

¹Balanceo de línea de desensamble basado en programación entera binaria

Carlos Eduardo Espino Luna, Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón,
Dr. Luis Carlos Méndez González, ²Dr. Roberto Romero López

Resumen—El balanceo de líneas es un aspecto importante para los sistemas productivos, dado que permite eficientar el proceso de asignación de operaciones a estaciones de trabajo considerando cuestiones de tiempos de ciclo, proceso de ensamble y condiciones generales del proceso. En el presente artículo se presenta un caso de estudio relacionado con el balanceo de una línea de desensamble para la recuperación de componentes de un cartucho de impresora para su reutilización y correcto reciclaje. El proceso de balanceo se llevó a cabo considerando los tiempos de ciclo de cada operación de desensamble y el tiempo de ciclo planeado, inicialmente se balanceo con un método heurístico para después aplicar programación entera binaria para lograr un balanceo exacto. El balanceo obtenido presentó buenos índices de eficiencia y balanceo. **Palabras clave**—balanceo, línea de desensamble, programación entera binaria, estaciones, precedencia.

Introducción

Deben de existir condiciones para que la producción en línea sea práctica:

1. Cantidad. El volumen o cantidad de producción debe ser suficiente para cubrir el costo de la preparación de la línea. Esto depende del ritmo de producción y de la duración que tendrá la tarea.
2. Equilibrio. Los tiempos necesarios para cada operación en la línea deben ser aproximadamente iguales.
3. Continuidad. Una vez iniciadas, las líneas de producción deben continuar pues la detención en un punto corta la alimentación del resto de las operaciones. Esto significa que deben tomarse precauciones para asegurar un aprovisionamiento continuo del material, piezas, subensambles, y la previsión de fallas en el equipo.
 - a) Conocidos los tiempos de las operaciones, determinar el número de operadores necesarios para cada operación.
 - b) Conocido el tiempo de ciclo, minimizar el número de estaciones de trabajo.
 - c) Conocido el número de estaciones de trabajo, asignar elementos de trabajo a la misma.

Cada uno de estos problemas puede tener ciertas restricciones o no, de acuerdo con el producto y al proceso.

El balanceo de línea de ensamble es dar a cada operador lo más cercano a una misma cantidad de trabajo. La estación, celda, centro de trabajo o persona que tenga más trabajo que las otras es la estación de carga 100%, es decir, la estación del “cuello de botella” que es la que limita el flujo de producción de toda la planta.

Si reducimos la estación cuello de botella al 5% ahorraremos ese porcentaje en cada estación de la línea. Se puede seguir reduciendo en esta estación hasta que otra estación de la línea se convierta en la estación cuello de botella, la cual asumirá ahora el 100%.

El propósito del balanceo de la línea de ensamble es:

- a) Igualar la carga de trabajo en los centros de trabajo
- b) Identificar la operación cuello de botella
- c) Establecer la velocidad de la línea de ensamble o ritmo de la planta
- d) Determinar el número de estaciones de trabajo

(Grzechca)

Tipos de métodos de balanceo de líneas de ensamble:

- SMALB. Modelo de balanceo de línea de ensamble para líneas de ensamble de un solo producto.
- MuMALBP. Modelo de balanceo de línea de ensamble para líneas de ensamble con más de un solo

¹ Carlos Eduardo Espino Luna es estudiante de últimos semestres en la carrera de ingeniería industrial de la universidad autónoma de Ciudad Juárez al150070@alumnos.uacj.mx

² Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón es profesor investigador del departamento de Ingeniería industrial y manufactura en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez luis.picon@uacj.mx

³ Dr. Luis Carlos Méndez González es profesor investigador del departamento de Ingeniería industrial y manufactura en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez luis.mendez@uacj.mx

⁴ Dr. Roberto Romero López es profesor investigador del departamento de Ingeniería industrial y manufactura en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez romero@uacj.mx

- producto.
- MMALBP. Modelo de balanceo de línea de ensamble para líneas de ensamble con productos mixtos.

Descripción del Método

Este proceso consiste en el desensamble de cartuchos para la recuperación de componentes con el fin de reducir la contaminación que se produce con los mismos al reutilizar la mayor cantidad de componentes y reciclar lo que no se puede reutilizar, debido a esto no hay perdidas ya que debido a que es desensamble todo el material se procesa, debido a esto se consideró el takt time igual al tiempo de ciclo planeado (TCP) siendo este 30 segundos por pieza en cada operación.

La línea de desensamble inicia desde que se recibe el cartucho pasándolo por un proceso de desensamble para recuperar la mayor cantidad de componentes para reutilizarlo y terminar con el reciclaje del plástico y metales que contiene el cartucho como también del tóner que estos contienen. En la tabla 1 se enlistan las operaciones considerando sus tiempos de ciclo en segundos y minutos y las relaciones de precedencia.

Elementos	Descripción de la operación	Tiempo en segundos	Tiempo en minutos	Precedencia
C-1	Se lee el chip y se captura la información.	18.92	0.31533	-
C-2	Se remueve el contacto, tornillos y PCBA	14.51	0.24183	C-1
C-3	Se separa el depósito de tóner, la agarradera y la unidad de impresión	11.53	0.19216	C-2
DT-1	Se remueve el rollo magnético y el rollo de carga y se remueven los tornillos de cuchilla limpiadora.	8.57	0.14283	C-3
DT-2	Remover cuchilla limpiadora y aspirar residuos de tóner	25.51	0.42516	DT-1
DT-3	Retirar sellos del depósito de tóner	10.79	0.17983	DT-2
DTA-1	Retirar etiquetas del depósito de tóner y agarradera	24.86	0.41433	DT-3, T-1
DTA-2	inspección de depósito de tóner y agarradera	16.06	0.26766	DTA-1
DTA-3	Limpieza de depósito de tóner y agarradera	9.53	0.15933	DTA-2
T-1	Llevar agarradera a DTA-1	1.18		C3
CO-1	Remueva tapón de tóner y aspire	13.74	0.229	C-3
CO-2	Remueva resortes, tornillos y cuchilla limpiadora	8.28	0.138	CO-1
CO-3	Remueva engranes y candado del rollo revelador para posteriormente retirarlo	13.06	0.2176	CO-2
CO-4	Aspirar unidad de impresión para retirar tóner restante	17.49	0.2915	CO-3
CO-5	Remover sellos del catcher, inferior y superior de la unidad y el sello j	16.90	0.28166	CO-4
CO-6	Sopleteo de la pieza	20.04	0.334	CO-5
CO-7	Limpieza de pista superior e inferior	19.03	0.31716	CO-6
CO-8	inspección del cartucho	28.20	0.47	CO-7

Tabla 1. Actividades asignadas a la estación.

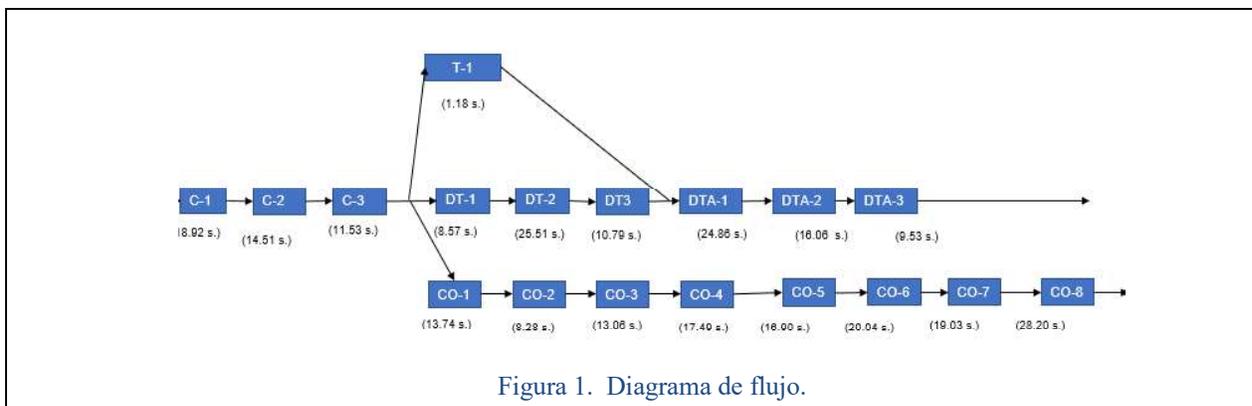


Figura 1. Diagrama de flujo.

Elaboración de métodos heurísticos

Para resolver el problema de la línea de desensamble se utilizarán dos métodos heurísticos, el método del candidato más corto y el candidato más largo.

Para ambos casos se utilizó un tiempo de ciclo de 30 segundos, empezando por el método del candidato más corto representado en la tabla 2, después por el método del candidato más largo representado en la tabla 3.

Estación	Actividad	TC	Total
1	C-1	18.92	18.92
2	C-2, C-3, T-1	14.51+11.53+1.18	27.22
3	DT-1, CO-1	8.57+13.74	22.31
4	CO-2, CO-3	8.28+13.06	21.34
5	CO-4	17.49	17.49
6	CO-5	16.90	16.90
7	CO-6	20.04	20.04
8	CO-7	19.03	19.03
9	DT-2	25.51	25.51
10	DT-3	10.79	10.79
11	DTA-1	24.86	24.86
12	DTA-2, DTA-3	16.06+9.53	25.59
13	CO-8	28.20	20.20

Tabla 2. Resultados del método del candidato más corto.

Estación	Actividad	TC	Total
1	C-1	18.92	18.92
2	C-2, C-3	14.51+11.53	26.04
3	CO-1, DT-1	13.74+8.57	22.31
4	DT-2	25.51	25.51
5	DT-3, CO-2	10.79+8.28	19.07
6	DTA-1	24.86	24.86
7	DTA-2, CO-3	16.06+13.06	29.12
8	CO-4	17.49	17.49
9	CO-5	16.90	16.90
10	CO-6	20.04	20.04
11	CO-7	19.03	19.03
12	CO-8	28.20	28.20
13	DTA-3, T-1	9.53+1.18	10.71

Tabla 3. Resultados del método del candidato más largo.

Análisis de resultados.

$i=1,2,\dots,n$ y j se refiere a la estación $j=1,2,\dots,m$. Por lo que X_{ij} implica que la actividad i se asigna a la estación j . De esta manera las variables de decisión se denotan como:

$$\{X_{11} = X_1, X_{12} = X_2, X_{13} = X_3, X_{14} = X_4, X_{15} = X_5, X_{16} = X_6, X_{17} = X_7, X_{18} = X_8, X_{19} = X_9, X_{110} = X_{10}, X_{111} = X_{11}, X_{112} = X_{12}, X_{113} = X_{13}\}, \{X_{21} = X_{14}, X_{22} = X_{15}, X_{23} = X_{16}, X_{24} = X_{17}, X_{25} = X_{18}, X_{26} = X_{19}, X_{27} = X_{20}, X_{28} = X_{21}, X_{29} = X_{22}, X_{210} = X_{23}, X_{211} = X_{24}, X_{212} = X_{25}, X_{213} = X_{26}\}, \dots, \{X_{181} = X_{222}, X_{182} = X_{223}, X_{183} = X_{224}, X_{184} = X_{225}, X_{185} = X_{226}, X_{186} = X_{227}, X_{187} = X_{228}, X_{188} = X_{229}, X_{189} = X_{230}, X_{1810} = X_{231}, X_{1811} = X_{232}, X_{1812} = X_{233}, X_{1813} = X_{234}\}$$

Función objetivo

Tomando en cuenta la variable de decisión se planteó la siguiente función objetivo, donde se agregaron pesos ponderados del 1 al 13ª cada estación respectivamente, con el fin de que tenga mayor prioridad la actividad inmediata a las demás actividades al momento de ser asignadas en la estación.

$$\min: Z = X_1 + 2X_2 + 3X_3 + 4X_4 + 5X_5 + 6X_6 + 7X_7 + 8X_8 + 9X_9 + 10X_{10} + 11X_{11} + 12X_{12} + 13X_{13} + X_{14} + 2X_{15} + 3X_{16} + 4X_{17} + 5X_{18} + 6X_{19} + 7X_{20} + 8X_{21} + 9X_{22} + 10X_{23} + 11X_{24} + 12X_{25} + 13X_{26} + \dots + X_{222} + 2X_{223} + 3X_{224} + 4X_{225} + 5X_{226} + 6X_{227} + 7X_{228} + 8X_{229} + 9X_{230} + 10X_{231} + 11X_{232} + 12X_{233} + 13X_{234}$$

Para este problema se tomaron cuatro tipos de restricciones:

Restricción de asignación

La cual se asegura que cada actividad solo sea asignada una vez en cada estación.

1. $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} = 1$
2. $X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} = 1$
3. $X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39} = 1$
4. $X_{40} + X_{41} + X_{42} + X_{43} + X_{44} + X_{45} + X_{46} + X_{47} + X_{48} + X_{49} + X_{50} + X_{51} + X_{52} = 1$
5. $X_{53} + X_{54} + X_{55} + X_{56} + X_{57} + X_{58} + X_{59} + X_{60} + X_{61} + X_{62} + X_{63} + X_{64} + X_{65} = 1$
6. $X_{66} + X_{67} + X_{68} + X_{69} + X_{70} + X_{71} + X_{72} + X_{73} + X_{74} + X_{75} + X_{76} + X_{77} + X_{78} = 1$
7. $X_{79} + X_{80} + X_{81} + X_{82} + X_{83} + X_{84} + X_{85} + X_{86} + X_{87} + X_{88} + X_{89} + X_{90} + X_{91} = 1$
8. $X_{92} + X_{93} + X_{94} + X_{95} + X_{96} + X_{97} + X_{98} + X_{99} + X_{100} + X_{101} + X_{102} + X_{103} + X_{104} = 1$
9. $X_{105} + X_{106} + X_{107} + X_{108} + X_{109} + X_{110} + X_{111} + X_{112} + X_{113} + X_{114} + X_{115} + X_{116} + X_{117} = 1$
10. $X_{118} + X_{119} + X_{120} + X_{121} + X_{122} + X_{123} + X_{124} + X_{125} + X_{126} + X_{127} + X_{128} + X_{129} + X_{130} = 1$
11. $X_{131} + X_{132} + X_{133} + X_{134} + X_{135} + X_{136} + X_{137} + X_{138} + X_{139} + X_{140} + X_{141} + X_{142} + X_{143} = 1$
12. $X_{144} + X_{145} + X_{146} + X_{147} + X_{148} + X_{149} + X_{150} + X_{151} + X_{152} + X_{153} + X_{154} + X_{155} + X_{156} = 1$
13. $X_{157} + X_{158} + X_{159} + X_{160} + X_{161} + X_{162} + X_{163} + X_{164} + X_{165} + X_{166} + X_{167} + X_{168} + X_{169} = 1$
14. $X_{170} + X_{171} + X_{172} + X_{173} + X_{174} + X_{175} + X_{176} + X_{177} + X_{178} + X_{179} + X_{180} + X_{181} + X_{182} = 1$
15. $X_{183} + X_{184} + X_{185} + X_{186} + X_{187} + X_{188} + X_{189} + X_{190} + X_{191} + X_{192} + X_{193} + X_{194} + X_{195} = 1$
16. $X_{196} + X_{197} + X_{198} + X_{199} + X_{200} + X_{201} + X_{202} + X_{203} + X_{204} + X_{205} + X_{206} + X_{207} + X_{208} = 1$
17. $X_{209} + X_{210} + X_{211} + X_{212} + X_{213} + X_{214} + X_{215} + X_{216} + X_{217} + X_{218} + X_{219} + X_{220} + X_{221} = 1$
18. $X_{222} + X_{223} + X_{224} + X_{225} + X_{226} + X_{227} + X_{228} + X_{229} + X_{230} + X_{231} + X_{232} + X_{233} + X_{234} = 1$

Restricción de tiempo de ciclo

La cual asegura que la sumatoria de los tiempos de las actividades de cada estación no sobrepase el tiempo de ciclo.

1. $18.92X_1 + 14.51X_{14} + 11.53X_{27} + 8.57X_{40} + 25.51X_{53} + 10.79X_{66} + 24.86X_{79} + 16.06X_{92} + 9.53X_{105} + 1.18X_{118} + 13.74X_{131} + 8.28X_{144} + 13.06X_{157} + 17.49X_{170} + 16.90X_{183} + 20.04X_{196} + 19.03X_{209} + 28.20X_{222} \leq 30$
2. $18.92X_2 + 14.51X_{15} + 11.53X_{28} + 8.57X_{41} + 25.51X_{54} + 10.79X_{67} + 24.86X_{80} + 16.06X_{93} + 9.53X_{106} + 1.18X_{119} + 13.74X_{132} + 8.28X_{145} + 13.06X_{158} + 17.49X_{171} + 16.90X_{184} + 20.04X_{197} + 19.03X_{210} + 28.20X_{223} \leq 30$
3. $18.92X_3 + 14.51X_{16} + 11.53X_{29} + 8.57X_{42} + 25.51X_{55} + 10.79X_{68} + 24.86X_{81} + 16.06X_{94} + 9.53X_{107} + 1.18X_{120} + 13.74X_{133} + 8.28X_{146} + 13.06X_{159} + 17.49X_{172} + 16.90X_{185} + 20.04X_{198} + 19.03X_{211} + 28.20X_{224} \leq 30$
4. $18.92X_4 + 14.51X_{17} + 11.53X_{30} + 8.57X_{43} + 25.51X_{56} + 10.79X_{69} + 24.86X_{82} + 16.06X_{95} + 9.53X_{108} + 1.18X_{121} + 13.74X_{134} + 8.28X_{147} + 13.06X_{160} + 17.49X_{173} + 16.90X_{186} + 20.04X_{199} + 19.03X_{212} + 28.20X_{225} \leq 30$
5. $18.92X_5 + 14.51X_{18} + 11.53X_{31} + 8.57X_{44} + 25.51X_{57} + 10.79X_{70} + 24.86X_{83} + 16.06X_{96} + 9.53X_{109} + 1.18X_{122} + 13.74X_{135} + 8.28X_{148} + 13.06X_{161} + 17.49X_{174} + 16.90X_{187} + 20.04X_{200} + 19.03X_{213} + 28.20X_{226} \leq 30$

6. $18.92X_6 + 14.51X_{19} + 11.53X_{32} + 8.57X_{45} + 25.51X_{58} + 10.79X_{71} + 24.86X_{84} + 16.06X_{97} + 9.53X_{110} + 1.18X_{123} + 13.74X_{136} + 8.28X_{149} + 13.06X_{162} + 17.49X_{175} + 16.90X_{188} + 20.04X_{201} + 19.03X_{214} + 28.20X_{227} \leq 30$
7. $18.92X_7 + 14.51X_{20} + 11.53X_{33} + 8.57X_{46} + 25.51X_{59} + 10.79X_{72} + 24.86X_{85} + 16.06X_{98} + 9.53X_{111} + 1.18X_{124} + 13.74X_{137} + 8.28X_{150} + 13.06X_{163} + 17.49X_{176} + 16.90X_{189} + 20.04X_{202} + 19.03X_{215} + 28.20X_{228} \leq 30$
8. $18.92X_8 + 14.51X_{21} + 11.53X_{34} + 8.57X_{47} + 25.51X_{60} + 10.79X_{73} + 24.86X_{86} + 16.06X_{99} + 9.53X_{112} + 1.18X_{125} + 13.74X_{138} + 8.28X_{151} + 13.06X_{164} + 17.49X_{177} + 16.90X_{190} + 20.04X_{203} + 19.03X_{216} + 28.20X_{229} \leq 30$
9. $18.92X_9 + 14.51X_{22} + 11.53X_{35} + 8.57X_{48} + 25.51X_{61} + 10.79X_{74} + 24.86X_{87} + 16.06X_{100} + 9.53X_{113} + 1.18X_{126} + 13.74X_{139} + 8.28X_{152} + 13.06X_{165} + 17.49X_{178} + 16.90X_{191} + 20.04X_{204} + 19.03X_{217} + 28.20X_{230} \leq 30$
10. $18.92X_{10} + 14.51X_{23} + 11.53X_{36} + 8.57X_{49} + 25.51X_{62} + 10.79X_{75} + 24.86X_{88} + 16.06X_{101} + 9.53X_{114} + 1.18X_{127} + 13.74X_{140} + 8.28X_{153} + 13.06X_{166} + 17.49X_{179} + 16.90X_{192} + 20.04X_{205} + 19.03X_{218} + 28.20X_{231} \leq 30$
11. $18.92X_{11} + 14.51X_{24} + 11.53X_{37} + 8.57X_{50} + 25.51X_{63} + 10.79X_{76} + 24.86X_{89} + 16.06X_{102} + 9.53X_{115} + 1.18X_{128} + 13.74X_{141} + 8.28X_{154} + 13.06X_{167} + 17.49X_{180} + 16.90X_{193} + 20.04X_{206} + 19.03X_{219} + 28.20X_{232} \leq 30$
12. $18.92X_{12} + 14.51X_{25} + 11.53X_{38} + 8.57X_{51} + 25.51X_{64} + 10.79X_{77} + 24.86X_{90} + 16.06X_{103} + 9.53X_{116} + 1.18X_{129} + 13.74X_{142} + 8.28X_{155} + 13.06X_{168} + 17.49X_{181} + 16.90X_{194} + 20.04X_{207} + 19.03X_{220} + 28.20X_{233} \leq 30$
13. $18.92X_{13} + 14.51X_{26} + 11.53X_{39} + 8.57X_{52} + 25.51X_{65} + 10.79X_{78} + 24.86X_{91} + 16.06X_{104} + 9.53X_{117} + 1.18X_{130} + 13.74X_{143} + 8.28X_{156} + 13.06X_{169} + 17.49X_{182} + 16.90X_{195} + 20.04X_{208} + 19.03X_{221} + 28.20X_{234} \leq 30$

Restricción de precedencia

Esta restricción asegura que se respete la presidencia de la figura 1. A continuación se presentan las restricciones para las dos primeras relaciones de precedencia, las restantes se pueden obtener de forma similar.

1. $X_1 \geq X_{26}$
2. $X_2 \geq X_{25} + X_{26}$
3. $X_3 \geq X_{24} + X_{25} + X_{26}$
4. $X_4 \geq X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
5. $X_5 \geq X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
6. $X_6 \geq X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
7. $X_7 \geq X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
8. $X_8 \geq X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
9. $X_9 \geq X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
10. $X_{10} \geq X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
11. $X_{11} \geq X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
12. $X_{12} \geq X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
13. $X_{13} \geq X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$
14. $X_{14} \geq X_{39}$
15. $X_{15} \geq X_{38} + X_{39}$
16. $X_{16} \geq X_{37} + X_{38} + X_{39}$
17. $X_{17} \geq X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
18. $X_{18} \geq X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
19. $X_{19} \geq X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
20. $X_{20} \geq X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
21. $X_{21} \geq X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
22. $X_{22} \geq X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
23. $X_{23} \geq X_{30} + X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
24. $X_{24} \geq X_{29} + X_{30} + X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
25. $X_{25} \geq X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$
26. $X_{26} \geq X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39}$

Todas las variables deben ser binarias, por lo tanto:

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_{233}, X_{234} = \text{binarias}(0,1)$$

Comentarios Finales

Se utilizó el suplemento R STUDIO para resolver el modelo presentado utilizando el paquete *ipolve* para resolverlo con el método *simplex* y se obtuvieron los siguientes resultados.

$$X_1 = 1, X_{15} = 1, X_{28} = 1, X_{42} = 1, X_{57} = 1, X_{71} = 1, X_{85} = 1, X_{99} = 1, X_{112} = 1, X_{119} = 1, X_{133} = 1, X_{147} = 1, X_{160} = 1, X_{175} = 1, X_{191} = 1, X_{205} = 1, X_{219} = 1, X_{233} = 1.$$

Lo cual nos indica que la estación 1 se le asignó la actividad C-1, a la estación 2 se le asignaron las actividades C-2, C-3 y T-1, a la estación 3 se le asignaron las actividades DT-1 y CO-1, a la estación 4 se le asignaron las actividades CO-2 y CO-3, a la estación 5 se le asignó la actividad DT-2, a la estación 6 se le asignaron las actividades DT-3 y CO-4, a la estación 7 se le asignó la actividad DTA-1, a la estación 8 se le asignan las actividades DTA-2 y DTA-3, a la estación 9 se le asignó la actividad CO-5, a la estación 10 se le asignó la actividad CO-6, a la estación 11 se le asignó la actividad CO-7 y a la estación 12 se le asignó la actividad CO-8, dando como resultado la reducción en las operaciones de 18 estaciones que eran originalmente quedando la nueva línea con 12 estaciones. Con un tiempo de 18.92 segundos para la estación 1, 27.22 segundos para la estación 2, 22.31 para la estación 3, 21.34 segundos para la estación 4, 25.51 segundos para la estación 5, 28.28 segundos para la estación 6, 24.86 segundos para la estación 7, 25.59 segundos para la estación 8, 16.90 para la estación 9, 20.04 segundos para la estación 10, 19.03 segundos para la estación 11 y 28.20 segundos para la estación 12. Dando 103 como el valor mínimo de la ecuación objetivo, con un índice de eficiencia de 0.720222 y un índice de balanceo de 150.41.

La mayor diferencia encontrada entre ambos métodos es que tanto el método de candidato más largo como el corto daban un total de 13 estaciones siendo una reducción considerable a los 18 originales, pero el balanceo hecho con el método *simplex* lo redujo a 12 reduciendo así una estación más, obteniendo así un óptimo balanceo de la línea. De los 3 métodos es el que tiene un índice de balanceo menor y un índice de eficiencia mayor.

Referencias

- Acero, L. C. (s.f.). *Ingeniería de métodos Movimientos y tiempos*. ECOE edición .
Criollo, R. G. (s.f.). *Estudio del trabajo ingeniería de métodos y medición del trabajo*. Mc Graw Hill.
Grzechca, W. (s.f.). *ASSEMBLY LINE-THEORY AND PRACTICE*. InTech.