COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE BALANCEO DE LÍNEA DE ENSAMBLE PARA UNA CAJA DE CAMBIOS

Luis Ángel Tinoco López[1], Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón [2],
Dr. Alejandro Alvarado Iniesta[3] y Dr. Manuel Iván Rodríguez Borbón [4]

***Resumen*— Las líneas de ensamble son un aspecto relevante de los sistemas de producción ya que permiten la unión de varios puntos en uno mismo donde todas las partes producidas se integran para formar una unidad de producto terminado. El problema de balanceo de líneas de ensamble ha sido estudiado desde diferentes enfoques, tratando de dar solución mediante la aplicación de algunos métodos heurísticos que dan una solución aproximada al problema, y algunos métodos exactos que dan como resultado una solución óptima al problema de balanceo. En la presente investigación se realiza una comparación de métodos de balanceo heurísticos, tales como el método del candidato más corto, candidato más largo, Kilbridge-Wester y Helgeson-Birnie con un método de balanceo exacto basado en programación entera binaria. Los métodos se aplican a un caso de estudio de una caja de cambios y se comparan los resultados mediante índices de balanceo y suavización.**
***Palabras clave*—balanceo, estaciones, precedencias, programación entera binaria, tiempo de ciclo.**

Introducción

El balanceo de línea es una de las herramientas más importantes para el control de la producción, dado que de una línea de fabricación equilibrada depende la optimización de ciertas variables que afectan la productividad de un proceso.

El problema de las líneas de ensamble es uno de los más comunes en las fábricas y empresas industriales, en términos generales trata de optimizar los recursos de la línea de ensamble, minimizando estaciones de trabajo, es decir, el problema de balanceo de línea de ensamble trata de asignar las tareas en una secuencia ordenada de las estaciones, respetando las relaciones de precedencia y optimizando una función objetivo. Los problemas tipo SALBP (problemas simples de balanceo de líneas): los cuales consiste en asignar un conjunto de tareas a las estaciones de tal forma que se minimice el número de estaciones, dado un tiempo de ciclo (Kumar, 2013; Escobar, Garcés, Correa; 2012).

El problema de balanceo de líneas de ensamble ha sido estudiado por diferentes investigadores desde diferentes enfoques, tratando de dar solución a este problema mediante la aplicación de algunos métodos heurísticos como lo es el método del candidato más corto el cual cuya principal característica es asignar la actividad que tienen el menor tiempo de ciclo sin restricción de precedencia instantánea a una estación (Escobar, Garcés, Correa; 2012).

El método del candidato más largo el cual tiene como objetivo principal aplicar el balanceo de línea, la cual es distribuir la carga de trabajo total en la línea de montaje, lo más uniforme posible, a pesar de la realidad en la que es imposible obtener un equilibrio de línea perfecto entre los trabajadores. El método de Kilbridg Wester el cual selecciona elementos de trabajo para la asignación de estaciones de acuerdo con sus posiciones en el diagrama de precedencia. El método de Helgeson Bernie el cual consiste en estimar el peso posicional de cada tarea como la suma de su tiempo más los de aquellas que la siguen. Las tareas se asignan a las estaciones de acuerdo con el peso posicional, cuidando no rebasar el tiempo de ciclo y violar las precedencias. Y los métodos exactos en cual encontramos la programación entera binaria la cual es un método perteneciente a la programación lineal, por lo que su base es un algoritmo matemático que tiene como finalidad resolver un problema indeterminado formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando así una función objetivo también lineal que generalmente se refiere a costo o a tiempo (Ali Hamza, Al-Manaa; 2013).

[1] Luis Ángel Tinoco López es estudiante de Ingeniería Industrial y de sistemas en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. al125593@alumnos.uacj.mx **(autor corresponsal)**
[2] El Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón es Profesor e Investigador en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México luis.picon@uacj.mx
[3] El Dr. Alejandro Alvarado Iniesta es Profesor e Investigador en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México Alejandro.alvarado@uacj.mx
[4] El Dr. Manuel Iván Rodríguez Borbón es Profesor e Investigador en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México ivan.rodriguez@uacj.mx

Descripción del Método

En esta sección se describe el método utilizado para la comparación de un caso de estudio de un balanceo de línea simple para una caja de cambios en el cual se busca minimizar el número de estaciones aplicando el método exacto donde se aplica la programación entera binaria. A continuación, se describen cada uno de los pasos para el desarrollo del problema sobre la caja de cambios.

Observación y análisis del caso de estudio.

Paso 1. Se analizó el caso de estudio donde se pudo observar la aplicación de varios métodos heurísticos para lograr minimizar el número de estaciones para el balanceo de una caja de cambios, utilizando un tiempo de ciclo de 66 segundos.

Elaboración de métodos heurísticos.

Paso 2. Se procedió a realizar de nuevo la aplicación de los métodos heurísticos siguientes: el método del candidato más corto, el método del candidato más largo, el método de Kilbridge Wester y el método de Helgeson Bernie.

Análisis de los resultados

Paso 3. Se comparan los resultados de los métodos heurísticos en base a los índices de eficiencia y índices de balanceo los cuales se calculan con las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} ti}{N\,(PCT)} \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{n} (TC - PCT) \tag{2}$$

Metodología de solución para un caso de estudio aplicado para el balanceo de línea simple.

Paso 4. Se procede a aplicar la programación entera binaria al caso de estudio para demostrar si lo obtenido con los métodos heurísticos es realmente la mejor opción de balanceo para la asignación de estaciones para la elaboración de una caja de cambios en dos etapas.

análisis de los resultados finales.

Paso 5. Se analizan los resultados obtenidos al haber aplicado la programación entera binaria al caso de estudio y se llega a un resultado.

Caso de estudio

Observación y análisis del caso de estudio

En la figura 1 se muestran los componentes de la caja de cambios, sobre la cual se aplicarán los diferentes métodos de balanceo. En la tabla 1 se muestra los elementos de trabajo asignados, el tiempo de duración de cada elemento tanto en segundos como en minutos y que elemento le precede a cada elemento esto es basado en la figura 2 donde se muestra el diagrama de precedencias propuesto para la elaboración de la caja de cambios (Ali Hamza, Al-Manaa; 2013).

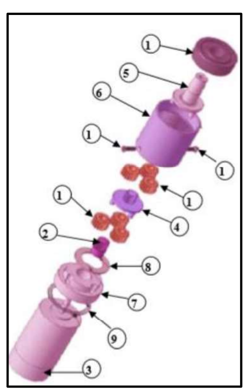

Figura 1. Caja de cambios

Elementos	Descripción de los elementos de trabajo	Tiempo en segundos	Tiempo en minutos	precedencia
1	Carga 6	2	0.0333	-
2	Grasa dentro de 6	45	0.75	1
3	11 En 6	10	0.167	2
4	5 dentro de 11 y grasa	8	0.1333	3
5	1a dentro de 5 y grasa	27	0.45	4
6	4 dentro de 1a y grasa	7	0.1167	5
7	1b dentro de 4 y grasa	25	0.4167	6
8	2 dentro de 1b y grasa	7	0.1167	7
9	3 dentro de 3 y grasa	5	0.0833	-
10	7 Sobre 3 y atornillado	41	0.6833	9
11	8 Sobre 7	5	0.0833	10
12	1-8 Con 3-11	10	0.167	8,11
13	Atornillar y ajustar	50	0.833	12
14	Limpiar la grasa	10	0.167	13
15	Descarga	3	0.05	14

Tabla 1. Elementos de trabajo asignados a las estaciones.

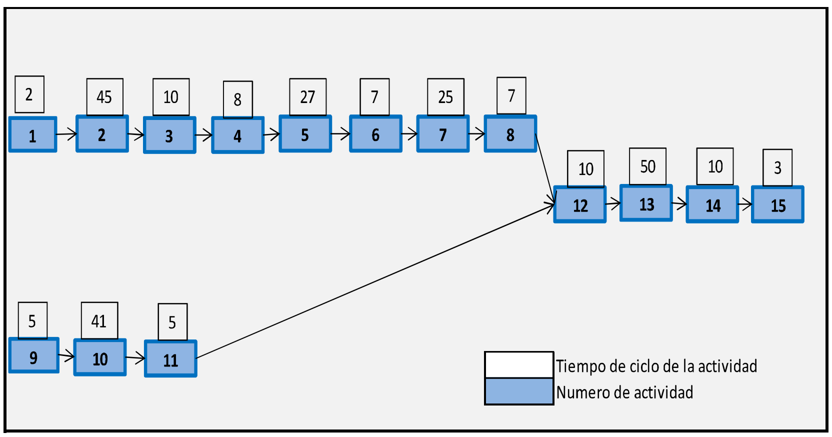

Figura 2. Diagrama de precedencia propuesto.

Elaboración de métodos heurísticos.

Se resolverá el problema de la caja de cambio con cuatro métodos heurísticos distintos, los cuales son: método del candidato más corto, el candidato más largo, el método de Kilbridg Wester y el método de Helgeson Bernie.

Empezando por el método del candidato más corto en el cual se puede observar en la tabla 2 los resultados obtenidos de dicho método donde se manejó el mismo tiempo de ciclo de 66 segundos y el mismo diagrama de precedencia propuesto, después seguimos con el método del candidato más largo el cual se muestra en la tabla 3, después en la tabla 4 se muestran los resultados del método de Kilbridg Wester y por último en la tabla 5 se muestran los resultados del método de Helgeson Bernie en el caso de estudio esto con el fin de compararlos para ver si los resultados son correctos, solo para comprobar que realmente el resultado

Estación	Actividad	TC	Total
1	1,9,10,11	2+5+41+5	53
2	2,3,4	45+10+8	63
3	5,6,7,8	27+7+25+7	66
4	12,13	50+10	60
5	14,15	10+3	13
			255

Tabla 2. Resultados del método del candidato más corto.

ISSN 1946-5351
Vol. 10, No. 4, 2018

Estación	Actividad	TC	Total
1	1,2,3,4	2+45+10+8	65
2	5,6,7,9	27+7+25+5	64
3	8,10,11,12	7+41+5+12	63
4	13,14,15	50+10+3	63
			255

Tabla 3. Resultados del método del candidato más largo.

Estación	Actividad	TC	Total
1	1,9,2,	2+5+45	52
2	10,3,11,4	41+10+5+8	64
3	5,6,7,8	27+7+25+7	66
4	12,13	10+50	60
5	14,15	10+3	13
			255

Tabla 4. Resultados del método de Kilbridg Wester.

Estación	Actividad	TC	Total
1	1,2,3,4	2+45+10+8	65
2	5,6,7,9	27+7+25+5	64
3	8,10,11,12	7+41+5+12	63
4	13,14,15	50+10+3	63
			255

Tabla 5. Resultados del método de Helgeson Bernie.

Análisis de los resultados.

Una vez después de haber resuelto el caso de estudio con los distintos métodos heurísticos se analizaron los resultados y se obtuvo que realmente el método del candidato más largo es el mejor para lograr minimizar de manera óptima el número de estaciones esto es en base a lo obtenido al calcular los índices de eficiencia como el índice de balanceo los cuales se muestran en la tabla 6.

Métodos heurísticos	Índice de eficiencia	Índice de balanceo
Candidato más corto	.772seg	3023
Candidato más largo	.966seg	23
Kilbridg Wester|	.772seg	3045
Helgeson Bernie	.966seg	23

Tabla 6. Resultados de índices para cada método.

Metodología de solución para un caso de estudio aplicado para el balanceo de línea simple.

Como primer paso a continuación se presenta la formulación del modelo.

$x_{i,j} = 1\ ;\ si\ la\ actividad\ i\ se\ asigna\ a\ la\ estacion\ j$
$x_{i,j} = 0;\ si\ la\ actividd\ i\ no\ se\ asigna\ a\ la\ estacion\ j$

Variables de decisión.

Tomando en cuenta que el número de estaciones que se obtuvo con el método del candidato más largo es de 4 y considerando que el número de actividades es de 15, se tienen 60 variables de decisión. Considerando la notación x_{ij} se tomo en cuenta $x_{ij} = x_k$ de la siguiente manera:

$\{x_{11} = x_1,\ x_{12} = x_2,\ x_{13} = x_3, x_{14} = x_4\}, \{x_{21} = x_5, x_{22} = x_6, x_{23} = x_7, x_{24} = x_8\}, \{x_{31} = x_9, x_{32} = x_{10}, x_{33} = x_{11}, x_{34} = x_{12}\}, \{x_{41} = x_{13}, x_{42} = x_{14}, x_{43} = x_{15}, x_{44} = x_{16}\}, \{x_{51} = x_{17}, x_{52} = x_{18}, x_{53} = x_{19}, x_{54} = x_{20}\}, \{x_{61} = x_{21}, x_{62} = x_{22}, x_{63} = x_{23}, x_{64} = x_{24}\}, \{x_{71} = x_{25}, x_{72} = x_{26}, x_{73} = x_{27}, x_{74} = x_{28}\},$

ISSN 1946-5351
Vol. 10, No. 4, 2018

$\{x_{81}=x_{29}, x_{82}=x_{30}, x_{83}=x_{31}, x_{84}=x_{32}\}, \{x_{91}=x_{33}, x_{92}=x_{34}, x_{93}=x_{35}, x_{94}=x_{36}\}, \{x_{10,1}=x_{37}, x_{10,2}=x_{38}, x_{10,3}=x_{39}, x_{10,4}=x_{40}\}, \{x_{11,1}=x_{41}, x_{11,2}=x_{42}, x_{11,3}=x_{43}, x_{11,4}=x_{44}\}, \{x_{12,1}=x_{45}, x_{12,2}=x_{46}, x_{12,3}=x_{47}, x_{12,4}=x_{48}\}, \{x_{13,1}=x_{49}, x_{13,2}=x_{50}, x_{13,3}=x_{51}, x_{13,4}=x_{52}\}, \{x_{14,1}=x_{53}, x_{14,2}=x_{54}, x_{14,3}=x_{55}, x_{14,4}=x_{56}\}, \{x_{15,1}=x_{57}, x_{15,2}=x_{58}, x_{15,3}=x_{59}, x_{15,4}=x_{60}\}$.

Tomando en cuenta las variables de decisión anteriores se plantea la siguiente función objetivo donde se agregan pesos ponderados de 1, 2, 3 y 4 a cada estación respectivamente, esto con el fin de que la actividad inmediata tenga prioridad sobre las demás actividades para asignarse la estación más próxima.

$\min: z =$

$x_1+2x_2+3x_3+4x_4+x_5+2x_6+3x_7+4x_8+x_9+2x_{10}+3x_{11}+4x_{12}+x_{13}+2x_{14}+3x_{15}+4x_{16}+x_{17}+2x_{18}+3x_{19}+4x_{20}+x_{21}+2x_{22}+3x_{23}+4x_{24}+x_{25}+2x_{26}+3x_{27}+4x_{28}+x_{29}+2x_{30}+3x_{31}+4x_{32}+x_{33}+2x_{34}+3x_{35}+4x_{36}+x_{37}+2x_{38}+3x_{39}+4x_{40}+x_{41}+2x_{42}+3x_{43}+4x_{44}+x_{45}+2x_{46}+3x_{47}+4x_{48}+x_{49}+2x_{50}+3x_{51}+4x_{52}+x_{53}+2x_{54}+3x_{55}+4x_{56}+x_{57}+2x_{58}+3x_{59}+4x_{60}$.

A continuación, se consideran tres tipos de restricciones.

Restricciones de asignación. Las cuales aseguran que las actividades solo se asignen una vez a las estaciones.

(1) $x_1+x_2+x_3+x_4=1$ (2) $x_5+x_6+x_7+x_8=1$ (3) $x_9+x_{10}+x_{11}+x_{12}=1$
(4) $x_{13}+x_{14}+x_{15}+x_{16}=1$ (5) $x_{17}+x_{18}+x_{19}+x_{20}=1$ (6) $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}=1$
(7) $x_{25}+x_{26}+x_{27}+x_{28}=1$ (8) $x_{29}+x_{30}+x_{31}+x_{32}=1$ (9) $x_{33}+x_{34}+x_{35}+x_{36}=1$
(10) $x_{37}+x_{38}+x_{39}+x_{40}=1$ (11) $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}=1$ (12) $x_{45}+x_{46}+x_{47}+x_{48}=1$
(13) $x_{49}+x_{50}+x_{51}+x_{52}=1$ (14) $x_{53}+x_{54}+x_{55}+x_{56}=1$ (15) $x_{57}+x_{58}+x_{59}+x_{60}=1$

Restricciones de tiempo de ciclo. Las cuales aseguran que la suma de los tiempos de las actividades asignadas no sobrepase el tiempo de ciclo.

(16) $2x_1+45x_5+10x_9+8x_{13}+27x_{17}+7x_{21}+25x_{25}+7x_{29}+5x_{33}+41x_{37}+5x_{41}+10x_{45}+50x_{49}+10x_{53}+3x_{57}\leq$ **66seg**

(17) $2x_2+45x_6+10x_{10}+8x_{14}+27x_{18}+7x_{22}+25x_{26}+7x_{30}+5x_{34}+41x_{38}+5x_{42}+10x_{46}+50x_{50}+10x_{54}+3x_{58}\leq$ **66seg**

(18) $2x_3+45x_7+10x_{11}+8x_{15}+27x_{19}+7x_{23}+25x_{27}+7x_{31}+5x_{35}+41x_{39}+5x_{43}+10x_{47}+50x_{51}+10x_{55}+3x_{59}\leq$ **66seg**

(19) $2x_4+45x_8+10x_{12}+8x_{16}+27x_{20}+7x_{24}+25x_{28}+7x_{32}+5x_{36}+41x_{40}+5x_{44}+10x_{48}+50x_{52}+10x_{56}+3x_{60}\leq$ **66seg**

Restricciones de precedencia. Las cuales aseguran que se respeten las precedencias que se muestran en la figura 2.

(20) $x_1\leq x_5+x_6+x_7+x_8$ (24) $x_5\leq x_9+x_{10}+x_{11}+x_{12}$ (28) $x_9\leq x_{13}+x_{14}+x_{15}+x_{16}$ (32) $x_{13}\leq x_{17}+x_{18}+x_{19}+x_{20}$
(21) $x_2\leq x_6+x_7+x_8$ (25) $x_6\leq x_{10}+x_{11}+x_{12}$ (29) $x_{10}\leq x_{14}+x_{15}+x_{16}$ (33) $x_{14}\leq x_{18}+x_{19}+x_{20}$
(22) $x_3\leq x_7+x_8$ (26) $x_7\leq x_{11}+x_{12}$ (30) $x_{11}\leq x_{15}+x_{16}$ (34) $x_{15}\leq x_{19}+x_{20}$
(23) $x_4\leq x_8$ (27) $x_8\leq x_{12}$ (31) $x_{12}\leq x_{16}$ (35) $x_{16}\leq x_{20}$

(36) $x_{17}\leq x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}$ (40) $x_{21}\leq x_{25}+x_{26}+x_{27}+x_{28}$ (44) $x_{25}\leq x_{29}+x_{30}+x_{31}+x_{32}$ (48) $x_{33}\leq x_{37}+x_{38}+x_{39}+x_{40}$
(37) $x_{18}\leq x_{22}+x_{23}+x_{24}$ (41) $x_{22}\leq x_{26}+x_{27}+x_{28}$ (45) $x_{26}\leq x_{30}+x_{31}+x_{32}$ (49) $x_{34}\leq x_{38}+x_{39}+x_{40}$
(38) $x_{19}\leq x_{23}+x_{24}$ (42) $x_{23}\leq x_{27}+x_{28}$ (46) $x_{27}\leq x_{31}+x_{32}$ (50) $x_{35}\leq x_{39}+x_{40}$
(39) $x_{20}\leq x_{24}$ (43) $x_{24}\leq x_{28}$ (47) $x_{28}\leq x_{32}$ (51) $x_{36}\leq x_{40}$

(52) $x_{37}\leq x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}$ (56) $x_{29}\leq x_{45}+x_{46}+x_{47}+x_{48}$ (60) $x_{41}\leq x_{45}+x_{46}+x_{47}+x_{48}$ (64) $x_{45}\leq x_{49}+x_{50}+x_{51}+x_{52}$
(53) $x_{38}\leq x_{42}+x_{43}+x_{44}$ (57) $x_{30}\leq x_{46}+x_{47}+x_{48}$ (61) $x_{42}\leq x_{46}+x_{47}+x_{48}$ (65) $x_{46}\leq x_{50}+x_{51}+x_{52}$
(54) $x_{39}\leq x_{43}+x_{44}$ (58) $x_{31}\leq x_{47}+x_{48}$ (62) $x_{43}\leq x_{47}+x_{48}$ (66) $x_{47}\leq x_{51}+x_{52}$
(55) $x_{40}\leq x_{44}$ (59) $x_{32}\leq x_{48}$ (63) $x_{44}\leq x_{48}$ (67) $x_{48}\leq x_{52}$

(68) $x_{49}\leq x_{53}+x_{54}+x_{55}+x_{56}$ (72) $x_{53}\leq x_{57}+x_{58}+x_{59}+x_{60}$
(69) $x_{50}\leq x_{54}+x_{55}+x_{56}$ (73) $x_{54}\leq x_{58}+x_{59}+x_{60}$
(70) $x_{51}\leq x_{55}+x_{56}$ (74) $x_{55}\leq x_{59}+x_{60}$
(71) $x_{52}\leq x_{56}$ (75) $x_{56}\leq x_{60}$

(76) $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22} x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{26}, x_{27}, x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}, x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}, x_{39}, x_{40}, x_{41}, x_{42}, x_{43}, x_{44}, x_{45}, x_{46}, x_{47}, x_{48}, x_{49}, x_{50} x_{51}, x_{52}, x_{53}, x_{54}, x_{55}, x_{56}, x_{57}, x_{58}, x_{59}, x_{60} = binarias(0,1).$

Se utilizó el suplemento de Excel llamado solver para resolver el problema de programación entera binaria descrito anteriormente, el cual nos ayuda en la aplicación de la programación entera binaria para calcular el número óptimo de estaciones para el problema de caso de estudio relacionado con la caja de cambios. El método de solución fue el método simplex y se obtuvieron los siguientes resultados.

$$x_1 = 1, x_5 = 1, x_9 = 1, x_{13} = 1, x_{18} = 1, x_{22} = 1, x_{26} = 1, x_{31} = 1, x_{34} = 1, x_{39} = 1, \quad x_{43} = 1, x_{47} = 1, x_{52} = 1, x_{56} = 1, x_{60} = 1.$$

Lo cual implica asignar la actividad 1 a la estación 1, la actividad 2 a la estación 1, la actividad 3 a la estación 1, la actividad 4 a la estación 1, la actividad 5 a la estación 2, la actividad 6 a la estación 2, la actividad 7 a la estación 2, la actividad 8 a la estación 3, la actividad 9 a la estación 2, la actividad 10 a la estación 3, la actividad 11 a la estación 3, la actividad 12 a la estación 3, la actividad 13 a la estación 4, la actividad 14 a la estación 4 y la actividad 15 a la estación 4. Con este balanceo se obtienen un índice de eficiencia de .966 y un índice de balanceo de 23.

Comentarios Finales

Como se puede observar al aplicar el método exacto nos da como resultado el mismo balanceo que al aplicar el método heurístico del candidato más largo, lo cual implica que se tiene el mismo índice de eficiencia y el mismo índice de balanceo para ambos métodos. Aunque se recomienda iniciar el balanceo utilizando algún método heurístico para después dar solución con un método exacto tal como el propuesto en este artículo, de esta manera será posible reducir el número de variables de decisión y de restricciones, lo cual permitirá tener un modelo menos complejo para su solución. Para el caso de estudio de la caja de cambios se recomiendan tener 4 estaciones con tiempo de ciclo de 65 para la estación 1, de 64 para la estación 2, de 63 para la estación 3 y de 63 para la estación 4

Referencias

Kumar, N., & Mahto, D. (2013). Assembly line balancing: a review of developments and trends in approach to industrial application. *Global Journal of Research In Engineering*.

Hamza, R. M. A., & Al-Manaa, J. Y. (2013). Selection of balancing method for manual assembly line of two stages gearbox. *Global perspectives on engineering management*.

Escobar Alvarán, D. F., Garcés Hincapié, J. A., & Restrepo Correa, J. H. (2012). Aplicación de la programación entera binaria para resolver el problema simple de balanceo de linea de ensamble: un caso de estudio. *Scientia Et Technica*, *17*(50).

Chacón, E. M., & García, R. I. (2015). Heurística para el balance de líneas de ensamble con consideraciones ergonómicas. *Revista Ingeniería Industrial*, *14*(1), 23-35.