

Incorporación de Riesgos Ergonómicos en el Balanceo de Líneas de Ensamble en U

(Incorporating ergonomic risks into U-shaped assembly line balancing problem)

Jairo R. Coronado-Hernández¹, Holman Ospina Mateus¹

¹GIPC. Universidad Tecnológica de Bolívar. Parque Tecnológico Carlos Vélez Pombo. Cartagena de indias-Colombia. coronado@unitecnologica.edu.co , 1128057848@utbvirtual.edu.co.

Resumen: En este trabajo se presenta un modelo de optimización en el balanceo de línea en U considerando riesgos ergonómicos de las tareas dentro de las estaciones de trabajo. El documento, explora diferentes métodos ergonómicos, los cuales pueden ser involucrados dentro de una línea de ensamble. Por medio de un ejemplo, se evidencia como se balancea las tareas en diferentes estaciones de trabajo, respetando el nivel aceptable ergonómico en actividades repetitivas, valorado por medio del método Check List OCRA para una línea de ensamble en U.

Abstract: This paper presents an optimization model for the U-line balancing to incorporating ergonomic risks. Our article, paper considers different ergonomic methods, which may be involved into assembly line. An example is shown as distributed and assigned tasks on different workstations ergonomically acceptable compliance level in repetitive activities valued by the check List OCRA method into U-shaped assembly line balancing.

Keywords: Ergonomía; Balanceo de Línea en U; Trastornos Musculo-Esqueléticos.

1. Introducción

En un sistema de producción “JIT” se podrán implementar líneas de producción en “U” como un tipo de celda de manufactura especial, con beneficios en aspectos como, la cultura del trabajo, la productividad, la calidad, polivalencia de los operarios, la combinación de estaciones y el trabajo en equipo. Dentro de una línea de ensamble, los trabajadores se encuentran propensos al desarrollo de trastornos musculo esqueléticos, debido a la alta repetitividad de actividades, la manipulación de materiales y posturas inadecuadas en las actividades y operaciones dentro de los puestos de trabajo. En 2010, se presentaron en Estados Unidos 346.000 casos de lesiones por trastornos musculo esqueléticos, donde los trabajadores requirieron de 11 días por fuera de actividad laboral para su recuperación (Bureau_of_Labor_Statistics, 2011, November 9). En Colombia, un trabajador es diagnosticado con una enfermedad labora cada hora (FASECOLDA, 2000-2011), Mientras que en los Estados Unidos, en promedio 40 trabajadores son diagnosticados cada hora con trastornos musculo esqueléticos. Todo lo anterior demuestra que los trastornos musculo esqueléticos se presentan con alta frecuencia y es importante centrar atención en ellos, pues las afecciones que presenta el trabajador son de naturaleza acumulativa e impactan en su rendimiento, así como la productividad del puesto de trabajo.

La actividad del hombre esta directamente ligado con el trabajo. Por lo tanto, un entendimiento y control de la capacidad humana y factores de riesgos ocupacionales, ayudan a optimizar las condiciones de trabajo. Debido a la creciente importancia de mantener en las organizaciones un balance entre las competencias y habilidades de los trabajadores, y las condiciones de su actividad laboral, es necesaria la implementación de métodos y herramientas que contribuyan a la toma de decisiones objetivas. La aplicación de aspectos ergonómicos dentro de las líneas de ensamble ha tomado relevancia. Dentro de los trabajos se encuentran el desarrollado por Carnahan et al. (2001), quienes incorporaron la demanda física en la asignación de las tareas, minimizando los riesgos en el agarre manual requerido por los trabajadores en una estación y el tiempo de ciclo de las operaciones dentro de la línea de ensamble. Miralles et al. (2008) y Costa y Miralles (2009), desarrollaron un aplicación de asignación y rotación laboral de los trabajadores, que permitía la inclusión de trabajadores con discapacidad dentro de las estaciones en una línea de ensamble. Otto y Scholl (2011), analizaron la inclusión de riesgos ergonómicos dentro de una línea de ensamble tradicional, con ayuda de métodos de valoración ergonómica. Rajabalipour Cheshmehgaz et al. (2012), plantearon un modelo innovador en el problema de balanceo de línea que toma en consideración la posturas del trabajador, permitiendo la variaciones regulares dentro de las operaciones desarrolladas en las estaciones de trabajo. Xu et al. (2012), desarrollaron una metodología que permite la integración de medidas ergonómicas y de productividad en el diseño de ensamble de línea, con el objetivo de reducir trastornos musculo esqueléticos de los trabajadores en las estaciones de ensamble.

El propósito de este trabajo es la incorporación de riesgos ergonómicos dentro de las líneas de ensamble en U, como uno de los mejores diseños en el ensamblado de operaciones, el cual consiste en formar estaciones de trabajo que a diferencia del balanceo tradicional busca el aprovechamiento de la fuerza de trabajo motivado en filosofías con el Lean Manufacturing y JIT (Aase et al., 2004). El presente documento esta distribuido así: Sección 2 describe los diferentes métodos de valoración ergonómicas; la sección 3 define el modelo de balanceo de línea en U; la sección 4 considera el modelo de balanceo de línea en U tomando en cuenta riesgos ergonómicos; en la sección 5 se valida el modelo a través de un ejemplo practico, y finalmente las conclusiones y perspectivas del problema son descritas en la ultima sección.

2. Métodos de valoración de riesgos laborales

Hoy en día existen métodos que contribuyen a la realización de valoraciones ergonómicas con el objetivo de identificar niveles de riesgos asociados con el desarrollo de actividades laborales. Entre los métodos que permiten evaluar el riesgo, se encuentran técnicas relacionadas con la adopción de posturas forzadas (Método RULA (McAtamney & Nigel Corlett, 1993), Método OWAS(Karhu et al., 1977)), la manipulación manual de cargas (Método NIOSH (Waters et al., 1993), y Tablas de Snook y Ciriello (Snook & Ciriello, 1991)), y la realización de movimientos repetitivos (Método JSI (Moore & Garg, 1995), Método OCRA (Colombini et al., 2002)). En esta sección se hace énfasis en aquellos métodos ergonómicos mas conocidos en la cuantificación de riesgos propenso al desarrollo de trastornos musculo esqueléticos, como lo muestran estudios desarrollados por Dempsey et al. (2005) y David (2005).

En este documento, ilustraremos un ejemplo de línea de ensamble en U, en la Figura 1 se observa el diagrama de precedencia y el Layout que diferencia una línea de ensamble tradicional y una línea de ensamble en U. El diagrama relaciona un conjunto de $n = 12$ tareas $i = 1, \dots, n$, que

toman un tiempo t_i en la ejecución de cada ensamble en la estación de trabajo, durante un tiempo de ciclo de $c = 60$ segundos. Cada actividad relaciona aspectos ergonómicos relacionados con las acciones (movimientos) y manipulación de carga, como se observa en la Tabla 1.

Figura 1. Representación del Balanceo de Línea, a) Diagrama de Precedencia; b) Línea de Ensamble Tradicional. c) Distribución de Línea de Ensamble en U.

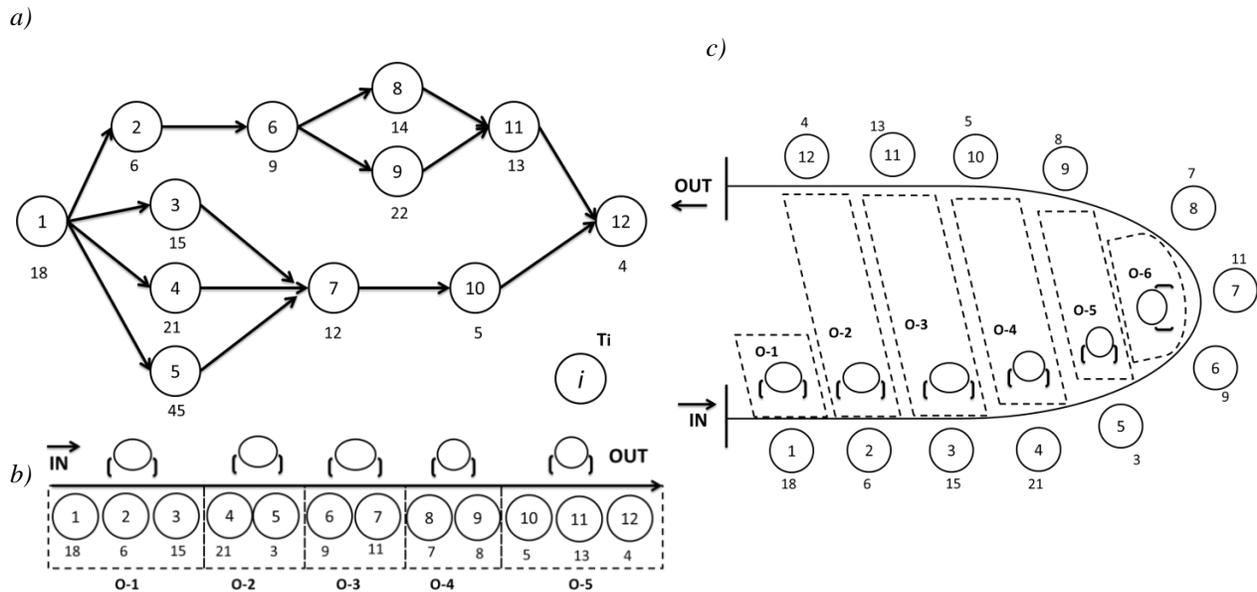


Tabla 1. Ejemplo de Línea de Ensamble, Datos por Manipulación de Carga y Acciones.

Tarea No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Duración de Tarea (Sec) t_i	18	6	15	21	45	9	12	14	22	5	13	4
Manipulación de Carga (kg)	4	5	6	4	3	12	20	2	3	1	0	0
Acciones (Minuto) A_i	9	25	10	11	26	27	10	22	20	23	12	17

2.1. Métodos de valoración ergonómica para la manipulación manual de carga: La ecuación Revisada de NIOSH (National Institute for Occupational)

La ecuación NIOSH (Waters et al., 1993) ayuda a la evaluación de tareas en las que requieren el levantamiento de cargas, permitiendo obtener un peso máximo recomendado (RWL: Recommended Weight Limit) para manipular en el puesto de trabajo, evitando los sobreesfuerzos y la aparición de lesiones en la espalda. La ecuación de NIOSH calcula el peso límite recomendado mediante fórmula 1. Donde: LC: Constante de Carga (23 o 25 Kg); FM: Factor Frecuencia.

$$RWL = LC * FM \quad (1)$$

El método NIOSH arroja el Índice de levantamiento (IL), el cual se calcula como el cociente entre el peso de la carga levantada y el límite de peso recomendado calculado para la tarea (ecuación 2). Donde: LI es el índice de levantamiento; PC es el peso de la carga; RWL es el Peso Máximo Recomendado.

$$IL = \frac{PC}{RWL} = \frac{PC}{LC * FM} \quad (2)$$

La frecuencia de manipulación de carga esta relacionada con la cantidad de maniobras o levantamientos que son ejercidos en el tiempo. El método NIOSH provee unos factores alineados a la frecuencia y duración de las actividades y la distancia vertical en centímetros en la que se desarrolla las operaciones como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Factor de Frecuencia de Tareas en la Ecuación NIOSH.

DURACIÓN DEL TRABAJO			
FREC	<=1 hora	>1 - 2 horas	>2 - 8 horas
elev/min	Corta	Moderada	Larga
>0,2	1	0,95	0,85
0,5	0,97	0,92	0,81
1	0,94	0,88	0,75
2	0,91	0,84	0,65
3	0,88	0,79	0,55
4	0,84	0,72	0,45
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

La ecuación NIOSH es interpretada de acuerdo a tres intervalos de riesgos. Cuando $IL \leq 1$ la actividad no repercute un riesgo grave para los trabajadores, cuando $1 < IL \leq 3$ la actividad es propensa a ocasionar problemas en los trabajadores, y finalmente $LI > 3$ la tarea ocasionará problemas en la salud de los trabajadores. En el desarrollo de un análisis multitarea NIOSH recomienda un Índice de Levantamiento Compuesto (IL_c), así:

$$IL_c = ILT_1 + ILT_2 F_1 + F_2 - ILT_2 F_1 + ILT_3 F_1 + F_2 + F_3 - ILT_3 F_1 - F_2 + \dots \quad (3)$$

Donde: ILT_i es el índice de levantamiento de las tareas simples; $ILT_i(F_j)$ es el índice de levantamiento de la tarea i , calculado a la frecuencia de la tarea j ; $ILT_i(F_j + F_k)$ es el índice de levantamiento de la tarea i , calculado a la frecuencia de la tarea j , más la frecuencia de la tarea k .

Tomando como referencia una constante de carga (LC) de 25 kg, calcularemos el riesgo del operador 6 en la línea de ensamble en U (Figura 1.c) donde el trabajador es el encargado de desarrollar las tareas 6, 7 y 8 con un manipulación de carga de 12, 20 y 2 kilogramos respectivamente (Tabla 1). Dentro de las actividades realizadas en la línea de ensamble, la frecuencia de manipulación o levantamiento es equivalente a 1 por minuto, en relación con el tiempo de ciclo de 60 segundos. Considerando que la actividad es de larga duración el factor de

frecuencia para 1, 2, 3 levantamiento por minuto es 0.75, 0,65 y 0.55 respectivamente. En la Tabla 2 se resumen los cálculos de riesgos independientes y de las tareas compuestas.

Tabla 3. Calculo de Riesgo por Manipulación de Carga Multitarea, Ejemplo Operador 6 en línea de ensamble U.

Tarea	Carga	FM	RWL	IL	Orden	IL _C
Tarea 6	12	0,75	18,75	0,64	2	
Tarea 7	20	0,75	18,75	1,07	1	1,23
Tarea 8	2	0,75	18,75	0,11	3	

Los resultados evidencia de manera independiente riesgos leves que no superan el índice de 1,07 (Tarea 7), pero al ser valorada de manera integral todas las actividades del operador se obtiene un Índice de 1,23 que revela un nivel de riesgo moderado, y que muestra que el nivel de riesgo varia de acuerdo con las actividades desarrolladas por el operador 6 dentro de la estación laboral.

2.2. Métodos de valoración ergonómica para el análisis de repetitividad de actividades: Check List OCRA

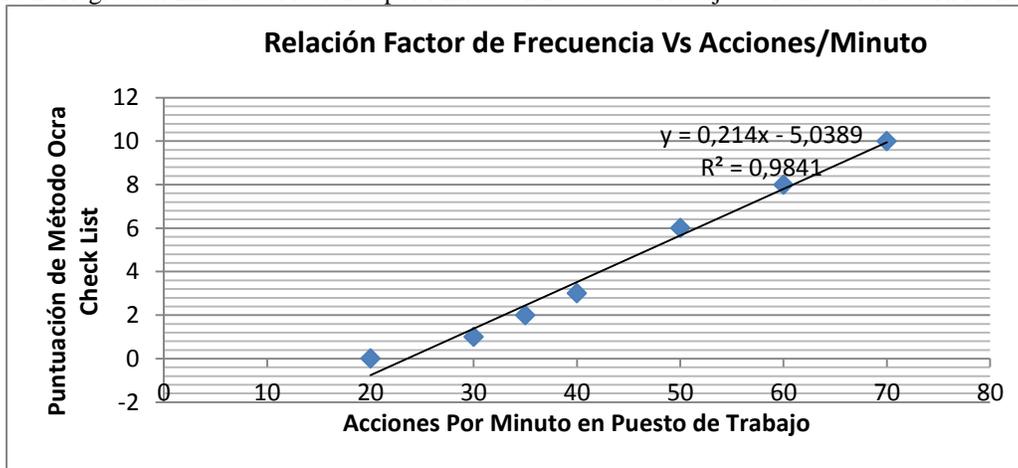
El método Check List OCRA (Colombini et al., 2002; ISO_1228–3, 2007) permite la evaluación de riesgos colectivos (frecuencia de acciones, posturas incómodas, movimiento de brazos, uso de fuerza, variación de posturas, periodos de recuperación) en función de la duración de las actividades. El método es calculado mediante la formula 4. Donde, *FP* Representa el Factor de Postura, *FFrec* Describe el Factor de Frecuencia, *FFuerza* es el Factor de Fuerza, *FD* expresa la influencia la duración de la tarea repetitiva.

$$\text{Índice Check List} = FP + FFrec + FFuerza * FD \quad (4)$$

Los resultados del Índice Check List OCRA con valores inferiores a 5, el método considera que el riesgo es óptimo. Para valores entre 5 y 7.5 el riesgo es aceptable. En índices entre 7.6 y 11 el riesgo es muy ligero. Entre 11.1 y 14 el riesgo es ligero. Entre 14.1 y 22.5 el riesgo es medio, y finalmente un índice superior a 22.5 es considerado un riesgo alto, el cual exige un seguimiento de las actividades del puesto de trabajo.

De acuerdo con el conjunto de tareas de la línea de ensamble (Tabla 1), a continuación se calcula el índice Check List OCRA para cada una de las tareas, considerando: i) el desarrollo de fuerza es moderada generando una puntuación de 4; ii) Las actividades se realizan con lo brazos extendidos y permanecen elevadas la mayoría del tiempo y genera una puntuación de 1; iii) Las actividades se desarrolla en un rango de 7 a 8 horas con la necesidad de desarrollar actividades repetitivas, lo que genera un factor de duración de 1 ; iv) el factor de frecuencia es calculado por medio de la ecuación ($FFrec = 0.214 * (\text{Acciones/Estación}) - 5.0389$) que representa la regresión lineal de los valores establecidos por el método OCRA Check List (Figura 1). En la Tabla 4 se resumen los cálculos de riesgos por acciones repetitivas para cada una de las tareas. Por ejemplo en la actividad 6, contiene 27 acciones por minuto que hace referencia a un factor de frecuencia de 1, de esta manera el nivel de riesgo es igual a 5.74 $((0.7+1+4)*1)$.

Figura 2. Regresión Lineal de Acciones por Minuto en Puesto de Trabajo vs Puntuación OCRA Check List



Para conocer el nivel de riesgos global en una estación de trabajo se acumulan la cantidad de acciones por minuto de las tareas en la estación de trabajo, y de esta manera se recalcula el nivel de riesgo con cada uno de los factores del método. En una estación de trabajo que contenga las tareas 8, 9 y 10 con 65 acciones por minutos, el nivel de riesgo se calcula modificando el factor de frecuencia, donde el método asigna un factor de 8.9, de esta manera el índice es igual a 14 $((8.9+1+4)*1)$, lo que muestra un índice medio que requiere un cuidado especial.

Tabla 4. Calculo de Riesgo por Repetitividad de Acciones de Línea de Ensamble de Tabla 1

Tarea No.	Factor Frecuencia	Factor Postura	Factor Fuerza	Factor Duración	Indicador OCRA CL
1	0,0	1	4	1	5
2	0,3	1	4	1	5,31
3	0,0	1	4	1	5
4	0,0	1	4	1	5
5	0,5	1	4	1	5,53
6	0,7	1	4	1	5,74
7	0,0	1	4	1	5
8	1,8	1	4	1	5
9	0,0	1	4	1	5
10	0,0	1	4	1	5
11	0,0	1	4	1	5
12	0,0	1	4	1	5

2.3. Supuestos Generales para el modelamiento de métodos de Valoración Ergonómicos

Luego de haber examinado varios métodos de valoración ergonómicos en aspectos como la manipulación de carga, la repetitividad de actividades y las posturas forzadas o incómodas, ahora formularemos las siguientes condiciones para la estimación de riesgos ergonómicos.

Dado $F = F S_j$, una función para la estimación de riesgos ergonómicos, que depende del conjunto de tareas y operaciones dentro de una estación de trabajo S_j . La función para la estimación de riesgos ergonómicos posee las siguientes propiedades: i) el nivel de riesgo de una

estación se ve afectado en la medida de las operaciones desarrolladas dentro del puesto de trabajo. (B_j = Conjunto de tareas adicionales que pueden ser asignadas al puesto de trabajo j):

$$F S_j \leq F S_j U l \quad \forall l \in B_j \quad (5)$$

Además, se considera la función de estimación de riesgo ergonómicos F es no decreciente y en muchos casos no lineal en los niveles de exposición.

Nota. Tomando en consideración que la no linealidad en los métodos de valoración ergonómica complican su inclusión dentro de un modelo de balanceo de línea en U, es importante y clave no omitirse, debido a que todos los métodos se fundamentan en funciones no lineales para la estimación del nivel de riesgo de acuerdo como lo señala Otto et al. (2011).

3. Balanceo de Línea de Ensamble en U

Una línea de ensamble, se constituye en un conjunto de estaciones de trabajo que se encuentra interrelacionado y conectado para el desarrollo de un conjunto de tareas y operaciones, que permiten el desarrollo de productos o bienes, y se caracteriza por poseer un tiempo de ciclo, y una distribución que permita establecer la misma carga de trabajo sobre las estaciones donde se labora (Coronado-Hernández & Ortiz Vargas, 2009). Hoy en día, muchas líneas de producción han introducido la utilización de líneas de ensamble en U, con el objetivo de potencializar la gestión productiva del ensamble bajo el uso de los principios de Justo a tiempo (Miltenburg, 2001). Debido a una amplia variedad de esquemas para el balanceo de línea, se clasifica el problema de balanceo en ALBP (Assembly Line Balancing Problem), GALBP (General Assembly Line Balancing Problem), ALDP (Assembly Line Design Problem) y DLBP (Disassembly Line Balancing Problem). Bajo el esquema de GALBP (General Assembly Line Balancing Problem) y como lo señalan Miltenburg y Wijngaard (1994) así como Scholl y Klein (1999) se hallan los problemas de balanceo de líneas en U (UALBP), los cuales a su vez pueden ser clasificados en: i) UALBP-1: minimiza el número de estaciones dado un tiempo ciclo, ii) UALBP-2: minimiza el tiempo de ciclo, dado un número de estaciones y, iii) UALBP-E: maximiza la eficiencia de la línea.

J. Miltenburg y J. Wijngaard (1994), pioneros en introducir los fundamentos de un línea de balanceo en U, proponiendo su modelo matemático que permite profundizar en el estudio de problemas de balanceo con más semejanza a la situación real. La implementación de una línea de balanceo en U permite mejorar la productividad, la calidad, el trabajo en equipo, el entrenamiento, la interacción y eficiencia del sistema (Monden, 1993; J. Miltenburg et al., 1994; Miltenburg, 1998, 2001; Aase et al., 2004; Kriengkorkot & Pianthong, 2007; Hwang et al., 2008).

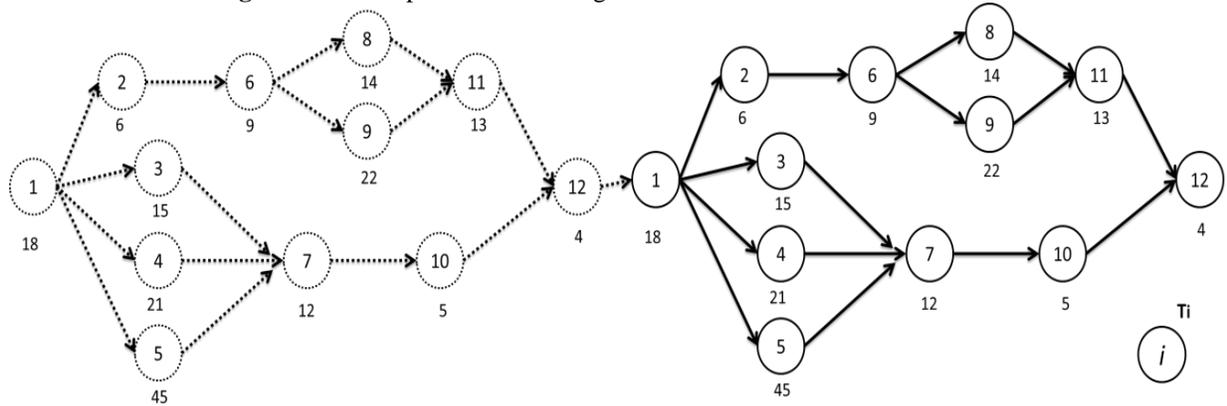
El modelo UALBP es un sistema de producción que posee un número de tareas n , donde cada una de ella posee una relación de precedencia y unos tiempos de duración, T_i ($i = 1, \dots, n$), que son asignadas a una estación ($j = 1, \dots, m$). El objetivo de ULBP-1 es minimizar la cantidad de estaciones requeridas m^* , para un tiempo de ciclo, C , de tal modo que:

$$\lceil m_{\min} \rceil \leq m^* \leq m_{\max} \leq n \quad (6)$$

Donde m_{min} es el mínimo de estaciones teóricas requeridas ($m_{min} = \sum_i t_i / C$ u otro tipo de designación o consideración mínima) y m_{max} es el máximo de estaciones de trabajo que puede ser requerida.

Una de las principales características que UALBP es que debe permitir la asignación de las tareas en las estaciones de trabajo hacia adelante y hacia atrás (Por ejemplo la tarea inicial y final pueden estar en una misma estación en un sistema de ensamble en U), lo cual no se logra con un sistema de balanceo tradicional. Para habilitar esta asignación que UALBP es necesaria la creación de una red “Fantasma” que sea agregada a la red original de precedencia (Jackson, 1956). En la Figura 3, se ilustra la red de precedencia del ejemplo tabla 1 y figura 1, para un conjunto de 12 tareas con la red fantasma en líneas punteadas. Al iniciar en medio de la red extendida, se podrán desarrollar asignaciones en las estaciones hacia adelante por medio de la red original, hacia atrás a través de la red fantasma o simultáneamente en ambas direcciones.

Figura 3. Red de precedencia de Figura 1 con red de Precedencia Fantasma.



Para el modelo matemático se definen las siguientes variables:

$X_{ij} = 1$, si la tarea i de la red original es asignada a la estación j ; 0 lo contrario.

$Y_{ij} = 1$, si la tarea i de la red fantasma es asignada a la estación j ; 0 lo contrario.

$Z_j = 1$, si la estación j es utilizada; 0 lo contrario.

Además se define $P = 1, \dots, p, \dots, |P|$ que representa el conjunto de parejas ordenadas de tareas que reflejan relación de precedencia; de esta manera $P = r, s$ indica que la tarea r precede inmediatamente a la tarea s . De acuerdo con Urban (1998), El modelo de programación entera para el UABLP-1 es el siguiente:

Minimizar

$$\sum_{j=n_{min}+1}^{m_{max}} Z_j \quad (7)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} (X_{ij} + Y_{ij}) = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (X_{ij} + Y_{ij}) \leq C \quad \forall j = 1, \dots, m_{min} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i (X_{ij} + Y_{ij}) \leq CZ_j \quad \forall j = m_{min} + 1, \dots, m_{max} \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} m_{max} - j + 1 \quad X_{rj} - X_{sj} \geq 0 \quad \forall r, s \in P \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} m_{max} - j + 1 \quad Y_{sj} - Y_{rj} \geq 0 \quad \forall r, s \in P \quad (12)$$

$$X_{ij}, Y_{ij}, Z_j \in 0,1 \quad \forall i, j \quad (13)$$

El objetivo de este modelo es minimizar la cantidad de estaciones, tomando como base las estaciones mínimas ya requeridas. La restricción (8) permite que cada tarea sea asignada a una sola estación de trabajo, y sea en la red original o fantasma. La restricción (9) y (10) asegura que la suma de las tareas asignadas en la estación de trabajo no exceda el tiempo de ciclo. Finalmente la restricción (11) y (12) relaciona la precedencia que existe en la red original y la red fantasma. Las variables binarias son definidas en la restricción (13).

4. Balanceo de línea en U considerando riesgos ergonómicos

La consideración de riesgos ergonómicos dentro del balanceo de una línea de ensamble en U, permite la reducción de riesgos musculo esqueléticos de los trabajadores inmersos dentro del procesos productivo, y al tiempo se mejora el rendimiento y la productividad del sistema en función de las estaciones de trabajo y el tiempo de ciclo de la línea de ensamble (Xu et al., 2012).

Nos permitiremos demostrar algunos esquemas en el desarrollo de un balanceo de línea en U de la Figura 1.c con la información de la Tabla 1 y los diversos indicadores de riesgos ergonómicos. De acuerdo con los resultados (Tabla 5) la primera alternativa tiene dos estaciones de trabajo con riesgo ligero, y dos estaciones con riesgo muy ligero de acuerdo con el índice OCRA Check List. Por otra parte la segunda alternativa de balanceo tiene tres estaciones con riesgo ligero, y una estación con riesgo muy ligero con base en el índice OCRA Check List. Estos resultados muestran que las diferentes configuración que se establezcan dentro del balance de línea en U, afecta significativamente el nivel de riesgo que perciben los trabajadores dentro de la línea de ensamble, así como sucede con otras métodos de valoración ergonómica como el método NIOSH.

Tabla 5. Alternativas de balanceo de línea en U, Ejemplo (Figura 1 y Tabla 1)

Estación de Trabajo	Tareas	Acciones por Minuto	FF	OCRA Check List	NIOSH
Primer Balance					
Estación 1	1,2,12	51	5.9	10,9	0,3
Estación 2	3,10,11	45	4.6	9,6	0,33
Estación 3	4,5,9	57	7.2	12,2	0,34
Estación 4	6,7,8	59	7.6	12,6	1,23
Segundo Balance					
Estación 1	1,11,12	38	3,1	8,1	0,21
Estación 2	2,3,10	58	7,4	12,4	0,39
Estación 3	4,5,6	64	8,7	13,7	0,77
Estación 4	7,8,9	52	6,1	11,1	1,16

4.1. Ergo-UALBP

Aplicando el modelo UALBP se sugiere una forma de incorporar los riesgos ergonómicos. El resultado del modelo es abreviado por Ergo-UALBP.

El modelo que tome en consideración el nivel de riesgos valorados por medio de los distintos métodos ergonómicos, se da por la inclusión de una restricción ergonómica. En este sentido, completamos las restricciones (8) a (13) de UALBP-1 con la restricción (14), donde F es una función de estimación de riesgo ergonómico con las propiedades en la sección 2.3 y Erg es un coeficiente que establece el nivel máximo aceptable de riesgos ergonómicos. El resultado del modelo es llamado **Ergo-UALBP-C**

$$F S_j \leq Erg \quad \forall j \in j=1, \dots, m \quad (14)$$

Finalmente el modelo posee $(2n + 1)m_{\max} - m_{\min}$ variables, y $n + m_{\max} + 2 |P| + J$ restricciones.

5. Validación de Balanceo de Línea en U Considerando Riesgos Ergonómicos (Ergo-UALBP-C)

Aplicando el modelo de balanceo de línea en U con el ejemplo base, la información de Tabla 1, y considerando la incorporación de riesgos ergonómicos a través del uso del indicador Check List OCRA, donde se establecen 2 estaciones de trabajo mínimo y 5 estaciones de trabajo como límite máximo de puesto de trabajo. De esta manera se plantea el modelo matemático, adicionado la siguiente restricción como referente de nivel de riesgo ergonómico por actividades repetitivas.

$$\left(\left(\left(\left(\left(\sum_{i=1}^n X_{ij} + Y_{ij} \right) * A_i \right) * 0.214 - 5.0389 \right) + FFuerza + FPost \right) * FD \right) \leq Erg \Rightarrow \forall j \quad (15)$$

Donde: A_i = corresponde al número de acciones de por tarea i . De esta manera calculamos el factor de Frecuencia (FF) de acuerdo con los estándares establecidos por la metodología Check List OCRA, el cual se adiciona el Factor de Fuerza ($FFuerza$) y Factor Postura ($FPost$). Además es necesario un Factor de Frecuencia (FD) que para el caso del modelo base será de 1 que corresponde al desarrollo de las actividades en un periodo de 7 a 8 horas laborales. Se ha tomado

como nivel aceptable el valor de 9.5, lo que significa para la metodología OCRA un nivel muy ligero.

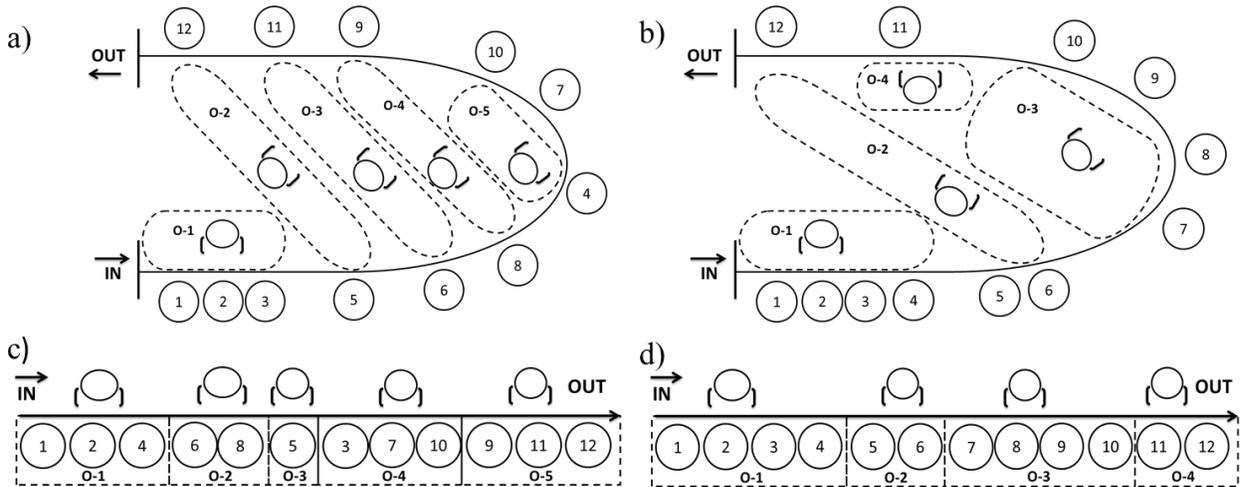
El problema es resuelto utilizando ILOG CPLEX 12.0 en un computador persona Intel Core I5 de 2.40 GHz con 4 Megas de Memoria. El modelo matemático planteado posee 52 restricciones y 123 variables binarias. Los resultados de la implementación del modelo se evidencian en la Tabla 6 y Figura 4. Dentro de los resultados, se establecen comparaciones entre modelo de línea en U que toma en consideración los riesgos ergonómicos (Ergo-UALBP-C) y un problema normal en U (UALBP), además de cotejarlo con el modelo tradicional de línea de ensamble (SALBP) y una línea de ensamble en línea con riesgos ergonómicos (Ergo- SALBP-C) como lo planteo Otto et al. (2011).

Las respuestas arrojadas por el modelos Ergo-UALBP-C, arroja un total de 5 estaciones de trabajo, sobre las cuales se balancea los riesgos ergonómicos dentro de las estaciones de trabajo. Los resultados muestran que el nivel de riesgos ergonómicos (Tabla 6), son todos “Muy Ligero”, con un valor máximo de 9.4. La media de 9.03 y desviación estándar de 0,44 ponen en evidencia como los riesgos se balancea y distribuyen de una manera muy equitativa entre las estaciones de trabajo. Mientras en un esquema UALBP (Figura 4.b) el nivel de riesgo se distribuyen con diferentes niveles de riesgo que van desde un nivel optimo a un nivel medio, con un valor máximo de 16, para 4 estaciones de trabajo. En un escenario Ergo- SALBP-C, el modelo necesito extender el nivel de riesgo ergonómico a 10.4, y de esta manera hallar un respuestas optima. El modelo permite que el nivel de riesgo se encuentre entre aceptable y muy ligero. En un contexto SALBP se minimiza las estaciones en 4, pero los riesgos van desde un nivel aceptable a un nivel medio, con un valor máximo de riesgo de 16.

Tabla 6. Resultados de Balanceo de Línea: Ergo-UALBP-c, Ergo-SALBP-c, UALBP y SALBP.

Estación de Trabajo	Ergo-UALBP-C				Ergo-SALBP-C			
	Tareas	Acciones por Minuto	OCRA Check List	Nivel	Tareas	Acciones por Minuto	OCRA Check List	Nivel
Estación 1	1,2,3	44	9,4	Muy Ligero	1,2,4	45	9,6	Muy Ligero
Estación 2	5,12	43	9,2	Muy Ligero	6,8	49	10,4	Muy Ligero
Estación 3	4,7,10	44	9,4	Muy Ligero	5	26	5,5	Aceptable
Estación 4	6,11	39	8,3	Muy Ligero	3,7,10	43	9,2	Muy Ligero
Estación 5	8,9	42	8,9	Muy Ligero	9,11,12	49	10,4	Muy Ligero
	<i>M 9,03 DE 0,44</i>				<i>M 9,03 DE 2,04</i>			
Estación de Trabajo	UALBP				SALBP			
	Tareas	Acciones por Minuto	OCRA Check List	Nivel	Tareas	Acciones por Minuto	OCRA Check List	Nivel
Estación 1	1,2,3,4	55	11,7	Ligero	1,2,3,4	55	11,7	Ligero
Estación 2	5,6,12	70	14,9	Medio	5,6	53	11,3	Ligero
Estación 3	7,8,9,10	75	16,0	Medio	7,8,9,10	75	16,0	Medio
Estación 4	11	12	5	Optimo	11,12	29	6,2	Aceptable
	<i>M 11,9 DE 4,95</i>				<i>M 11,3 DE 4,03</i>			

Figura 4. Esquema de Balanceo de Línea. a) Ergo-UALBP-c; b) UALBP; c) Ergo-SALBP, d) SALBP.



Un esquema de balance de línea en U que toma en consideración los riesgos ergonómicos, aunque no minimiza el número de estaciones de trabajo, es muy bueno en la optimización del bienestar de los trabajadores, debido a que permite balancear el nivel de riesgo ergonómico y reducirlo considerablemente, permitiendo combinaciones de operaciones dentro de la secuencia de ensamble, lo cual no sucede en un modelo de línea de ensamble tradicional. En contraste escenarios de líneas de ensamble tradicionales y en líneas en U, aunque disminuyen el número de estaciones, no balancean la carga de trabajo, la cual pone en riesgo a los trabajadores encargados de las operaciones.

6. Conclusiones

La aplicación del balanceo de línea en U, requiere tomar en consideración todos aquellos factores y aspectos ergonómicos propensos de generar trastornos musculo esquelético en los trabajadores inmersos dentro de la línea de ensamble, debido a que la efectividad de un balanceo está altamente relacionada con la manera como se diseña, y lo importante es no caer en metodologías experimentales y empíricas. Por tal motivo, la toma de decisiones se deberá soportar por medio de criterios cuantitativos apoyados de técnicas de valoración ergonómicas, que cuantifique el nivel de riesgo al cual se encuentra expuesto los trabajadores, a fin de realizar un análisis objetivos que permita mejorar condiciones en las estaciones de trabajo. Considerar el nivel de riesgos ergonómicos por actividades repetitivas toma una alta relevancia dentro de las líneas de ensamble, debido a que las operaciones cuentan con recursos limitados (tiempo, estaciones) para el desarrollo de productos o bienes. La restricción ergonómica podrá ser implementada en sistemas de ensamble en U que requieran mejorar el tiempo de ciclo, la cantidad de estaciones o su eficiencia.

Por otra parte, La inclusión de una restricción ergonómica (Ecuación 14) tiene sus limitaciones, debido a que una respuesta óptima siempre requerirá el máximo de estaciones de trabajo, como se dio en el problema planteado (sección 5), debido a que el modelo siempre buscara distribuir y dar balance a los niveles de riesgos en todas las estaciones de trabajo posible, lo cual es inviable en un sistema productivo donde existen limitantes por costos o distribución de espacios. Otros limitantes se presentan cuando no existe la posibilidad de alternar las tareas entre estaciones por

la existencia de niveles de riesgos críticos que hacen inviable la implementación de este tipo de medidas, dada a la dificultad de combinar con otro conjunto de tareas. En estos casos es aconsejable introducir el concepto de rotación laboral como una medida que permita disminuir los periodos de exposición en riesgos que son difíciles de mitigar o combinar con otro conjunto de operaciones.

Además se podrán establecer diferentes estrategias que permitan considerar la inclusión de riesgos ergonómicos dentro de un modelo de balanceo de línea, como lo puede ser incluyendo este tipo de restricciones en la función objetivo, con las variaciones necesarias del caso (disminuir el nivel de riesgo promedio, distribuir la carga o riesgo, minimizar las estaciones afectadas con niveles altos de riesgo). De acuerdo como lo señalado por J. Miltenburg et al. (1994), un problema simple de líneas de ensamble no son muy amplios, y podrían estar compuestos de al menos 30 tareas y 10 estaciones de trabajo, lo cual requiere métodos eficientes y rápidos para hallar respuestas adecuadas muy cercanas al óptimo, es por tal motivo que se recomienda el uso de técnicas heurísticas o metaheurísticas de la misma manera como han sido aplicadas en la solución de problemas tradicionales de balanceo de línea.

7. Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado gracias a la ayuda DPI2010-18243 del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España dentro del programa de Proyectos de Investigación Fundamental no orientada, con el título "COORDINACION DE OPERACIONES EN REDES DE SUMINISTRO/DEMANDA AJUSTADAS, RESILIENTES A LA INCERTIDUMBRE: MODELOS Y ALGORITMOS PARA LA GESTION DE LA INCERTIDUMBRE Y LA COMPLEJIDAD". Agradecemos a IBM, por proveernos la herramienta ILOG IBM CPLEX Optimization Studio, Versión: 12.2 bajo el Academic Partner Program.

8. Referencias

Aase, G. R., Olson, J. R., & Schniederjans, M. J. (2004). U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research*, 156(3), 698-711.

Bureau_of_Labor_Statistics. (2011, November 9). Nonfatal occupational injuries and illnesses requiring days away from work, 2010. . *Bureau of Labor Statistics*.

Carnahan, B. J., Norman, B. A., & Redfern, M. S. (2001). Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions*, 33(10), 875-887.

Colombini, D., Occhipinti, E., & Grieco, A. (2002). 12. A check-list model for the quick evaluation of risk exposure (ocra index). In E. O. Daniela Colombini & G. Antonio (Eds.), *Elsevier Ergonomics Book Series* (Vol. Volume 2, pp. 111-117): Elsevier.

Coronado-Hernández, J. R., & Ortiz Vargas, D. A. (2009). Revisión de modelos y métodos para la formación de líneas de ensamble en "U". *Congreso Ingeniería de Producción 30 Años. Universidad Eafit, ISBN 978-958-44-5564-2*.

Costa, A. M., & Miralles, C. (2009). Job rotation in assembly lines employing disabled workers. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 625-632.

- David, G. C. (2005). Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. [Review]. *Occup Med (Lond)*, 55(3), 190-199.
- Dempsey, P. G., McGorry, R. W., & Maynard, W. S. (2005). A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists. *Applied Ergonomics*, 36(4), 489-503.
- FASECOLDA. (2000-2011, June, 2012). Indicadores técnicos Retrieved June, 2012, from http://www.fasecolda.com/fasecolda/BancoConocimiento/R/riesgos_profesionales_-_estadisticas_del_ramofinal_-_indicadores_tecnicos/riesgos_profesionales_-_estadisticas_del_ramofinal_-_indicadores_tecnicos.asp
- Hwang, R. K., Katayama, H., & Gen, M. (2008). U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 46(16), 4637-4649.
- ISO_1228-3. (2007). Ergonomics ,Manual handling. *Part 3: Handling of low loads at high frequency*.
- Jackson, J. R. (1956). A Computing Procedure for a Line Balancing Problem. *Management Science*, 2(3), 261-271.
- Karhu, O., Kansil, P., & Kuorinka, L. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8, 199-201.
- Kriengkorakot, N., & Pianthong, N. (2007). The U-line Assembly Line Balancing Problem. *KKU Engineering Journal*, 34(3), 267 - 274.
- McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Appl Ergon*, 24(2), 91-99.
- Miltenburg, & Wijngaard. (1994). The U-Line balancing problem. *Management Science*, 40, 1378-1388.
- Miltenburg, J. (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*, 109(1), 1-23.
- Miltenburg, J. (2001). U-shaped production lines A review of theory and practice. *Int. J. Production Economics*, 70, 201-214.
- Miltenburg, J., & Wijngaard, J. (1994). The U-line Line Balancing Problem. *Management Science*, 40(10), 1378-1388.
- Miralles, C., García-Sabater, J. P., Andrés, C., & Cardós, M. (2008). Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centers for disabled. *Discrete Applied Mathematics*, 156, 352-367.
- Monden, Y. (1993). "Toyota Production Systems", . Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers, Norcross, GA.
- Moore, J. S., & Garg, A. (1995). The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56, 443-458.

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

Rajabalipour Cheshmehgaz, H., Haron, H., Kazemipour, F., & Desa, M. I. (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 63(2), 503-512.

Scholl, A., & Klein, R. (1999). ULINO. Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37(4), 721-736.

Snook, S. H., & Ciriello, V. M. (1991). The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. *Ergonomics*, 34(9), 1197-1213.

Urban, T. L. (1998). Note. Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines. *Management Science*, 44(5), 738-741.

Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749-776.

Xu, Z., Ko, J., Cochran, D. J., & Jung, M.-C. (2012). Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 431-441.