.52	100.95	100.24	98.70	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	300.00	299.81	302.18	297.39	295.02	301.56	302.86	300.71	296.11
8	110.00	110.07	110.20	109.93	109.79	110.39	110.02	110.10	109.89	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	330.00	330.20	330.60	329.78	329.37	331.17	330.05	330.31	329.67
9	120.00	120.38	120.28	120.48	120.58	121.41	119.14	120.21	120.72	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	345.00	346.07	345.72	346.44	346.79	348.95	342.48	345.59	347.15
10	125.00	125.13	125.12	125.15	125.15	125.53	124.72	125.09	125.22	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	345.00	345.17	344.73	345.61	346.06	345.24	344.21	345.00	345.92
11	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77
12	125.00	124.67	124.83	124.50	124.35	123.83	125.84	124.84	124.26	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	250.00	249.34	249.65	249.01	248.70	247.66	251.67	249.67	248.53
13	120.00	120.11	119.10	121.17	122.18	119.48	118.68	119.70	121.73	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	240.00	240.23	238.20	242.33	244.36	238.95	237.37	239.40	243.46
14	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11
15	115.00	115.22	115.66	114.77	114.33	116.31	115.02	115.32	114.66	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.64	271.53	269.72	268.82	273.42	269.67	270.77	269.59
16	130.00	129.62	129.18	130.11	130.54	128.09	130.22	129.59	130.14	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	345.00	343.74	342.37	345.26	346.64	338.74	345.86	343.67	345.32
17	150.00	149.77	148.87	150.70	151.60	148.21	149.50	149.49	151.04	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	300.00	299.54	297.74	301.40	303.20	296.42	298.99	298.98	302.07
18	135.00	134.19	133.20	135.17	136.15	130.76	135.64	134.11	135.25	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	275.00	273.39	271.44	275.35	277.31	266.61	276.25	273.24	275.52
19	155.00	155.83	156.20	155.51	155.14	158.75	153.61	155.68	155.74	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	265.00	266.48	267.73	265.30	264.06	272.24	263.15	266.41	265.42
20	140.00	139.85	139.60	140.08	140.33	139.14	140.08	139.83	140.13	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	269.61	269.02	270.19	270.78	267.84	270.22	269.58	270.29
21	145.00	144.95	145.19	144.70	144.45	145.04	145.36	145.06	144.55	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	235.00	234.87	235.10	234.61	234.37	234.68	235.55	235.01	234.42
22	145.00	144.95	145.31	144.57	144.21	145.16	145.49	145.10	144.37	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	245.00	244.76	245.35	244.16	243.57	244.63	246.09	245.04	243.75
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65

Tabla A.31: Datos de la configuración del *Mix1* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Sobrecarga Tiempos</i>									<i>Sobrecarga Areas</i>									<i>Sobrecarga Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.06	0.06	0.05	0.08	0.09	0.05	0.04	0.06	0.09	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.12	0.12	0.13	0.11	0.10	0.13	0.13	0.13	0.11
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.24	0.23	0.24	0.23
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.30	0.29	0.30	0.30	0.31	0.28	0.29	0.30
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29	0.30
11	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.28	0.29	0.30	0.27	0.29	0.29	0.29
17	0.15	0.15	0.15	0.16	0.17	0.14	0.15	0.15	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.11	0.13	0.14	0.11	0.12	0.12	0.13
18	0.04	0.03	0.02	0.04	0.05	0.01	0.04	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.00	0.03	0.02	0.03
19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19	0.22	0.18	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
21	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.02
<i>Max</i>	0.346	0.353	0.356	0.350	0.347	0.377	0.335	0.352	0.352	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.291	0.296	0.294	0.297	0.298	0.308	0.294	0.294	0.300
<i>Sum</i>	1.123	1.133	1.129	1.149	1.169	1.158	1.114	1.128	1.162	2.242	2.242	2.242	2.242	2.242	2.242	2.242	2.242	2.242	1.493	1.490	1.485	1.498	1.506	1.500	1.491	1.489	1.500

Tabla A.32: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix1* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>										<i>Areas</i>										<i>Riesgos</i>									
	1	2	3	6	9	10	11	12	18		1	2	3	6	9	10	11	12	18		1	2	3	6	9	10	11	12	18	
1	110.00	109.58	108.95	110.24	110.87	107.72	110.15	109.50	110.35		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		160.00	159.60	159.14	160.10	160.57	157.99	160.26	159.57	160.14	
2	130.00	129.52	129.46	129.59	129.65	128.02	130.89	129.64	129.38		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		245.00	244.19	244.29	244.09	243.99	241.85	246.73	244.45	243.63	
3	126.00	125.80	125.54	126.06	126.31	124.95	126.13	125.79	126.09		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		232.00	231.60	230.76	232.46	233.30	229.57	231.93	231.47	232.68	
4	127.00	126.91	126.57	127.29	127.63	126.34	126.77	126.81	127.41		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		174.00	174.14	174.01	174.31	174.44	174.47	173.52	174.03	174.45	
5	127.00	127.33	126.59	128.01	128.74	127.53	125.72	127.00	128.54		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		194.00	194.40	193.86	194.85	195.39	194.96	192.84	194.12	195.32	
6	120.00	120.01	120.82	119.21	118.40	120.87	120.77	120.29	118.81		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		240.00	240.03	241.64	238.42	236.81	241.74	241.54	240.59	237.63	
7	100.00	99.91	99.45	100.42	100.87	99.22	99.63	99.77	100.60		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		260.00	259.71	258.21	261.34	262.84	257.48	258.82	259.26	261.94	
8	95.00	94.81	95.64	93.96	93.13	95.04	96.25	95.16	93.45		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		285.00	284.42	286.91	281.88	279.39	285.12	288.75	285.49	280.35	
9	105.00	105.48	105.27	105.67	105.87	106.70	103.86	105.25	106.01		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		315.00	316.43	315.82	317.01	317.62	320.09	311.59	315.74	318.03	
10	120.00	119.86	119.86	119.84	119.84	119.41	120.33	119.93	119.77		1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50		345.00	344.53	344.47	344.51	344.57	342.97	346.04	344.76	344.30	
11	125.00	125.26	125.41	125.14	124.99	126.22	124.57	125.22	125.19		2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50		345.00	345.55	345.59	345.60	345.55	347.34	343.76	345.36	345.85	
12	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77	
13	125.00	125.03	125.23	124.84	124.64	125.34	125.11	125.07	124.76		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		250.00	250.06	250.47	249.68	249.28	250.68	250.23	250.15	249.51	
14	120.00	119.76	118.69	120.83	121.89	117.97	119.41	119.46	121.24		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		240.00	239.51	237.38	241.66	243.79	235.93	238.81	238.92	242.48	
15	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24		3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75		275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11	
16	130.00	130.26	130.37	130.18	130.07	131.17	129.52	130.20	130.26		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		345.00	345.65	345.92	345.49	345.22	347.98	343.76	345.50	345.68	
17	160.00	159.20	158.17	160.27	161.30	155.82	160.49	159.08	160.39		1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50		350.00	348.00	345.64	350.44	352.80	339.71	351.49	347.78	350.61	
18	155.00	154.34	153.19	155.49	156.65	151.21	155.16	154.15	155.74		2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50		315.00	313.70	311.41	316.00	318.30	307.52	315.29	313.32	316.50	
19	155.00	155.83	156.20	155.51	155.14	158.75	153.61	155.68	155.74		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		265.00	266.48	267.73	265.30	264.06	272.24	263.15	266.41	265.42	
20	150.00	149.75	149.45	150.06	150.36	148.70	150.19	149.75	150.09		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		280.00	279.52	278.87	280.16	280.81	277.41	280.34	279.49	280.24	
21	140.00	139.91	140.24	139.56	139.23	139.94	140.55	140.06	139.35		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		235.00	234.69	235.03	234.31	233.96	234.06	236.04	234.93	233.98	
22	150.00	150.06	150.17	149.94	149.83	150.34	150.01	150.09	149.92		3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25		265.00	264.95	264.80	265.10	265.25	264.65	264.95	264.92	265.15	
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65	

Tabla A.33: Datos de la configuración del Mix2 versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Sobrecarga Tiempos</i>									<i>Sobrecarga Areas</i>									<i>Sobrecarga Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.07	0.08	0.07	0.05
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.17	0.18	0.19
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.30
12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29
17	0.23	0.22	0.22	0.23	0.24	0.20	0.23	0.22	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.30	0.29	0.31	0.32	0.27	0.31	0.30	0.31
18	0.19	0.19	0.18	0.20	0.20	0.16	0.19	0.19	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.17	0.17	0.18	0.19	0.15	0.18	0.17	0.19
19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19	0.22	0.18	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.14	0.16	0.15	0.15	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
21	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.02
<i>Max</i>	0.346	0.353	0.356	0.350	0.347	0.377	0.335	0.352	0.352	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.310	0.303	0.295	0.312	0.321	0.304	0.315	0.302	0.313
<i>Sum</i>	1.346	1.351	1.356	1.358	1.366	1.372	1.351	1.351	1.364	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.697	1.694	1.691	1.698	1.703	1.700	1.698	1.693	1.699

Tabla A.34: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix2* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>										<i>Areas</i>										<i>Riesgos</i>									
	1	2	3	6	9	10	11	12	18		1	2	3	6	9	10	11	12	18		1	2	3	6	9	10	11	12	18	
1	110.00	109.58	108.95	110.24	110.87	107.72	110.15	109.50	110.35		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		160.00	159.60	159.14	160.10	160.57	157.99	160.26	159.57	160.14	
2	125.00	124.49	124.75	124.26	124.00	123.24	126.23	124.74	123.87		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		195.00	194.34	194.42	194.30	194.23	192.49	196.32	194.58	193.94	
3	113.00	112.89	113.04	112.74	112.58	112.71	113.37	112.95	112.60		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		226.00	225.77	226.09	225.47	225.16	225.43	226.74	225.90	225.20	
4	125.00	125.10	125.11	125.04	125.03	125.37	124.91	125.09	125.09		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		250.00	250.21	250.22	250.08	250.07	250.74	249.83	250.19	250.18	
5	122.00	121.79	121.11	122.51	123.19	120.51	121.66	121.62	122.74		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		184.00	183.68	183.20	184.21	184.68	182.28	184.07	183.61	184.28	
6	125.00	125.06	123.82	126.31	127.55	124.02	123.62	124.63	126.96		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		230.00	229.74	227.76	231.78	233.76	227.03	228.43	229.14	232.64	
7	120.00	120.15	120.60	119.72	119.27	121.08	120.11	120.27	119.57		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		260.00	260.33	261.08	259.62	258.87	262.11	260.00	260.51	259.41	
8	95.00	94.81	95.64	93.96	93.13	95.04	96.25	95.16	93.45		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		285.00	284.42	286.91	281.88	279.39	285.12	288.75	285.49	280.35	
9	105.00	105.48	105.27	105.67	105.87	106.70	103.86	105.25	106.01		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		315.00	316.43	315.82	317.01	317.62	320.09	311.59	315.74	318.03	
10	115.00	115.16	115.11	115.21	115.26	115.60	114.62	115.10	115.32		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00		345.00	345.47	345.34	345.64	345.78	346.80	343.85	345.31	345.95	
11	130.00	129.96	130.16	129.76	129.56	130.04	130.28	130.05	129.64		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00		345.00	344.60	344.72	344.46	344.34	343.51	345.96	344.81	344.20	
12	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77	
13	125.00	125.03	125.23	124.84	124.64	125.34	125.11	125.07	124.76		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		250.00	250.06	250.47	249.68	249.28	250.68	250.23	250.15	249.51	
14	120.00	119.76	118.69	120.83	121.89	117.97	119.41	119.46	121.24		4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00		240.00	239.51	237.38	241.66	243.79	235.93	238.81	238.92	242.48	
15	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24		3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75		275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11	
16	130.00	130.26	130.37	130.18	130.07	131.17	129.52	130.20	130.26		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		345.00	345.65	345.92	345.49	345.22	347.98	343.76	345.50	345.68	
17	150.00	149.45	148.71	150.22	150.95	147.10	150.28	149.34	150.31		1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50		330.00	328.48	326.72	330.34	332.10	322.26	331.08	328.30	330.46	
18	165.00	164.10	162.65	165.54	166.99	159.94	165.37	163.89	165.82		2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50		335.00	333.22	330.32	336.10	338.99	324.96	335.71	332.80	336.65	
19	155.00	155.83	156.20	155.51	155.14	158.75	153.61	155.68	155.74		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		265.00	266.48	267.73	265.30	264.06	272.24	263.15	266.41	265.42	
20	150.00	149.75	149.45	150.06	150.36	148.70	150.19	149.75	150.09		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		280.00	279.52	278.87	280.16	280.81	277.41	280.34	279.49	280.24	
21	155.00	154.78	154.89	154.65	154.54	154.21	155.58	154.90	154.49		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50		245.00	244.43	244.52	244.32	244.23	242.80	246.27	244.66	243.99	
22	135.00	135.19	135.51	134.85	134.52	136.07	134.98	135.25	134.78		3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25		255.00	255.21	255.31	255.09	254.98	255.91	254.72	255.18	255.14	
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80		3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65	

Tabla A.35: Datos de la configuración del *Mix6* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Sobrecarga Tiempos</i>									<i>Sobrecarga Areas</i>									<i>Sobrecarga Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.07	0.08	0.07	0.05
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.17	0.18	0.19
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.30
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29
17	0.15	0.15	0.14	0.16	0.16	0.13	0.16	0.15	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.23	0.22	0.24	0.24	0.21	0.24	0.23	0.24
18	0.27	0.26	0.25	0.27	0.28	0.23	0.27	0.26	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.24	0.26	0.27	0.22	0.26	0.25	0.26
19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19	0.22	0.18	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.14	0.16	0.15	0.15	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
21	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.02
<i>Max</i>	0.346	0.353	0.356	0.350	0.347	0.377	0.335	0.352	0.352	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.291	0.294	0.295	0.294	0.295	0.304	0.294	0.293	0.295
<i>Sum</i>	1.346	1.351	1.357	1.358	1.366	1.373	1.346	1.352	1.364	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.697	1.694	1.691	1.698	1.703	1.700	1.698	1.693	1.699

Tabla A.36: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix6* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>									<i>Areas</i>									<i>Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	110.00	109.54	109.13	109.97	110.38	107.78	110.48	109.55	109.94	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	140.00	139.74	139.40	140.10	140.44	138.64	140.14	139.70	140.14
2	125.00	124.45	124.49	124.45	124.40	122.89	126.06	124.64	124.15	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	215.00	214.05	214.03	214.14	214.16	211.25	216.75	214.34	213.68
3	111.00	110.99	110.94	111.05	111.10	110.91	110.95	110.95	111.07	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	222.00	221.98	221.87	222.10	222.20	221.83	221.90	221.90	222.14
4	124.00	124.08	124.19	123.89	123.78	124.36	124.09	124.11	123.87	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	248.00	248.15	248.39	247.79	247.55	248.72	248.19	248.23	247.75
5	125.00	124.79	124.20	125.43	126.02	123.62	124.74	124.65	125.62	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	190.00	189.68	189.38	190.04	190.34	188.48	190.23	189.67	190.03
6	125.00	125.06	123.82	126.31	127.55	124.02	123.62	124.63	126.96	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	230.00	229.74	227.76	231.78	233.76	227.03	228.43	229.14	232.64
7	120.00	120.15	120.60	119.72	119.27	121.08	120.11	120.27	119.57	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	260.00	260.33	261.08	259.62	258.87	262.11	260.00	260.51	259.41
8	95.00	94.81	95.64	93.96	93.13	95.04	96.25	95.16	93.45	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	285.00	284.42	286.91	281.88	279.39	285.12	288.75	285.49	280.35
9	105.00	105.48	105.27	105.67	105.87	106.70	103.86	105.25	106.01	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	315.00	316.43	315.82	317.01	317.62	320.09	311.59	315.74	318.03
10	120.00	119.64	119.46	119.84	120.02	118.39	120.51	119.71	119.75	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	345.00	343.86	343.27	344.51	345.10	339.90	346.58	344.07	344.23
11	125.00	125.48	125.81	125.14	124.81	127.25	124.39	125.45	125.21	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	345.00	346.22	346.79	345.60	345.02	350.40	343.23	346.05	345.92
12	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77
13	125.00	124.67	124.83	124.50	124.35	123.83	125.84	124.84	124.26	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	250.00	249.34	249.65	249.01	248.70	247.66	251.67	249.67	248.53
14	120.00	120.11	119.10	121.17	122.18	119.48	118.68	119.70	121.73	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	240.00	240.23	238.20	242.33	244.36	238.95	237.37	239.40	243.46
15	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11
16	130.00	130.26	130.37	130.18	130.07	131.17	129.52	130.20	130.26	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	345.00	345.65	345.92	345.49	345.22	347.98	343.76	345.50	345.68
17	150.00	149.45	148.71	150.22	150.95	147.10	150.28	149.34	150.31	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	330.00	328.48	326.72	330.34	332.10	322.26	331.08	328.30	330.46
18	165.00	164.10	162.65	165.54	166.99	159.94	165.37	163.89	165.82	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	335.00	333.22	330.32	336.10	338.99	324.96	335.71	332.80	336.65
19	160.00	160.83	161.21	160.50	160.12	163.74	158.63	160.68	160.72	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	280.00	281.47	282.75	280.27	278.99	287.23	278.19	281.41	280.36
20	145.00	144.76	144.44	145.07	145.39	143.71	145.18	144.75	145.11	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	265.00	264.53	263.84	265.20	265.88	262.42	265.29	264.50	265.31
21	155.00	154.93	155.23	154.63	154.33	155.02	155.43	155.05	154.44	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	245.00	244.73	245.21	244.28	243.80	244.42	245.97	244.96	243.90
22	135.00	135.04	135.17	134.87	134.74	135.26	135.13	135.10	134.82	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	255.00	254.91	254.63	255.13	255.41	254.29	255.02	254.88	255.22
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65

Tabla A.37: Datos de la configuración del *Mix9* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Sobrecarga Tiempos</i>									<i>Sobrecarga Areas</i>									<i>Sobrecarga Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.07	0.08	0.07	0.05
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.17	0.18	0.19
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.27	0.30	0.29	0.29
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.30	0.30	0.29	0.29	0.31	0.28	0.30	0.30
12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29
17	0.15	0.15	0.14	0.16	0.16	0.13	0.16	0.15	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.23	0.22	0.24	0.24	0.21	0.24	0.23	0.24
18	0.27	0.26	0.25	0.27	0.28	0.23	0.27	0.26	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.24	0.26	0.27	0.22	0.26	0.25	0.26
19	0.23	0.24	0.24	0.23	0.23	0.26	0.22	0.24	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.08	0.04	0.05	0.05
20	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.02
<i>Max</i>	0.346	0.353	0.356	0.350	0.347	0.377	0.335	0.352	0.352	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.219	0.291	0.296	0.298	0.294	0.292	0.313	0.296	0.296	0.295
<i>Sum</i>	1.346	1.351	1.356	1.358	1.366	1.372	1.344	1.351	1.364	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.917	1.697	1.701	1.703	1.698	1.696	1.717	1.690	1.700	1.699

Tabla A.38: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix9* versus los 9 mixes con $m = 23$.

Los valores que se muestran en la siguiente tabla son los valores máximos de las 4 configuraciones, *Mix1*, *Mix2*, *Mix6* y *Mix9*, para la sobrecarga de tiempos, áreas y riesgos ergonómicos, así como, el sumatorio de los tiempos, áreas y riesgos ergonómicos, en relación a los valores medios de dichos atributos.

	<i>Mix1</i>			<i>Mix2</i>			<i>Mix6</i>			<i>Mix9</i>		
	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>
Max	0.353	0.219	0.298	0.353	0.219	0.321	0.353	0.219	0.295	0.353	0.219	0.296
Sum	0.050	0.097	0.065	0.059	0.083	0.074	0.059	0.083	0.074	0.059	0.083	0.074

Tabla A.39: Sobrecarga de tiempo, área y riesgo ergonómico de los 9 configuraciones más robustas (*Mix1*, *Mix2*, *Mix6* y *Mix9*) para encontrar los índice g_1 y g_2 .

La tabla que se muestra a continuación, se obtiene a partir de los índices de no-resiliencia.

$$g_1(\hat{\varepsilon}, \Psi) = \max_{k \in K} \max_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{\Psi}(\# \varepsilon)} [\psi(S_{k, \hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{\Psi}(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad \psi \in \Psi \quad (\text{A.3})$$

$$g_2(\hat{\varepsilon}, \Psi) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\# \varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\bar{\Psi}(\# \varepsilon)} [\psi(S_{k, \hat{\varepsilon}}, \# \varepsilon) - \bar{\Psi}(\# \varepsilon)]^+ \right\} \quad \psi \in \Psi \quad (\text{A.4})$$

Donde $\Psi = \{T, A, R\}$.

<i>Mix</i>	g_1			g_2		
	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$
1	0.353	0.219	0.298	0.050	0.097	0.065
2	0.353	0.219	0.321	0.059	0.083	0.074
6	0.353	0.219	0.295	0.059	0.083	0.074
9	0.353	0.219	0.296	0.059	0.083	0.074

Tabla A.40: Valores de los índice g_1 y g_2 para los atributos T , A y R de las 4 configuraciones más robustas.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>									<i>Areas</i>									<i>Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	110.00	109.54	109.13	109.97	110.38	107.78	110.48	109.55	109.94	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	140.00	139.74	139.40	140.10	140.44	138.64	140.14	139.70	140.14
2	130.00	129.20	129.28	129.13	129.06	126.89	131.67	129.52	128.70	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	225.00	223.56	223.59	223.50	223.47	219.25	227.96	224.10	222.77
3	138.00	138.22	136.18	140.28	142.32	136.87	135.48	137.48	141.41	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	156.00	156.28	154.01	158.59	160.86	154.88	153.10	155.44	159.87
4	133.00	133.19	133.65	132.72	132.26	134.22	133.09	133.25	132.59	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	266.00	266.38	267.30	265.45	264.52	268.43	266.18	266.50	265.17
5	129.00	128.97	129.02	128.91	128.86	128.91	129.14	128.99	128.87	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	258.00	257.94	258.03	257.81	257.72	257.82	258.28	257.99	257.73
6	115.00	114.80	114.54	115.14	115.40	114.01	115.00	114.76	115.17	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	280.00	279.40	278.25	280.71	281.86	276.60	279.74	279.16	280.98
7	100.00	99.94	100.73	99.13	98.34	100.52	100.95	100.24	98.70	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	300.00	299.81	302.18	297.39	295.02	301.56	302.86	300.71	296.11
8	110.00	110.07	110.20	109.93	109.79	110.39	110.02	110.10	109.89	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	330.00	330.20	330.60	329.78	329.37	331.17	330.05	330.31	329.67
9	120.00	120.38	120.28	120.48	120.58	121.41	119.14	120.21	120.72	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	345.00	346.07	345.72	346.44	346.79	348.95	342.48	345.59	347.15
10	125.00	125.13	125.12	125.15	125.15	125.53	124.72	125.09	125.22	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	345.00	345.17	344.73	345.61	346.06	345.24	344.21	345.00	345.92
11	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77
12	125.00	124.67	124.83	124.50	124.35	123.83	125.84	124.84	124.26	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	250.00	249.34	249.65	249.01	248.70	247.66	251.67	249.67	248.53
13	120.00	120.11	119.10	121.17	122.18	119.48	118.68	119.70	121.73	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	240.00	240.23	238.20	242.33	244.36	238.95	237.37	239.40	243.46
14	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11
15	115.00	115.22	115.66	114.77	114.33	116.31	115.02	115.32	114.66	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.64	271.53	269.72	268.82	273.42	269.67	270.77	269.59
16	130.00	129.62	129.18	130.11	130.54	128.09	130.22	129.59	130.14	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	345.00	343.74	342.37	345.26	346.64	338.74	345.86	343.67	345.32
17	150.00	149.77	148.87	150.70	151.60	148.21	149.50	149.49	151.04	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	300.00	299.54	297.74	301.40	303.20	296.42	298.99	298.98	302.07
18	135.00	134.19	133.20	135.17	136.15	130.76	135.64	134.11	135.25	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	275.00	273.39	271.44	275.35	277.31	266.61	276.25	273.24	275.52
19	155.00	155.83	156.20	155.51	155.14	158.75	153.61	155.68	155.74	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	265.00	266.48	267.73	265.30	264.06	272.24	263.15	266.41	265.42
20	140.00	139.85	139.60	140.08	140.33	139.14	140.08	139.83	140.13	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	269.61	269.02	270.19	270.78	267.84	270.22	269.58	270.29
21	145.00	144.95	145.19	144.70	144.45	145.04	145.36	145.06	144.55	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	235.00	234.87	235.10	234.61	234.37	234.68	235.55	235.01	234.42
22	145.00	144.95	145.31	144.57	144.21	145.16	145.49	145.10	144.37	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	245.00	244.76	245.35	244.16	243.57	244.63	246.09	245.04	243.75
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65

Tabla A.41: Datos de la configuración del *Mix1* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	Sobrecarga Tiempos									Sobrecarga Areas									Sobrecarga Riesgos								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.05	0.04	0.06	0.09	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.09	0.09	0.10	0.08	0.08	0.13	0.13	0.13	0.11
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17	0.24	0.23	0.24	0.23
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.31	0.28	0.29	0.30
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.29	0.29	0.29	0.30
11	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.14	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22	0.27	0.29	0.29	0.29
17	0.11	0.11	0.15	0.12	0.12	0.14	0.15	0.15	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13
18	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.04	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03
19	0.14	0.14	0.20	0.14	0.14	0.22	0.18	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.06	0.05	0.07	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
21	0.08	0.08	0.12	0.08	0.08	0.12	0.12	0.12	0.11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.08	0.08	0.12	0.08	0.08	0.12	0.12	0.12	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.25	0.26	0.36	0.25	0.25	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02
Max	0.250	0.255	0.356	0.253	0.251	0.377	0.335	0.352	0.352	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.219	0.219	0.219	0.219	0.216	0.219	0.218	0.220	0.221	0.308	0.294	0.294	0.300
Sum	0.811	0.818	1.129	0.830	0.844	1.158	1.114	1.128	1.162	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	2.242	2.242	2.242	2.242	1.108	1.105	1.102	1.111	1.117	1.500	1.491	1.489	1.500

Tabla A.42: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix1* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>									<i>Areas</i>									<i>Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	110.00	109.58	108.95	110.24	110.87	107.72	110.15	109.50	110.35	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	160.00	159.60	159.14	160.10	160.57	157.99	160.26	159.57	160.14
2	130.00	129.52	129.46	129.59	129.65	128.02	130.89	129.64	129.38	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	245.00	244.19	244.29	244.09	243.99	241.85	246.73	244.45	243.63
3	126.00	125.80	125.54	126.06	126.31	124.95	126.13	125.79	126.09	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	232.00	231.60	230.76	232.46	233.30	229.57	231.93	231.47	232.68
4	127.00	126.91	126.57	127.29	127.63	126.34	126.77	126.81	127.41	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	174.00	174.14	174.01	174.31	174.44	174.47	173.52	174.03	174.45
5	127.00	127.33	126.59	128.01	128.74	127.53	125.72	127.00	128.54	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	194.00	194.40	193.86	194.85	195.39	194.96	192.84	194.12	195.32
6	120.00	120.01	120.82	119.21	118.40	120.87	120.77	120.29	118.81	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	240.00	240.03	241.64	238.42	236.81	241.74	241.54	240.59	237.63
7	100.00	99.91	99.45	100.42	100.87	99.22	99.63	99.77	100.60	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	260.00	259.71	258.21	261.34	262.84	257.48	258.82	259.26	261.94
8	95.00	94.81	95.64	93.96	93.13	95.04	96.25	95.16	93.45	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	285.00	284.42	286.91	281.88	279.39	285.12	288.75	285.49	280.35
9	105.00	105.48	105.27	105.67	105.87	106.70	103.86	105.25	106.01	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	315.00	316.43	315.82	317.01	317.62	320.09	311.59	315.74	318.03
10	120.00	119.86	119.86	119.84	119.84	119.41	120.33	119.93	119.77	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	345.00	344.53	344.47	344.51	344.57	342.97	346.04	344.76	344.30
11	125.00	125.26	125.41	125.14	124.99	126.22	124.57	125.22	125.19	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	345.00	345.55	345.59	345.60	345.55	347.34	343.76	345.36	345.85
12	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77
13	125.00	125.03	125.23	124.84	124.64	125.34	125.11	125.07	124.76	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	250.00	250.06	250.47	249.68	249.28	250.68	250.23	250.15	249.51
14	120.00	119.76	118.69	120.83	121.89	117.97	119.41	119.46	121.24	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	240.00	239.51	237.38	241.66	243.79	235.93	238.81	238.92	242.48
15	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11
16	130.00	130.26	130.37	130.18	130.07	131.17	129.52	130.20	130.26	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	345.00	345.65	345.92	345.49	345.22	347.98	343.76	345.50	345.68
17	160.00	159.20	158.17	160.27	161.30	155.82	160.49	159.08	160.39	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	350.00	348.00	345.64	350.44	352.80	339.71	351.49	347.78	350.61
18	155.00	154.34	153.19	155.49	156.65	151.21	155.16	154.15	155.74	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	315.00	313.70	311.41	316.00	318.30	307.52	315.29	313.32	316.50
19	155.00	155.83	156.20	155.51	155.14	158.75	153.61	155.68	155.74	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	265.00	266.48	267.73	265.30	264.06	272.24	263.15	266.41	265.42
20	150.00	149.75	149.45	150.06	150.36	148.70	150.19	149.75	150.09	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	280.00	279.52	278.87	280.16	280.81	277.41	280.34	279.49	280.24
21	140.00	139.91	140.24	139.56	139.23	139.94	140.55	140.06	139.35	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	235.00	234.69	235.03	234.31	233.96	234.06	236.04	234.93	233.98
22	150.00	150.06	150.17	149.94	149.83	150.34	150.01	150.09	149.92	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	265.00	264.95	264.80	265.10	265.25	264.65	264.95	264.92	265.15
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65

Tabla A.43: Datos de la configuración del *Mix2* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Sobrecarga Tiempos</i>									<i>Sobrecarga Areas</i>									<i>Sobrecarga Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.07	0.08	0.07	0.05
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.20	0.17	0.18	0.19
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.21	0.22	0.22	0.29	0.29	0.29	0.29
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.30	0.29	0.29	0.30
12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.14	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.30	0.29	0.29	0.29
17	0.17	0.16	0.16	0.17	0.17	0.20	0.23	0.22	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.22	0.22	0.23	0.24	0.27	0.31	0.30	0.31
18	0.14	0.14	0.13	0.14	0.15	0.16	0.19	0.19	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.13	0.12	0.14	0.14	0.15	0.18	0.17	0.19
19	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.22	0.18	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.14	0.16	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
21	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.08	0.08	0.08	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.16	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02
Max.	0.250	0.255	0.257	0.253	0.251	0.377	0.335	0.352	0.352	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.219	0.219	0.219	0.219	0.230	0.225	0.219	0.231	0.238	0.304	0.315	0.302	0.313
Sum.	0.972	0.976	0.979	0.981	0.987	1.372	1.351	1.351	1.364	1.573	1.573	1.573	1.573	1.573	1.917	1.917	1.917	1.917	1.259	1.256	1.255	1.260	1.263	1.700	1.698	1.693	1.699

Tabla A.44: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix2* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>									<i>Areas</i>									<i>Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	110.00	109.58	108.95	110.24	110.87	107.72	110.15	109.50	110.35	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	160.00	159.60	159.14	160.10	160.57	157.99	160.26	159.57	160.14
2	125.00	124.49	124.75	124.26	124.00	123.24	126.23	124.74	123.87	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	195.00	194.34	194.42	194.30	194.23	192.49	196.32	194.58	193.94
3	113.00	112.89	113.04	112.74	112.58	112.71	113.37	112.95	112.60	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	226.00	225.77	226.09	225.47	225.16	225.43	226.74	225.90	225.20
4	125.00	125.10	125.11	125.04	125.03	125.37	124.91	125.09	125.09	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	250.00	250.21	250.22	250.08	250.07	250.74	249.83	250.19	250.18
5	122.00	121.79	121.11	122.51	123.19	120.51	121.66	121.62	122.74	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	184.00	183.68	183.20	184.21	184.68	182.28	184.07	183.61	184.28
6	125.00	125.06	123.82	126.31	127.55	124.02	123.62	124.63	126.96	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	230.00	229.74	227.76	231.78	233.76	227.03	228.43	229.14	232.64
7	120.00	120.15	120.60	119.72	119.27	121.08	120.11	120.27	119.57	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	260.00	260.33	261.08	259.62	258.87	262.11	260.00	260.51	259.41
8	95.00	94.81	95.64	93.96	93.13	95.04	96.25	95.16	93.45	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	285.00	284.42	286.91	281.88	279.39	285.12	288.75	285.49	280.35
9	105.00	105.48	105.27	105.67	105.87	106.70	103.86	105.25	106.01	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	315.00	316.43	315.82	317.01	317.62	320.09	311.59	315.74	318.03
10	115.00	115.16	115.11	115.21	115.26	115.60	114.62	115.10	115.32	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	345.00	345.47	345.34	345.64	345.78	346.80	343.85	345.31	345.95
11	130.00	129.96	130.16	129.76	129.56	130.04	130.28	130.05	129.64	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	345.00	344.60	344.72	344.46	344.34	343.51	345.96	344.81	344.20
12	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77
13	125.00	125.03	125.23	124.84	124.64	125.34	125.11	125.07	124.76	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	250.00	250.06	250.47	249.68	249.28	250.68	250.23	250.15	249.51
14	120.00	119.76	118.69	120.83	121.89	117.97	119.41	119.46	121.24	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	240.00	239.51	237.38	241.66	243.79	235.93	238.81	238.92	242.48
15	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11
16	130.00	130.26	130.37	130.18	130.07	131.17	129.52	130.20	130.26	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	345.00	345.65	345.92	345.49	345.22	347.98	343.76	345.50	345.68
17	150.00	149.45	148.71	150.22	150.95	147.10	150.28	149.34	150.31	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	330.00	328.48	326.72	330.34	332.10	322.26	331.08	328.30	330.46
18	165.00	164.10	162.65	165.54	166.99	159.94	165.37	163.89	165.82	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	335.00	333.22	330.32	336.10	338.99	324.96	335.71	332.80	336.65
19	155.00	155.83	156.20	155.51	155.14	158.75	153.61	155.68	155.74	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	265.00	266.48	267.73	265.30	264.06	272.24	263.15	266.41	265.42
20	150.00	149.75	149.45	150.06	150.36	148.70	150.19	149.75	150.09	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	280.00	279.52	278.87	280.16	280.81	277.41	280.34	279.49	280.24
21	155.00	154.78	154.89	154.65	154.54	154.21	155.58	154.90	154.49	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	245.00	244.43	244.52	244.32	244.23	242.80	246.27	244.66	243.99
22	135.00	135.19	135.51	134.85	134.52	136.07	134.98	135.25	134.78	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	255.00	255.21	255.31	255.09	254.98	255.91	254.72	255.18	255.14
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65

Tabla A.45: Datos de la configuración del *Mix6* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Sobrecarga Tiempos</i>									<i>Sobrecarga Areas</i>									<i>Sobrecarga Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.07	0.08	0.07	0.05
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.20	0.17	0.18	0.19
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.30	0.29	0.29	0.30
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.29	0.29	0.29	0.29
12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.14	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.30	0.29	0.29	0.29
17	0.11	0.11	0.10	0.11	0.12	0.13	0.16	0.15	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.21	0.24	0.23	0.24
18	0.19	0.19	0.18	0.20	0.21	0.23	0.27	0.26	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.26	0.25	0.26
19	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.22	0.18	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.14	0.16	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
21	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.19	0.20	0.19	0.19	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02
Max	0.250	0.255	0.257	0.253	0.251	0.377	0.335	0.352	0.352	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.219	0.219	0.219	0.219	0.216	0.218	0.219	0.218	0.219	0.304	0.294	0.293	0.295
Sum	0.972	0.976	0.980	0.981	0.987	1.373	1.346	1.352	1.364	1.573	1.573	1.573	1.573	1.573	1.917	1.917	1.917	1.917	1.259	1.256	1.255	1.260	1.263	1.700	1.698	1.693	1.699

Tabla A.46: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix6* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	<i>Tiempos de proceso</i>									<i>Areas</i>									<i>Riesgos</i>								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	110.00	109.54	109.13	109.97	110.38	107.78	110.48	109.55	109.94	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	140.00	139.74	139.40	140.10	140.44	138.64	140.14	139.70	140.14
2	125.00	124.45	124.49	124.45	124.40	122.89	126.06	124.64	124.15	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	215.00	214.05	214.03	214.14	214.16	211.25	216.75	214.34	213.68
3	111.00	110.99	110.94	111.05	111.10	110.91	110.95	110.95	111.07	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	222.00	221.98	221.87	222.10	222.20	221.83	221.90	221.90	222.14
4	124.00	124.08	124.19	123.89	123.78	124.36	124.09	124.11	123.87	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	248.00	248.15	248.39	247.79	247.55	248.72	248.19	248.23	247.75
5	125.00	124.79	124.20	125.43	126.02	123.62	124.74	124.65	125.62	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	190.00	189.68	189.38	190.04	190.34	188.48	190.23	189.67	190.03
6	125.00	125.06	123.82	126.31	127.55	124.02	123.62	124.63	126.96	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	230.00	229.74	227.76	231.78	233.76	227.03	228.43	229.14	232.64
7	120.00	120.15	120.60	119.72	119.27	121.08	120.11	120.27	119.57	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	260.00	260.33	261.08	259.62	258.87	262.11	260.00	260.51	259.41
8	95.00	94.81	95.64	93.96	93.13	95.04	96.25	95.16	93.45	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	285.00	284.42	286.91	281.88	279.39	285.12	288.75	285.49	280.35
9	105.00	105.48	105.27	105.67	105.87	106.70	103.86	105.25	106.01	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	315.00	316.43	315.82	317.01	317.62	320.09	311.59	315.74	318.03
10	120.00	119.64	119.46	119.84	120.02	118.39	120.51	119.71	119.75	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	345.00	343.86	343.27	344.51	345.10	339.90	346.58	344.07	344.23
11	125.00	125.48	125.81	125.14	124.81	127.25	124.39	125.45	125.21	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	345.00	346.22	346.79	345.60	345.02	350.40	343.23	346.05	345.92
12	130.00	130.23	131.85	128.58	126.96	132.50	131.22	130.70	127.89	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	260.00	260.45	263.69	257.16	253.92	265.00	262.44	261.40	255.77
13	125.00	124.67	124.83	124.50	124.35	123.83	125.84	124.84	124.26	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	250.00	249.34	249.65	249.01	248.70	247.66	251.67	249.67	248.53
14	120.00	120.11	119.10	121.17	122.18	119.48	118.68	119.70	121.73	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	240.00	240.23	238.20	242.33	244.36	238.95	237.37	239.40	243.46
15	115.00	114.81	115.79	113.83	112.85	115.22	116.36	115.21	113.24	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	275.00	274.45	276.49	272.41	270.37	274.83	278.14	275.35	271.11
16	130.00	130.26	130.37	130.18	130.07	131.17	129.52	130.20	130.26	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	345.00	345.65	345.92	345.49	345.22	347.98	343.76	345.50	345.68
17	150.00	149.45	148.71	150.22	150.95	147.10	150.28	149.34	150.31	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	330.00	328.48	326.72	330.34	332.10	322.26	331.08	328.30	330.46
18	165.00	164.10	162.65	165.54	166.99	159.94	165.37	163.89	165.82	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	335.00	333.22	330.32	336.10	338.99	324.96	335.71	332.80	336.65
19	160.00	160.83	161.21	160.50	160.12	163.74	158.63	160.68	160.72	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	280.00	281.47	282.75	280.27	278.99	287.23	278.19	281.41	280.36
20	145.00	144.76	144.44	145.07	145.39	143.71	145.18	144.75	145.11	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	265.00	264.53	263.84	265.20	265.88	262.42	265.29	264.50	265.31
21	155.00	154.93	155.23	154.63	154.33	155.02	155.43	155.05	154.44	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	245.00	244.73	245.21	244.28	243.80	244.42	245.97	244.96	243.90
22	135.00	135.04	135.17	134.87	134.74	135.26	135.13	135.10	134.82	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	255.00	254.91	254.63	255.13	255.41	254.29	255.02	254.88	255.22
23	175.00	175.90	176.25	175.52	175.17	178.92	173.62	175.78	175.80	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	270.00	270.95	270.79	271.09	271.25	273.62	267.97	270.65	271.65

Tabla A.47: Datos de la configuración del *Mix9* versus los 9 mixes con $m = 23$.

<i>m</i>	Sobrecarga Tiempos									Sobrecarga Areas									Sobrecarga Riesgos								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.07	0.08	0.07	0.05
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.20	0.17	0.18	0.19
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22	0.27	0.30	0.29	0.29
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.31	0.28	0.30	0.30
12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.14	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.30	0.29	0.29	0.29
17	0.11	0.11	0.10	0.11	0.12	0.13	0.16	0.15	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.21	0.24	0.23	0.24
18	0.19	0.19	0.18	0.20	0.21	0.23	0.27	0.26	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.26	0.25	0.26
19	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.26	0.22	0.24	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.08	0.04	0.05	0.05
20	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11	0.12	0.11	0.12	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.19	0.20	0.19	0.19	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.38	0.34	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02
Max	0.250	0.255	0.257	0.253	0.251	0.377	0.335	0.352	0.352	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.219	0.219	0.219	0.219	0.216	0.220	0.221	0.218	0.217	0.313	0.296	0.296	0.295
Sum	0.972	0.976	0.979	0.981	0.987	1.372	1.344	1.351	1.364	1.573	1.573	1.573	1.573	1.573	1.917	1.917	1.917	1.917	1.259	1.262	1.264	1.260	1.258	1.717	1.690	1.700	1.699

Tabla A.48: Cálculo de la sobrecarga de la configuración del *Mix9* versus los 9 mixes con $m = 23$.

Los valores que se muestran en la siguiente tabla son los valores máximos de las 4 configuraciones, *Mix1*, *Mix2*, *Mix6* y *Mix9*, para la sobrecarga de tiempos, áreas y riesgos ergonómicos, así como, el sumatorio de los tiempos, áreas y riesgos ergonómicos, en relación a los valores máximos de dichos atributos.

	<i>Mix1</i>			<i>Mix2</i>			<i>Mix6</i>			<i>Mix9</i>		
	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>A</i>	<i>R</i>
Max	0.255	0.179	0.221	0.255	0.179	0.238	0.255	0.179	0.219	0.255	0.179	0.220
Sum	0.036	0.080	0.048	0.043	0.068	0.055	0.043	0.068	0.055	0.043	0.068	0.055

Tabla A.49: Sobrecarga de tiempo, área y riesgo ergonómico de los 9 configuraciones más robustas (*Mix1*, *Mix2*, *Mix6* y *Mix9*) para encontrar los índice g_1 y g_2 .

La tabla que se muestra a continuación, se obtiene a partir de los índices de no-robustez.

$$g_1^{max}(\hat{\varepsilon}, \Psi) = \max_{k \in K} \max_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\Psi_k^{max}} [\psi(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{\Psi}(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad \psi \in \Psi \quad (\text{A.5})$$

$$g_2^{max}(\hat{\varepsilon}, \Psi) = \frac{1}{m \cdot |E|} \sum_{k \in K} \sum_{\#\varepsilon \in E} \left\{ \frac{1}{\Psi_k^{max}} [\psi(S_{k,\hat{\varepsilon}}, \#\varepsilon) - \bar{\Psi}(\#\varepsilon)]^+ \right\} \quad \psi \in \Psi \quad (\text{A.6})$$

Donde $\Psi = \{T, A, R\}$.

<i>Mix</i>	g_1^{max}			g_2^{max}		
	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$	$(\bar{\varepsilon}, T)$	$(\bar{\varepsilon}, A)$	$(\bar{\varepsilon}, R)$
1	0.255	0.179	0.221	0.036	0.080	0.048
2	0.255	0.179	0.221	0.043	0.068	0.055
6	0.255	0.179	0.221	0.043	0.068	0.055
9	0.255	0.179	0.221	0.043	0.068	0.055

Tabla A.50: Valores de los índice g_1^{max} y g_2^{max} para los atributos *T*, *A* y *R* de las 4 configuraciones más robustas.

V. Datos correspondientes a los nueve planes de demanda.

En la Tabla A.51 se presentan los datos relacionados con las 140 tareas correspondientes al ensamblado de los 9 tipos de motores. En concreto, para cada una de las tareas j se muestra el tiempo de proceso de la tarea, el área lineal requerida y el riesgo ergonómico asociado considerando el Mix de producción correspondiente. Además, se recoge también el número de estaciones a las que ha sido signada cada tarea en función del Mix (1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 18).

Se ha utilizado el modelo con ponderación de atributos como base para la realización de éste apartado, concretamente, la función de ponderación $\Delta_R(T, A, R) = \mu_T \cdot \Delta_R(T) + \mu_A \cdot \Delta_R(A) + \mu_R \cdot \Delta_R(R)$.

j	Tiempos de proceso									Área	Riesgo ergonómico									Configuración								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18		1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
1	60.00	59.56	58.76	60.38	61.18	57.45	60.05	59.44	60.56	3	60.00	59.56	58.76	60.38	61.18	57.45	60.05	59.44	60.56	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	20.00	19.78	20.11	19.46	19.13	19.46	20.76	19.96	19.18	0.5	20.00	19.78	20.11	19.46	19.13	19.46	20.76	19.96	19.18	1	4	2	2	1	2	3	2	2
10	30.00	30.20	30.27	30.13	30.07	30.87	29.67	30.15	30.20	0.5	60.00	60.40	60.53	60.27	60.14	61.74	59.34	60.30	60.40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	20.00	19.99	20.33	19.67	19.32	20.32	20.32	20.10	19.49	0.5	20.00	19.99	20.33	19.67	19.32	20.32	20.32	20.10	19.49	2	3	1	2	2	1	4	1	2
7	45.00	44.95	44.80	45.13	45.28	44.68	44.90	44.91	45.18	1	90.00	89.91	89.60	90.25	90.56	89.36	89.81	89.81	90.36	5	3	5	2	2	5	3	4	5
9	20.00	19.82	19.93	19.73	19.63	19.40	20.44	19.91	19.59	0.5	40.00	39.64	39.85	39.46	39.25	38.81	40.87	39.83	39.18	2	1	2	1	2	2	1	2	1
11	15.00	14.90	14.79	14.99	15.10	14.47	15.12	14.90	15.00	0.5	30.00	29.79	29.58	29.99	30.21	28.94	30.24	29.81	29.99	2	2	3	2	2	3	2	2	3
13	15.00	14.86	14.63	15.09	15.32	14.20	15.05	14.83	15.13	1	15.00	14.86	14.63	15.09	15.32	14.20	15.05	14.83	15.13	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	10.00	9.93	10.02	9.84	9.75	9.81	10.22	9.98	9.76	0.5	20.00	19.86	20.04	19.69	19.51	19.62	20.45	19.96	19.52	2	2	2	3	2	2	2	2	2
15	8.00	8.10	8.06	8.14	8.17	8.35	7.77	8.05	8.20	1	16.00	16.20	16.12	16.27	16.35	16.71	15.53	16.11	16.41	4	3	4	3	3	4	3	3	4
16	8.00	8.03	7.91	8.16	8.28	8.01	7.81	7.98	8.23	0.5	16.00	16.06	15.82	16.31	16.55	16.02	15.62	15.96	16.46	3	3	3	4	3	3	3	3	3
17	80.00	79.80	80.00	79.60	79.40	79.40	80.60	79.91	79.40	1	160.00	159.60	160.00	159.20	158.80	158.80	161.20	159.82	158.80	4	2	4	3	3	4	2	3	4
19	5.00	5.01	4.97	5.05	5.09	5.00	4.93	4.99	5.08	0.5	10.00	10.02	9.94	10.10	10.18	10.00	9.87	9.99	10.15	3	2	3	3	3	4	2	3	3
20	5.00	5.03	5.05	5.01	4.99	5.14	4.96	5.03	5.01	0.5	10.00	10.06	10.10	10.02	9.97	10.28	9.92	10.05	10.02	4	2	3	3	3	3	2	3	3
21	5.00	5.02	4.94	5.10	5.17	5.01	4.88	4.99	5.15	0.5	10.00	10.04	9.89	10.19	10.35	10.02	9.77	9.98	10.29	3	3	4	3	3	3	4	4	4
18	40.00	39.70	39.50	39.88	40.09	38.58	40.44	39.76	39.84	0.5	80.00	79.40	78.99	79.76	80.17	77.15	80.89	79.51	79.67	2	3	3	4	4	3	3	2	3
22	7.00	6.97	6.90	7.04	7.12	6.81	6.99	6.96	7.06	0.5	14.00	13.94	13.79	14.08	14.23	13.61	13.98	13.92	14.13	5	4	5	4	4	5	5	4	5
23	7.00	7.00	6.99	7.01	7.02	7.00	6.99	7.00	7.01	0.5	14.00	14.01	13.99	14.02	14.03	14.00	13.98	14.00	14.03	5	5	5	5	4	4	5	5	5
24	30.00	30.14	30.27	29.98	29.86	30.66	29.91	30.14	29.99	0.5	60.00	60.28	60.53	59.97	59.71	61.31	59.81	60.28	59.98	5	5	4	4	4	4	4	5	5
25	30.00	30.29	30.72	29.86	29.43	31.60	29.85	30.34	29.79	0.5	60.00	60.59	61.44	59.72	58.87	63.20	59.70	60.67	59.59	4	4	5	4	4	5	5	5	4
26	5.00	4.96	4.88	5.04	5.12	4.77	5.00	4.95	5.06	0.5	10.00	9.93	9.77	10.08	10.24	9.54	9.99	9.90	10.13	4	4	4	4	4	4	4	4	4
27	5.00	5.00	4.94	5.08	5.14	4.95	4.92	4.98	5.11	0.5	10.00	10.01	9.87	10.15	10.29	9.90	9.83	9.95	10.22	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	60.00	59.90	59.02	60.81	61.69	58.75	59.25	59.63	61.20	1	60.00	59.90	59.02	60.81	61.69	58.75	59.25	59.63	61.20	3	4	2	5	5	2	4	4	2
8	10.00	10.01	10.09	9.93	9.85	10.10	10.07	10.03	9.89	0.5	20.00	20.01	20.17	19.85	19.69	20.20	20.14	20.06	19.78	2	6	2	2	5	2	3	2	2
28	30.00	29.92	30.00	29.85	29.77	29.77	30.22	29.98	29.77	1	60.00	59.85	60.00	59.70	59.55	59.55	60.45	59.96	59.55	5	5	5	5	5	5	5	5	5
29	10.00	9.98	10.06	9.90	9.82	9.99	10.13	10.01	9.85	0.5	20.00	19.96	20.12	19.79	19.63	19.99	20.25	20.02	19.69	5	6	5	5	5	5	5	5	5
30	15.00	14.98	15.03	14.94	14.89	14.99	15.07	15.00	14.91	1	30.00	29.97	30.07	29.88	29.78	29.98	30.13	30.00	29.82	6	6	6	5	5	6	6	5	6
6	60.00	60.26	59.33	61.17	62.10	60.10	58.60	59.88	61.76	1.5	60.00	60.26	59.33	61.17	62.10	60.10	58.60	59.88	61.76	3	5	3	6	6	3	5	6	3
31	10.00	10.02	10.20	9.85	9.67	10.27	10.12	10.07	9.77	0	20.00	20.04	20.40	19.70	19.34	20.54	20.24	20.15	19.54	6	6	6	6	6	6	6	6	6
32	15.00	14.90	14.84	14.97	15.03	14.56	15.11	14.91	14.95	0.5	30.00	29.80	29.69	29.94	30.06	29.12	30.22	29.81	29.90	6	7	6	6	6	6	6	6	6
33	30.00	29.77	29.30	30.25	30.72	28.62	29.97	29.68	30.37	1	90.00	89.31	87.90	90.75	92.16	85.86	89.91	89.04	91.11	6	7	6	6	6	6	6	6	6
34	10.00	10.11	10.14	10.07	10.04	10.47	9.82	10.08	10.11	0.5	30.00	30.32	30.43	30.22	30.11	31.41	29.46	30.25	30.32	7	7	7	6	6	7	7	6	7
2	75.00	75.03	75.44	74.60	74.18	75.51	75.39	75.18	74.40	2	150.00	150.05	150.89	149.19	148.36	151.02	150.77	150.36	148.80	15	6	17	7	7	17	16	7	17
35	5.00	4.99	4.98	4.99	4.99	4.94	5.02	4.99	4.99	0.5	15.00	14.96	14.95	14.98	14.98	14.83	15.06	14.96	14.96	6	7	6	7	7	6	6	7	6
36	25.00	25.10	25.29	24.94	24.75	25.61	24.95	25.14	24.90	1	50.00	50.21	50.57	49.87	49.51	51.23	49.89	50.27	49.79	6	7	6	7	7	6	6	7	6
37	15.00	15.04	14.89	15.19	15.34	15.01	14.76	14.97	15.29	0	45.00	45.11	44.67	45.58	46.03	45.03	44.28	44.92	45.86	6	7	6	7	7	6	6	7	6
38	5.00	5.01	4.92	5.11	5.20	4.95	4.88	4.98	5.16	0.5	15.00	15.03	14.75	15.33	15.61	14.86	14.63	14.93	15.48	7	8	7	8	8	7	7	8	7
39	5.00	5.00	5.01	4.99	4.98	5.00	5.02	5.00	4.98	0.5	15.00	15.00	15.02	14.96	14.94	15.00	15.05	15.01	14.95	7	8	7	8	8	7	7	8	7
40	5.00	4.99	5.03	4.95	4.91	5.00	5.06	5.01	4.92	0.5	15.00	14.97	15.09	14.84	14.72	14.99	15.19	15.02	14.77	7	8	7	8	8	7	7	8	7
41	60.00	59.76	60.67	58.83	57.93	59.93	61.43	60.16	58.26	0.5	180.00	179.29	182.00	176.50	173.79	179.79	184.29	180.47	174.79	7	8	7	8	8	7	7	8	7
42	15.00	15.07	14.96	15.18	15.29	15.17	14.74	15.01	15.27	1.5	45.00	45.20	44.88	45.54	45.86	45.51	44.23	45.03	45.80	7	8	8	8	8	8	8	8	7
59	5.00	4.98	5.06	4.90	4.83	4.99	5.12	5.01	4.85	0	15.00	14.93	15.17	14.71	14.48	14.98	15.35	15.03	14.56	8	8	7	8	8	7	8	8	8
43	15.00	14.99	14.88	15.09	15.19	14.84	14.92	14.95	15.14	1.5	45.00	44.96	44.65	45.28	45.58	44.53	44.76	44.86	45.41	8	9	7	8	9	7	7	9	8
44	25.00	24.87	24.54	25.19	25.52	24.13	24.96	24.81	25.29	0.5	75.00	74.61	73.61	75.56	76.56	72.39	74.89	74.44	75.86	8	9	8	9	9	8	8	9	8
45	25.00	25.20	25.28	25.14	25.06	25.90	24.65	25.15	25.20	0.5	75.00	75.61	75.83	75.42	75.19	77.69	73.94	75.44	75.61	8	9	8	9	9	8	8	9	8
46	5.00	5.04	5.07	5.00	4.97	5.18	4.96	5.04	5.00	0.5	15.00	15.11	15.21	15.01	14.90	15.54	14.89	15.11	15.01	8	9	8	9	9	8	9	9	8
47	35.00	35.38	35.51	35.25	35.13	36.65	34.37	35.29	35.38	0.5	105.00	106.14	106.52	105.76	105.39	109.94	103.11	105.88	106.14	9	9	8	9	9	8	9	9	8
12	15.00	15.05	15.11	15.00	14.95	15.27	14.94	15.05	15.00	0.5	30.00	30.11	30.21	30.01	29.90	30.53	29.88	30.09	30.01	9	1							

j	Tiempos de proceso									Área	Riesgo ergonómico									Configuración								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18		1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
48	35.00	34.99	35.38	34.60	34.22	35.35	35.41	35.14	34.41	0.5	105.00	104.98	106.13	103.81	102.66	106.05	106.22	105.42	103.23	8	10	9	10	10	9	9	10	9
49	5.00	4.98	4.84	5.11	5.25	4.78	4.91	4.94	5.17	0.5	15.00	14.94	14.53	15.34	15.75	14.33	14.73	14.82	15.51	9	10	9	10	10	9	9	10	9
50	15.00	14.89	14.67	15.13	15.36	14.36	14.96	14.85	15.19	0.5	45.00	44.68	44.00	45.40	46.08	43.08	44.88	44.54	45.58	10	11	9	10	10	9	10	11	10
55	20.00	19.88	19.78	19.99	20.09	19.43	20.13	19.89	19.98	0	60.00	59.65	59.33	59.97	60.28	58.28	60.38	59.66	59.95	9	10	9	11	10	9	10	10	9
56	10.00	9.92	9.87	9.98	10.04	9.64	10.09	9.93	9.97	0	30.00	29.77	29.60	29.95	30.12	28.92	30.27	29.78	29.92	10	11	10	11	10	10	9	10	9
60	20.00	19.91	19.82	20.01	20.10	19.57	20.07	19.92	20.01	0.5	60.00	59.74	59.47	60.03	60.31	58.71	60.21	59.75	60.04	9	11	9	10	10	10	8	10	10
51	25.00	25.17	25.22	25.11	25.05	25.72	24.72	25.13	25.17	0	75.00	75.50	75.67	75.33	75.16	77.16	74.16	75.38	75.50	9	11	10	10	11	10	10	11	9
52	30.00	29.93	29.72	30.11	30.32	29.49	29.99	29.90	30.18	0	90.00	89.79	89.17	90.33	90.96	88.46	89.96	89.70	90.54	10	10	10	11	11	9	9	10	10
53	15.00	15.02	15.03	15.02	15.01	15.11	14.96	15.02	15.02	0	45.00	45.07	45.10	45.05	45.02	45.32	44.87	45.07	45.07	10	10	10	11	11	9	10	11	9
54	15.00	15.22	15.18	15.24	15.27	15.82	14.55	15.13	15.37	0	45.00	45.65	45.55	45.73	45.82	47.47	43.65	45.40	46.10	10	11	9	10	11	10	10	11	10
57	10.00	9.92	10.01	9.84	9.75	9.77	10.24	9.98	9.75	0.5	30.00	29.76	30.02	29.51	29.25	29.32	30.72	29.93	29.26	10	11	10	11	11	10	10	11	10
58	20.00	20.16	20.44	19.89	19.60	20.92	19.95	20.20	19.82	0.5	40.00	40.31	40.87	39.77	39.21	41.83	39.90	40.39	39.65	10	11	10	11	11	10	10	11	10
64	10.00	10.07	10.21	9.94	9.80	10.42	9.99	10.09	9.90	0.5	20.00	20.14	20.41	19.87	19.60	20.84	19.98	20.19	19.81	10	11	10	11	11	10	10	11	10
61	45.00	44.97	45.85	44.08	43.20	45.75	45.97	45.28	43.62	1	90.00	89.95	91.70	88.15	86.40	91.50	91.95	90.56	87.25	11	12	11	12	12	11	11	12	11
62	30.00	30.18	30.79	29.59	28.99	31.36	30.21	30.32	29.38	0.5	60.00	60.37	61.58	59.19	57.98	62.71	60.41	60.63	58.77	11	12	11	12	12	11	11	12	11
63	30.00	30.26	30.83	29.67	29.09	31.59	30.09	30.38	29.51	0.5	60.00	60.52	61.67	59.33	58.19	63.19	60.19	60.75	59.02	11	12	11	12	12	11	11	12	11
66	10.00	10.01	9.75	10.26	10.51	9.77	9.74	9.92	10.39	0.5	20.00	20.01	19.50	20.52	21.03	19.54	19.47	19.84	20.78	11	12	11	12	12	11	11	12	11
67	15.00	14.80	14.62	14.99	15.17	14.03	15.21	14.81	14.98	0.5	30.00	29.61	29.24	29.97	30.33	28.07	30.42	29.62	29.96	11	12	11	12	12	11	11	12	11
65	5.00	5.03	5.08	4.98	4.93	5.18	4.99	5.04	4.97	0	10.00	10.06	10.16	9.96	9.87	10.36	9.97	10.08	9.95	12	13	12	13	13	12	12	13	12
68	60.00	59.87	60.36	59.38	58.89	59.96	60.76	60.08	59.07	1.5	120.00	119.74	120.71	118.76	117.79	119.92	121.52	120.17	118.14	12	13	12	13	13	12	12	13	12
69	10.00	10.10	9.94	10.25	10.41	10.23	9.65	10.01	10.38	0.5	20.00	20.19	19.88	20.51	20.82	20.46	19.30	20.02	20.76	12	14	13	14	13	13	12	13	13
70	30.00	29.74	29.49	29.99	30.25	28.72	30.27	29.74	29.99	1	60.00	59.49	58.98	59.99	60.50	57.43	60.53	59.48	59.99	12	14	13	14	13	13	12	13	13
71	10.00	9.95	9.79	10.11	10.27	9.65	9.93	9.92	10.17	0.5	20.00	19.90	19.59	20.23	20.55	19.30	19.87	19.83	20.34	12	13	12	13	13	12	12	13	12
72	10.00	9.98	10.17	9.78	9.59	10.09	10.24	10.05	9.68	0.5	20.00	19.95	20.33	19.57	19.19	20.19	20.49	20.09	19.35	12	13	12	13	13	12	12	13	12
73	40.00	40.20	39.84	40.59	40.95	40.46	39.19	39.99	40.87	1.5	80.00	80.40	79.67	81.17	81.89	80.92	78.38	79.97	81.73	13	13	12	13	14	12	13	14	12
74	25.00	24.73	24.47	24.99	25.24	23.66	25.28	24.73	24.98	0.5	50.00	49.45	48.94	49.97	50.48	47.31	50.56	49.46	49.95	13	14	13	14	14	13	13	14	13
75	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	0.5	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	13	14	13	14	14	13	13	14	13
77	15.00	15.14	14.97	15.31	15.48	15.39	14.54	15.04	15.46	0.5	30.00	30.27	29.94	30.62	30.95	30.79	29.09	30.07	30.92	13	14	13	14	14	13	13	14	13
78	15.00	15.13	15.01	15.25	15.37	15.39	14.62	15.04	15.38	0.5	30.00	30.25	30.01	30.51	30.75	30.78	29.23	30.07	30.75	13	14	13	14	14	13	13	14	13
79	15.00	14.92	14.81	15.03	15.14	14.57	15.05	14.91	15.05	0.5	30.00	29.84	29.62	30.06	30.28	29.15	30.10	29.82	30.09	13	14	13	14	14	13	13	14	13
76	10.00	10.06	10.27	9.85	9.64	10.45	10.08	10.11	9.77	1	20.00	20.12	20.54	19.70	19.28	20.90	20.17	20.22	19.55	14	15	14	15	15	14	14	15	14
80	10.00	10.08	10.30	9.85	9.63	10.53	10.08	10.13	9.78	0.5	20.00	20.15	20.60	19.70	19.25	21.05	20.15	20.26	19.55	14	15	14	15	15	14	14	15	14
81	10.00	10.04	10.15	9.94	9.84	10.28	10.01	10.06	9.91	1	20.00	20.09	20.30	19.88	19.67	20.56	20.03	20.12	19.82	14	15	14	15	15	14	14	15	14
82	10.00	10.00	10.09	9.91	9.82	10.10	10.08	10.03	9.87	0	20.00	20.01	20.19	19.83	19.65	20.20	20.17	20.06	19.74	14	15	14	15	15	14	14	15	14
83	20.00	19.78	20.11	19.46	19.13	19.46	20.76	19.96	19.18	0.5	40.00	39.56	40.22	38.91	38.25	38.92	41.52	39.92	38.36	14	15	14	15	15	14	14	15	14
84	10.00	10.01	9.96	10.06	10.12	10.01	9.92	10.00	10.10	0	20.00	20.03	19.93	20.13	20.23	20.01	19.84	19.99	20.20	14	15	14	15	15	14	14	15	14
88	15.00	15.03	15.17	14.89	14.75	15.26	15.09	15.07	14.83	0.25	45.00	45.09	45.52	44.66	44.24	45.79	45.26	45.22	44.49	14	15	14	15	15	14	14	15	14
90	30.00	29.80	29.73	29.87	29.93	29.13	30.33	29.85	29.80	0.5	90.00	89.40	89.20	89.60	89.80	87.40	91.00	89.56	89.40	14	15	14	15	15	14	14	15	14
85	20.00	19.90	19.79	20.03	20.14	19.50	20.06	19.89	20.03	0.5	60.00	59.70	59.36	60.08	60.42	58.49	60.19	59.68	60.10	15	16	15	16	16	15	15	16	15
86	25.00	25.04	25.04	25.06	25.07	25.18	24.89	25.02	25.08	0.5	50.00	50.09	50.07	50.12	50.13	50.35	49.77	50.04	50.17	16	16	15	16	16	15	15	16	15
87	20.00	20.07	20.14	20.00	19.93	20.35	19.92	20.07	20.00	0.5	40.00	40.14	40.28	40.01	39.86	40.71	39.84	40.14	40.00	16	16	15	16	16	15	15	16	15
89	20.00	20.30	20.43	20.15	20.01	21.30	19.57	20.25	20.23	0.5	60.00	60.89	61.29	60.44	60.04	63.91	58.71	60.74	60.69	15	16	15	16	16	15	15	16	15
91	20.00	19.93	20.03	19.85	19.75	19.84	20.21	19.98	19.77	0.5	60.00	59.80	60.09	59.54	59.25	59.52	60.62	59.94	59.30	16	16	15	16	16	15	15	16	15
92	25.00	25.01	24.94	25.10	25.17	25.00	24.88	24.99	25.14	0.5	75.00	75.04	74.83	75.29	75.50	75.00	74.63	74.97	75.42	16	16	15	16	16	15	15	16	15
98	80.00	79.62	79.08	80.21	80.74	77.99	80.12	79.52	80.28	0	160.00	159.24	158.16	160.41	161.49	155.98	160.24	159.04	160.57	17	17	16	17	17	16	17	17	16
99	30.00	29.59	29.29	29.89	30.20	28.06	30.51	29.63	29.84	0	90.00	88.77	87.87	89.68	90.59	84.19	91.54	88.88	89.52	16	17	16	17	17	16	16	17	16
10																												

<i>j</i>	Tiempos de proceso									Área	Riesgo ergonómico									Configuración								
	1	2	3	6	9	10	11	12	18		1	2	3	6	9	10	11	12	18	1	2	3	6	9	10	11	12	18
103	30.00	29.91	29.44	30.37	30.84	29.18	29.73	29.78	30.56	0.5	60.00	59.83	58.89	60.74	61.68	58.35	59.45	59.56	61.13	17	17	17	18	18	17	17	18	17
104	5.00	5.02	5.03	5.01	5.01	5.09	4.97	5.02	5.02	0	15.00	15.06	15.08	15.04	15.02	15.27	14.90	15.05	15.06	18	18	17	18	18	17	18	18	17
108	5.00	5.00	4.96	5.05	5.09	4.97	4.95	4.99	5.07	0	10.00	10.01	9.92	10.09	10.18	9.94	9.90	9.97	10.14	18	18	17	18	18	17	18	18	18
109	5.00	4.97	4.95	4.99	5.01	4.86	5.04	4.97	4.99	0.5	10.00	9.94	9.90	9.98	10.02	9.71	10.08	9.95	9.97	18	18	18	18	18	18	18	18	18
111	10.00	10.02	9.83	10.22	10.41	9.91	9.76	9.95	10.32	0	20.00	20.05	19.67	20.43	20.81	19.81	19.51	19.90	20.65	18	18	18	18	18	18	18	18	18
112	10.00	9.97	9.99	9.94	9.92	9.89	10.09	9.98	9.92	0	20.00	19.94	19.98	19.89	19.85	19.78	20.18	19.97	19.84	18	18	18	18	18	18	18	18	18
113	15.00	14.87	14.74	15.00	15.12	14.36	15.13	14.87	15.00	0.5	30.00	29.74	29.49	29.99	30.25	28.72	30.27	29.73	29.99	18	18	18	18	18	18	18	18	18
114	20.00	19.84	19.75	19.94	20.03	19.28	20.21	19.86	19.91	0	40.00	39.68	39.50	39.88	40.07	38.56	40.42	39.72	39.82	18	18	18	18	18	18	18	18	18
115	20.00	19.90	19.77	20.05	20.18	19.50	20.03	19.89	20.07	0	40.00	39.81	39.54	40.10	40.37	38.99	40.06	39.78	40.14	18	18	18	18	18	18	18	18	18
116	45.00	44.59	44.18	44.97	45.37	42.92	45.47	44.58	44.96	1	90.00	89.17	88.37	89.93	90.74	85.84	90.94	89.15	89.92	18	18	18	18	18	18	18	18	18
106	25.00	25.08	25.28	24.89	24.69	25.53	25.03	25.11	24.83	0.5	50.00	50.17	50.56	49.78	49.39	51.06	50.06	50.23	49.67	19	19	19	19	19	19	19	19	19
107	5.00	5.00	5.01	4.99	4.98	5.00	5.01	5.00	4.98	0	15.00	14.99	15.02	14.96	14.93	14.99	15.04	15.00	14.94	20	20	20	20	20	20	20	20	20
117	20.00	20.11	20.56	19.68	19.23	20.90	20.20	20.22	19.51	0.5	40.00	40.22	41.11	39.36	38.46	41.80	40.40	40.44	39.02	19	19	19	19	19	19	19	19	19
118	25.00	25.38	25.23	25.53	25.68	26.38	24.09	25.20	25.80	0	50.00	50.76	50.46	51.06	51.36	52.75	48.17	50.40	51.60	19	19	19	19	19	19	19	19	19
131	40.00	40.08	40.46	39.70	39.31	40.69	40.22	40.20	39.54	0.5	80.00	80.15	80.92	79.39	78.63	81.38	80.45	80.39	79.08	19	19	19	19	19	19	19	19	19
132	25.00	25.02	24.91	25.16	25.28	25.00	24.79	24.97	25.23	1	25.00	25.02	24.91	25.16	25.28	25.00	24.79	24.97	25.23	19	19	19	19	19	19	19	19	19
134	20.00	20.16	19.77	20.55	20.94	20.25	19.29	19.98	20.83	0.5	20.00	20.16	19.77	20.55	20.94	20.25	19.29	19.98	20.83	19	19	19	19	19	19	19	19	19
105	30.00	30.23	30.40	30.05	29.88	31.08	29.73	30.22	30.08	0.5	60.00	60.46	60.80	60.10	59.76	62.16	59.46	60.44	60.16	20	20	20	20	20	20	20	20	20
119	25.00	24.81	24.69	24.93	25.05	24.10	25.27	24.83	24.89	0	50.00	49.61	49.37	49.85	50.09	48.21	50.54	49.66	49.78	20	20	20	20	20	20	20	20	20
120	20.00	19.91	19.90	19.92	19.92	19.63	20.17	19.94	19.88	0.5	40.00	39.82	39.81	39.84	39.85	39.27	40.34	39.88	39.75	20	20	20	20	20	20	20	20	20
121	45.00	44.83	44.42	45.23	45.65	43.90	44.95	44.76	45.35	1.5	90.00	89.66	88.83	90.47	91.29	87.79	89.89	89.51	90.71	20	20	20	20	20	20	20	20	20
122	15.00	15.08	15.19	14.97	14.86	15.43	14.95	15.09	14.96	0.5	15.00	15.08	15.19	14.97	14.86	15.43	14.95	15.09	14.96	20	20	21	20	20	21	21	20	20
123	10.00	9.91	9.84	9.97	10.03	9.57	10.12	9.91	9.96	0.5	10.00	9.91	9.84	9.97	10.03	9.57	10.12	9.91	9.96	21	20	21	20	20	21	21	20	20
110	5.00	5.05	5.08	5.02	4.99	5.24	4.94	5.05	5.03	0	10.00	10.10	10.17	10.03	9.97	10.47	9.87	10.09	10.05	21	22	22	22	21	21	21	21	21
124	10.00	10.08	10.13	10.03	9.98	10.36	9.89	10.06	10.04	0	10.00	10.08	10.13	10.03	9.98	10.36	9.89	10.06	10.04	21	21	21	21	21	21	21	21	21
125	20.00	19.97	20.29	19.64	19.33	20.19	20.39	20.09	19.47	1	20.00	19.97	20.29	19.64	19.33	20.19	20.39	20.09	19.47	21	21	21	21	21	21	21	21	21
126	30.00	29.86	29.88	29.84	29.82	29.45	30.30	29.92	29.76	0.5	60.00	59.71	59.76	59.68	59.64	58.90	60.60	59.84	59.51	21	21	21	21	21	21	21	21	21
128	25.00	24.99	25.27	24.72	24.44	25.24	25.28	25.08	24.57	0.5	50.00	49.97	50.54	49.44	48.87	50.48	50.57	50.15	49.14	21	21	21	22	21	21	21	21	21
135	15.00	15.09	15.03	15.14	15.20	15.28	14.78	15.04	15.21	0.5	15.00	15.09	15.03	15.14	15.20	15.28	14.78	15.04	15.21	21	21	20	21	21	20	22	21	22
136	20.00	19.99	19.81	20.17	20.35	19.80	19.83	19.94	20.26	0.5	20.00	19.99	19.81	20.17	20.35	19.80	19.83	19.94	20.26	22	22	22	21	21	22	22	22	22
137	30.00	29.91	29.74	30.07	30.23	29.47	30.02	29.87	30.11	0.5	60.00	59.81	59.49	60.14	60.47	58.93	60.03	59.74	60.21	22	22	22	21	21	22	22	22	22
93	10.00	9.97	9.74	10.20	10.43	9.66	9.82	9.90	10.30	0.5	30.00	29.91	29.22	30.61	31.30	28.97	29.47	29.71	30.91	16	22	18	22	22	18	16	22	21
127	10.00	9.91	9.97	9.85	9.80	9.71	10.24	9.96	9.78	0.5	20.00	19.83	19.94	19.70	19.59	19.41	20.48	19.92	19.56	22	21	22	22	22	22	22	21	21
129	30.00	30.02	29.68	30.34	30.68	29.71	29.66	29.91	30.52	0.5	60.00	60.04	59.36	60.68	61.36	59.42	59.32	59.82	61.04	21	21	21	22	22	21	21	21	21
130	30.00	30.10	30.31	29.91	29.70	30.63	29.98	30.14	29.85	0.75	60.00	60.20	60.62	59.81	59.39	61.26	59.96	60.27	59.70	22	22	22	22	22	22	22	22	22
133	25.00	25.15	25.46	24.81	24.50	25.89	25.05	25.22	24.73	0.5	25.00	25.15	25.46	24.81	24.50	25.89	25.05	25.22	24.73	22	22	22	22	22	22	22	22	22
138	30.00	29.89	30.01	29.76	29.63	29.67	30.37	29.97	29.64	0.5	60.00	59.78	60.02	59.51	59.27	59.34	60.74	59.94	59.28	22	22	22	21	22	22	22	22	22
94	5.00	4.99	4.94	5.05	5.11	4.91	4.96	4.98	5.08	0.5	15.00	14.98	14.81	15.15	15.32	14.74	14.87	14.93	15.23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
95	20.00	19.98	19.71	20.26	20.52	19.65	19.75	19.90	20.38	0.5	60.00	59.93	59.13	60.77	61.56	58.96	59.26	59.69	61.13	23	23	23	23	23	23	23	23	23
96	10.00	10.08	10.22	9.94	9.81	10.46	9.98	10.10	9.92	0.5	30.00	30.25	30.66	29.83	29.42	31.39	29.94	30.31	29.75	23	23	23	23	23	23	23	23	23
97	5.00	5.02	5.03	5.01	5.00	5.09	4.96	5.01	5.02	0.5	15.00	15.05	15.08	15.04	15.01	15.26	14.89	15.04	15.05	23	23	23	23	23	23	23	23	23
139	15.00	14.91	14.76	15.05	15.20	14.47	15.04	14.89	15.08	1	30.00	29.81	29.51	30.11	30.40	28.94	30.09	29.77	30.16	23	23	23	23	23	23	23	23	23
140	120.00	120.93	121.60	120.20	119.53	124.33	118.93	120.91	120.33	0	120.00	120.93	121.60	120.20	119.53	124.33	118.93	120.91	120.33	23	23	23	23	23	23	23	23	23

Tabla A.51: Datos correspondientes a los nueve planes de demanda.

BIBLIOGRAFÍA

- ABBE, O. O., HARVEY, C. M., IKUMA, L. H. Y AGHAZADEH, F. (2011). Modeling the relationship between occupational stressors, psychosocial/physical symptoms and injuries in the construction industry. *International Journal of Industrial Ergonomics* **41**(2), 106–117.
- AENOR (2009). *Ergonomía y psicología*. AENOR. ISBN: 978-84-8143-588-7.
- AMANO, M., UMEDA, G., NAKAJIMA, H. Y YATSUKI, K. (1988). Characteristics of work actions of shoe manufacturing assembly line workers and a cross-sectional factor-control study on occupational cervicobrachial disorders. *Japanese Journal of Industrial Health* **30**(1), 3–12.
- ASEPEYO (2008). *Documento 7: Pupitre didáctico de ergonomía en el sistema hombre máquina*. Dirección Seguridad e Higiene de ASEPEYO.
- BAO, S., SPIELHOLZ, P., HOWARD, N. Y SILVERSTEIN, B. (2009). Application of the strain index in multiple task jobs. *Applied Ergonomics* **40**(1), 56–68.
- BARBE, M. F. Y BARR, A. E. (2006). Inflammation and the pathophysiology of work-related musculoskeletal disorders. *Brain, Behavior, and Immunity* **20**(5), 423–429.
- BATALLA, C., BAUTISTA, J. Y ALFARO, R. (2015). Ergonomía y evaluación del riesgo ergonómico. In: *Report number: OPE-WP.2015/01 (20150117)*. URL: <http://hdl.handle.net/2117/26070>, Affiliation: Univesitat Politècnica de Catalunya - Barcelona- Tech.
- BATTAÏA, O. Y DOLGUI, A. (2012). Reduction approaches for a generalized line balancing problem. *Computers and Operations Research* **39**(10), 2337–2345.
- BATTAÏA, O. Y DOLGUI, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics* **142**(2), 259–277.
- BAUTISTA, J. (2008). *Sistemas avanzados de producción: Nociones sobre equilibrado de líneas de producción y montaje*. URL <http://www.prothius.com>.
- BAUTISTA, J., ALFARO, R. Y BATALLA, C. (2014a). Incorporando condiciones laborales a problemas de secuencias en líneas de productos mixtos. XXIV Congreso Nacional de ACEDE. Castellón.

- BAUTISTA, J., ALFARO, R. Y BATALLA, C. (2014b). Modeling and solving the mixed-model sequencing problem to improve productivity. *In Press, Accepted Manuscript. Available online 2 December 2014. International Journal of Production Economics*. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.11.018 .
- BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. Y CANO, A. (2014c). Incorporating the work pace concept into the MMSP-W. In: *Managing Complexity: Challenges for Industrial Engineering and Operations Management. Series: Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*, vol. 2 of ISBN: 978-3-319-04704-1. Springer.
- BAUTISTA, J., ALFARO, R. Y CANO, A. (2013). Incorporating regularity of required workload to the MMSP-W with Serial Workstations and Free interruption of the Operations. In: *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services IFIP Advances in Information and Communication Technology.*, vol. 397 of ISBN: 978-3-642-40351-4 (Print) 978-3-642-40352-1 (Online). Springer.
- BAUTISTA, J., ALFARO-POZO, R., LLOVERA, S. Y BATALLA-GARCÍA, C. (2014d). Incorporating working conditions to a mixed-model sequencing problem. In: DOI: 10.13140/2.1.2810.8486 Report number: OPE-WP.2014/10, Affiliation: Univesitat Politècnica de Catalunya - Barcelona- Tech.
- BAUTISTA, J., BATALLA-GARCÍA, C., ALFARO-POZO, R., LLOVERA, S. Y FORTUNY-SANTOS, J. (2015). Desing and balancing of assembly lines that minimize ergonomic risk. In: DOI: 10.13140/2.1.5066.7841 Report number: OPE-WP.2015/02, Affiliation: Univesitat Politècnica de Catalunya - Barcelona- Tech.
- BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2012). Models for MMSP-W considering workstation dependencies: A case study of Nissan's Barcelona Plant. *European Journal of Operational Research* 223(3), 669–679.
- BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2014e). Modeling and solving a variant of MMSP-W problem with Production Mix Restrictions. In: *Annals of Industrial Engineering 2012. Industrial Engineering: overcoming the crisis. Part IV*, ISBN: 978-1-4471-5348-1. Springer.
- BAUTISTA, J. Y 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(8), 909–932.
- BECKER, C. Y SCHOLL, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*. 168(3), 694–715.

- BERNARD, M. D. Y BRUCE, P. (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors. A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*. DHHS (NIOSH) 97-141.
- BOYSEN, N., FLIEDNER, M. Y SCHOLL, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics* **111**(2), 509–528.
- BRANTON, P. Y GRAYSON, G. (1967). An evaluation of train seats by an observation of sitting behaviour. *Ergonomics* **10**(1), 35–51.
- BUFFA, E. S. Y DYER, J. S. (1983). *Ciencias de la administración e investigación de operaciones: formulación de modelos y métodos de solución*. Méxio D.F. Limusa.
- BUKCHIN, J., DAR-EL, E. M. Y RUBINOVITZ, J. (2002). Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers and Industrial Engineering* **41**, 405–421.
- BYSTRÖM, S., HALL, C., WELANDER, T. Y KILBOM, A. (1995). Clinical disorders and pressure-pain threshold of the forearm and hand among automobile assembly line workers. *Journal of Hand Surgery* **20**(6), 782–790.
- CEN (2013). *Estructura CEN/TC 122*. URL <http://www.cen.eu>.
- CHESHMEHGAZ, H. R., HARON, H., KAZEMIPOUR, F. Y DESA, M. I. (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering* **63**(2), 503–512.
- CHIASSON, M.-E., IMBEAU, D., AUBRY, K. Y DELISLE, A. (2012). Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics* **42**(5), 478–488.
- CHICA, M., CORDÓN, O., DAMAS, S. Y 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.
- CHICA, M., CORDÓN, O., DAMAS, S. Y BAUTISTA, J. (2011). Including different kinds of preferences in a multiobjective and algorithm for time and space assembly line balancing on different nissan scenarios. *Expert Systems with Applications* **38**(1), 709–720.
- CHICA, M., CORDÓN, O., DAMAS, S. Y BAUTISTA, J. (2012). Análisis del NSGA-II para el TSALBP-1/3 cuando existe variación de demanda en una producción mixta. In: *VIII Congreso español sobre Metaheurística, Algoritmos evolutivos y bioinspirados*, ISBN: 978-84-615-6931-1.
- COLOMBINI, D. (1998). An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* **41**(9), 1261–1289.

- COLOMBINI, D., OCCHIPINTI, E. Y GRIECO, A. (2002). *Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs Job Analysis, Ocra Risk Indices. Prevention Strategies and Design Principles*. ISBN: 978-0-08-044080-4. Elsevier Ergonomics Book Series.
- COMPANYS, R. (1986). *Gestión de producción. Sistemas CAD/CAM/CAE. Diseño y fabricación para ordenadores*. Boixareu Editores.
- CORTÉS, D. J. M. (2007). *Seguridad e higiene del trabajo. Técnicas de prevención de riesgos laborales*. ISBN: 978-84-7360-272-3. Editorial Tébar S.L.
- DE PABLO, H. C. (2004). *Manual de ergonomía: incrementar la calidad de vida en el trabajo*. ISBN: 978-84-96224100. Formación Alcalá S.L.
- DEMPSEY, P. G., MCGORRY, R. W. Y MAYNARD, W. S. (2005). A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists. *Applied Ergonomics* **36**(4).
- DEVEREUX, J., RYDSTED, L., KELLY, V., WESTON, P. Y BUCKLE, P. (2004). *The role of work stress and psychological factors in the development of musculoskeletal disorders*. ISBN: 0-7176-2903-1. Robens Centre for Health Ergonomics for the Health and Safety Executive. Research Report 273.
- DIETRICH, B. L. (1991). A taxonomy of Discrete Manufacturing Systems. *Operations Research* **39**(6), 886–902.
- ELMAGHRABY, S. (1966). *Desing of production systems*. New York: Reinhold Publishing Corporation.
- EMC (2014). NIOSH *Lifting Equation*. URL <http://www.emcins.com>. Insurance Companies.
- EZCURRA, R. Y RODRÍGUEZ-POSE, A. (2013). Does economic globalization affect regional inequality? A cross-country analysis. *World Development* **52**, 92–103.
- GENCAT (2006). GENCAT, *Departamento de Trabajo y Dirección General de Relaciones Laborales*. URL <http://www.20.gencat.cat>.
- HEINRICH, H. W. (1959). *Industrial accidents prevention: A scientific approach*. ISBN: 0070280584. New York: McGraw-Hill.
- HIGNETT, S. Y MCATAMNEY, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics* **31**(2), 201–205.
- HOLLAND, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. ISBN: 0472084607. The University of Michigan Press, Ann Arbor.

- IBV (2007). *Ergo/IBV Evaluación de riesgos ergonómicos*. URL <http://www.ibv.org/>.
- INSHT (2003). *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la manipulación manual de cargas*. Real Decreto 487/1997, de 14 de abril. B.O.E. nº 97 de 23 de abril.
- INSHT (2011). VII *Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo*. URL <http://www.oect.es>.
- JALLON, R., IMBEAU, D. Y MARCELLIS-WARIN, N. (2011). Development of an indirect-cost calculation model suitable for workplace use. *Journal of Safety Research* **42**(3), 149–164.
- JASTRZEBOWSKI, W. B. (2006). *An outline of ergonomics or the science of work based upon the truths drawn from the science of nature*, vol. 29-30 of ISBN: 978-0-415-30430-6; eBook ISBN: 978-0-8493-7547-7. International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors, Second Edition.
- JOHNSON, P. (1992). *Human-Computer Interaction: Psychology, Task Analysis and Software Engineering*. ISBN-10: 0077072359; ISBN-13: 978-0077072353. McGrawHill. Publishing Co.
- KARHU, O., KANSI, P. Y KUORINKA, L. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics* **8**(4), 199–201.
- KENNEDY, J. L. (1962). *Psychology and System Development*. En Gagné, R.M. and col: Psychological Principles in System Development.
- LANDAU, K., RADEMACHER, H., MESCHKE, H., WINTER, G., SCHAUB, K., GRASMUECK, M., MOELBERT, I., SOMMER, M. Y SCHULZE, J. (2008). Musculoskeletal disorders in assembly jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects. *International Journal of Industrial Ergonomics* **38**(7-8), 561–576.
- LANFRANCHI, J. B. Y DUVEAU, A. (2008). Explicative models of musculoskeletal disorders (MSD): From biomechanical and psychosocial factors to clinical analysis of ergonomics. *European Review of Applied Psychology-Revue Européenne De Psychologie Appliquée* **58**, 201–213.
- LARRAÑETA, J. C. Y ONIEVA, L. (1988). *Métodos modernos de gestión de la producción*. ISBN-10: 8420681229; ISBN-13: 978-8420681221. Alianza Editorial.
- LAVILLE, A. (1977). *Ergonomia*. Universidad de Sao Paulo.
- LLANEZA, A. F. J. (2008). *Ergonomía y psicología aplicada. Manual para la formación del especialista*. ISBN: 978-84-8406-874-4. Lex Nova.
- MARCOULAKI, E. C., PAPAZOGLU, I. A. Y KONSTANDINIDOU, M. (2012). Prediction of occupational accident statistics and work time loss distributions using Bayesian analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **25**(3), 467–477.

- MARRAS, W. S., LAVENDER, S. A., LEURGANS, S. E., FATHALLAH, F. A., FERGUSON, S. A., ALLREAD, W. G. Y RAJULU, S. L. (1995). Biomechanical risk factors for occupationally-related low back disorders. *Ergonomics* **38**(2), 377–410.
- MCATAMNEY, L. Y CORLETT, E. N. (1993). Rula: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics* **24**(2), 91–99.
- MCCORMICK, E. J. (1964). *Human Factors Engineering*. McGrawHill.
- MEYSS (2013). *Anuario de Estadísticas Laborales del MEYSS*. URL <http://www.empleo.gob.es>.
- MONDELO, P. R., GREGORIO, E. Y BARRAU, P. (1994). *Ergonomía I. Fundamentos*. ISBN: 84-8301-315-0. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- MORTIMORE, M. Y BARRÓN, F. (2005). *Informe sobre la industria automotriz mexicana*. ISBN: 9213226934. CEPAL.
- MURAD, M. S., FARNWORTH, L. Y O'BRIEN, L. (2012). Psychometric properties of occupational self-assessment for injured workers with musculoskeletal disorders. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **42**, 507–517. ASEAN Conference on Environment-Behaviour Studies (AcE-Bs), Riverside Majestic Hotel, 7- 8 July 2010, Kuching, Sarawak, Malaysia.
- MURRELL, K. F. H. (1969). *Ergonomics: man in his working environment*. Chapman and Hall.
- NACHEMSON, A. Y ELFSTRÖM, G. (1970). *Intravital dynamic pressure measurements in lumbar discs. A study of common movements, maneuvers and exercises*. ALMQVIST and WIKSELL.
- NANCY, N. M. (2007). Psychosocial factors in musculoskeletal disorders. *Critical Care Nursing Clinics of North America* **19**(2), 145–153.
- NIOSH (1981). *A Work practices guide for manual lifting*. NIOSH Technical Report No. 81-122. US Department of Health and Human Services (NIOSH). Cincinnati, OH.
- OHLSSON, K., HANSSON, G. A., BALOGH, I., STRÖMBERG, U., PÅLSSON, B., NORDANDER, C., RYLANDER, L. Y SKERFVING, S. (1994). Disorders of the neck and upper limbs in women in the fish processing industry. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **51**(12), 826–832.
- OSMOND (2014). RULA - rapid upper limb assessment. <http://www.rula.co.uk>.
- OTTO, A. Y SCHOLL, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* **212**(2), 277–286.
- RAGNAR, F. (1963). *Las leyes técnicas y económicas de la producción*. ISBN 9788471360014. Sagitario S.A..

- REKIEK, B., DOLGUI, A., DELCHAMBRE, A. Y BRATCU, A. (2002). State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control* **26**(2), 163–174.
- ROEBUCK, J. A., KROEMER, K. H. E. Y THOMPSON, W. G. (1975). *Engineering anthropometry methods*. John Wiley and Sons, New York.
- RUBINOVITZ, J., BUKCHIN, J. Y LENZ, E. (1993). Ralb – a heuristic algorithm for design and balancing of robotic assembly lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **42**(1), 497–500.
- SALVESON, M. E. (1995). The Assembly Line Balancing Problem. *The Journal of Industrial Engineering* **6**(3), 18–25.
- SARAVIA, M. H. (2006). *Ergonomía de concepción: su aplicación al diseño y otros procesos proyectuales*. Editorial: Pontificia Universidad Javeriana.
- SCHOLL, A., FLIEDNER, M. Y BOYSEN, N. (2010). Absalom: Balancing assembly lines with assignment restrictions. *European Journal of Operational Research* **200**(3), 688–701.
- SINGLETON, W. T. (1972). *Introduction to Ergonomics*. Geneva; World Health Organization.
- SNOOK, S. H. Y CIRIELLO, V. M. (1991). The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. *Ergonomics* **34**(9), 1197–1213.
- STAMMERS, R. B. Y HALLAM, J. (2003). Task allocation and the balancing of task demands in the multi-man-machine system — some case studies. *Applied Ergonomics* **16**(4), 251–257.
- STORRS, G., RIVERS, R. Y CANTER, D. (1984). The future of man-machine interface research: A discussion and a framework for research original research article. *Applied Ergonomics* **15**(1), 61–63.
- TERSINE, R. J. (1984). *Production/Operations management: Concepts, structure and analysis*. ISBN-10:0130554014; ISBN-13: 978-0130554017. Prentice Hall PTR.
- WATERS, T., PUTZ-ANDERSON, V. Y GARG, A. (1994). *Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation*. US Department of Health and Human Services (NIOSH). Cincinnati, OH.
- WATERS, T. R., PUTZ-ANDERSON, V., GARG, A. Y FINE, L. J. (1993). Revised niosh equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics* **36**(7), 749–776.
- WILSON, J. R. (2014). Fundamentals of systems ergonomics / human factors. *Applied Ergonomics* **45**(1), 5–13.
- WISNER, A. (1998). *Ergonomía y Condiciones de Trabajo*. ISBN 950-582-2473. Buenos Aires, Area de Estudios e Investigaciones Laborales/SECYT - CEIL/CONICET - Humanitas.

- WOMACK, J. P., JONES, D. T. Y ROOS, D. (1991). *The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production*. ISBN: 0060974176, 978-0060974176. HarperCollins.
- XIAO, G. B., DEMPSEY, P. G., LEI, L., MA, Z. H. Y LIANG, Y. X. (2004). Study on musculoskeletal disorders in a machinery manufacturing plant. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **46**(4).
- YEUNG, H. W. (2009). *Globalization Economic*, vol. 2. International Encyclopedia of Human Geography. Elsevier.