

**PROPUESTA DE MEJORA PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN LA
FABRICACIÓN DE PLACAS EXPANDIDAS DE BATERÍAS PLOMO-ÁCIDO A
TRAVÉS DE BALANCEO DE LÍNEAS.**

ANA RIQUETT

ESTEBAN NAVAS.



UNIVERSIDAD DE LA COSTA- CUC

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

BARRANQUILLA, 2021

**PROPUESTA DE MEJORA PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN LA
FABRICACIÓN DE PLACAS EXPANDIDAS DE BATERÍAS PLOMO-ÁCIDO A
TRAVÉS DE BALANCEO DE LÍNEAS.**

ANA RIQUETT

ESTEBAN NAVAS.

Trabajo de grado como requisito para optar al

título de INGENIERO INDUSTRIAL

TUTOR: MSc. Ing. ALFONSO R. ROMERO CONRADO

COTUTOR: MSc. Ing. MAYRA A. MACÍAS JIMÉNEZ

UNIVERSIDAD DE LA COSTA- CUC

DEPARTAMENTO DE PRODUCTIVIDAD E INNOVACIÓN

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2021

TABLA DE CONTENIDO

1. Lista de Tablas y Figuras	5
1.1. TABLAS.....	5
1.2. FIGURAS.....	5
2. Consideraciones Generales.....	11
2.1. INTRODUCCIÓN	11
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
3. Objetivos	15
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
4. Justificación	16
5. Metodología	18
5.1. TIPO DE ESTUDIO	18
5.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	18
6. Marco de referencia	20
6.1. MARCO TEÓRICO.....	20
6.2. ESTADO DEL ARTE	27
7. Caracterización del proceso productivo de baterías plomo-ácido.....	36
7.1. GENERALIDADES	36
7.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO	36

8. Implementación del método de solución	42
8.1. ESTANDARIZACIÓN DE TIEMPOS	42
8.2. DIAGRAMA ANALÍTICO	45
8.3. DESARROLLO DEL BALANCEO DE LÍNEA	49
9. Resultados	55
9.1. PROGRAMACIÓN DEL MODELO EN GAMS	55
9.2. SOLUCIÓN DEL MODELO	57
9.3. EFICIENCIA DE LA SOLUCIÓN	59
10. Conclusiones	62
11. Referencias.....	64
12. Anexos	70
ANEXO 1. CÁLCULOS DE PRODUCTIVIDAD ESTUDIO DE MÉTODOS Y TIEMPOS.	70
ANEXO 2. ENTREVISTA REALIZADA AL INGENIERO DE LA PLANTA Y JEFE DE PRODUCCIÓN SOBRE EL DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA	71
ANEXO 3. VALORACIÓN, SUPLEMENTOS Y TIEMPO TIPO SUGERIDO.	74
ANEXO 4. CÓDIGO DEL MODELO EN GAMS.	82

1. Lista de Tablas y Figuras

1.1. Tablas

Tabla 1. Artículos que emplean soluciones al problema de balanceo de línea.	34
Tabla 2. Artículos que emplean soluciones a balanceo de línea. Parte II.	34
Tabla 3. Identificación de las Actividades en el diagrama de precedencias y en el código. ...	48
Tabla 4. Tabla de precedencias.....	50
Tabla 5. Cálculo de la eficiencia.	60

1.2. Figuras

Figura 1. Fases del proyecto.	18
Figura 2. Componentes de una batería.	25
Figura 3. Partes del elemento.	25
Figura 4. Diagrama del proceso de fabricación de baterías plomo-ácido.	39
Figura 5. Diagrama del proceso de fabricación de baterías plomo-ácido (Continuación II).....	40
Figura 6. Diagrama del proceso de fabricación de baterías plomo-ácido (continuación III). ...	41
Figura 7. Tiempos por actividad (en segundos).	43
Figura 8. Diagrama Analítico.	46
Figura 9. Diagrama Analítico parte II.	47
Figura 10. Diagrama de precedencias.....	51
Figura 11. Conjuntos “i” y “j”.	55
Figura 12. Parámetros y Variables.	56
Figura 13. Restricciones del código.	57
Figura 14. Resultado de la variable x.	58

Figura 15. Resultado variable y.....	58
Figura 16. Cálculos de productividad.....	70
Figura 17. Puntos asignados a las diversas tensiones.....	75
Figura 18. Postura.....	76
Figura 19. Monotonía.....	76
Figura 20. Porcentaje del suplemento para la actividad 1.....	77
Figura 21. Porcentaje del suplemento de la actividad 2.....	78

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo dedicamos a Dios, quien fue nuestro motor y guía durante todo el camino, por ser nuestra motivación frente a las diferentes adversidades que se nos presentaron.

A quienes han sido nuestro apoyo principal, nuestros padres, porque gracias a ellos hemos cumplido cada uno de nuestros sueños y metas, por su amor, su confianza, consejos y cada uno de los valores que nos han inculcado.

A nuestra familia por su cariño y apoyo incondicional durante todo este proceso, por sus oraciones, consejos y palabras de aliento que hicieron de nosotros seres soñadores, llenos de fortaleza y valentía.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestros agradecimientos a Dios todo poderoso por permitirnos desarrollar nuestra investigación pese a las dificultades presentadas en el camino, a nuestros tutores los ingenieros ALFONSO ROMERO CONRADO y MAYRA MACIAS JIMENEZ, por la dedicación y apoyo que nos han brindado, por la revisión minuciosa, el compromiso y aporte basado en sus experiencias que ha sido de gran ayuda en todo este proceso. Gracias por la confianza ofrecida desde que iniciamos este proyecto. De igual manera, agradecemos a nuestros padres y familiares que de una u otra manera contribuyeron a nuestro desarrollo profesional y personal, a nuestros amigos por su apoyo personal y humano, especialmente al Ing. Pedro Acosta, quien nos ha brindado y facilitado los datos necesarios para la aplicación del balanceo de línea, además por facilitar nuestro ingreso a la planta de producción para la comprensión del proceso y toma de tiempos.

Finalmente, gracias a la Universidad de la Costa, por incentivar en nosotros el espíritu investigador lo que ahora se encuentra dando frutos. No nos queda más que agradecer a todos los que con su comprensión, solidaridad y amor aportaron su granito de arena para el desarrollo de este proyecto; sin su apoyo este logro no hubiese sido posible y, por eso, este trabajo es también el suyo.

Resumen

Las baterías de plomo-ácido son utilizadas generalmente en vehículos convencionales y eléctricos, su proceso de fabricación se caracteriza por tener una larga serie de actividades rutinarias. El presente trabajo tiene como finalidad diseñar una propuesta de mejora utilizando el balanceo de línea con el propósito de incrementar la productividad en la fabricación de placas expandidas en este tipo de baterías, y de esta forma equiparar cargas de trabajo en las estaciones del proceso, minimizando el tiempo ocioso y logrando la optimización del tiempo de producción. Para ello, se llevaron a cabo tres grandes etapas. La primera consistió en la caracterización del proceso de fabricación utilizando herramientas de estudio del trabajo; luego se realizó una revisión de la literatura sobre los métodos de balanceo de líneas de ensamble, y se identificaron las alternativas de solución. Por último, se definió y evaluó un método de solución para un problema del tipo SALBP-1. Los resultados obtenidos mostraron una reducción del número de estaciones generando así, mejoras en el proceso, principalmente en la productividad de la línea y los operarios de esta.

Palabras clave: balanceo de líneas, placas expandidas, baterías plomo-ácido, SALBP-1, productividad

Abstract

Lead-acid batteries are generally used in conventional and electric vehicles, its manufacturing process is characterized by having a long series of routine activities. The purpose of this work is to design a proposal for improvement using line balancing to increase productivity in the production process of expanded plates in this type of batterie. It seeks to equate workloads on workstations, minimize idle time and optimize production time. For this, three great stages were carried out. The first one consisted of characterize the manufacturing process using work study tools; then a literature review about assembly line balancing methods was conducted, and alternative solutions were identified. Finally, a solution method for a SALBP-1 type problem was defined and evaluated. The obtained results showed a reduction in the number of stations that implies improvements in the process, mainly in the productivity of the line and its operators.

Keywords: Line balancing, expanded plates, lead-acid batteries, SALBP-1, productivity

2. Consideraciones Generales

2.1. Introducción

El balanceo de líneas de ensamble es una herramienta de suma importancia en el control de la producción, dado que su implementación permite que la línea de fabricación se mantenga equilibrada y se optimicen algunas variables como: los inventarios de producto en proceso, tiempos de fabricación y las entregas parciales de la producción, aspectos que afectan la productividad, economía y eficiencia de las organizaciones.

La presente investigación pretende diseñar una propuesta de mejora a partir de la implementación de la herramienta de balanceo de línea en la fabricación de placas expandidas de baterías plomo-ácido. Para cumplir con los objetivos planteados, es importante que la empresa analice y optimice los procesos necesarios para la fabricación de sus productos mediante la adecuada utilización de recursos, maquinaria y personal. Por ello, el proyecto incluye el uso de técnicas de métodos y tiempos, así como de programación matemática para el análisis del sistema actual de producción, y la configuración de una propuesta efectiva que repercuta en los niveles de productividad de la empresa seleccionada.

Este trabajo representa para la empresa una base para la toma de decisiones relacionadas con la mejora de los métodos de producción. En síntesis, se utiliza un método de solución exacto para abordar un problema de balanceo de línea. De esta forma, el documento inicia presentando las consideraciones generales, y el problema que da origen a la investigación (secciones 1-4). Continúa señalando el diseño metodológico (sección 5) y en la sección 6, es posible apreciar los conceptos básicos que facilitan la comprensión del documento basados en la literatura disponible (subsección 6.1), algunos referentes de investigaciones anteriores en las que se utilizan diversos

métodos de solución en contextos similares (subsección 6.2). A partir de la sección 7, se incluye el desarrollo de la metodología propuesta, iniciando con la caracterización del sistema en estudio, y la aplicación del método de solución de manera detallada (sección 8). Por último, se incluyen los resultados obtenidos con su respectivo análisis y conclusiones.

2.2. Planteamiento del Problema

La empresa seleccionada para el desarrollo de la presente investigación se encuentra ubicada en el municipio de Malambo, departamento del Atlántico. Esta organización se dedica a la fabricación de baterías y acumuladores eléctricos. Actualmente, los métodos de programación establecidos para el seguimiento, medición, análisis y evaluación de la producción en la línea de fabricación de baterías plomo-ácido no son eficientes porque la planta presenta muchas paradas.

Los resultados obtenidos en el estudio de métodos y tiempos evidencian que la línea presenta cuellos de botellas, paradas innecesarias y gastos adicionales que retrasan la producción y a su vez, aumentan los costos por lo que se ve afectado el desarrollo, crecimiento, y la expansión productiva y comercial de la empresa (Navas & Riquett, 2020a, 2020b, 2021).

Adicionalmente, los procesos relacionados con el seguimiento y control de la producción se realizan por medio de formatos o planillas, los cuales deben ser llenados y actualizados por los operarios en tiempo real. Estos formatos brindan al personal de producción, información acerca de las unidades trabajadas por turno y referencias de cada una de las unidades producidas; pero esta información no es suficiente para conocer el estado actual de las órdenes pendientes, el número de placas producidas e incluso, las que se van a producir.

El problema se intensifica porque en ocasiones cuando se está fabricando un modelo de placa, luego de haber cambiado los materiales y los instrumentos a utilizar, la gerencia cambia de decisión y procede a fabricar otro tipo de placa lo que genera caos en la línea de producción. Por otro lado, las paradas de las máquinas generan improductividad en la línea porque mantienen la producción totalmente paralizada por minutos y/o horas.

Al realizar un análisis de la línea de producción de placas expandidas, siendo esta la responsable de las operaciones más representativas de la compañía, se puede observar que se presentan toda una serie de retrasos, desplazamientos, colas, inventarios y procedimientos innecesarios que incrementan el tiempo de ciclo del producto final, alargando el tiempo de entrega a los clientes, lo que le resta productividad en más de un 100% a la línea de fabricación, aspecto que se observó con el estudio de métodos y tiempos realizado en la empresa Anexo 1.

Por esta razón, surge la necesidad de analizar la productividad de la organización enfocándose en los insumos (entradas) y productos (salidas), con el fin de dirigir el trabajo organizacional hacia la mejora continua de las actividades operacionales y el cumplimiento de los objetivos estratégicos de liderazgo en el mercado y rentabilidad competitiva del sector. De esta forma, la productividad dependerá de los factores relacionados con la optimización de los recursos humanos, operacionales, tecnológicos y minerales utilizados frente al desempeño obtenido (Wang & Feng, 2015).

Además, teniendo en cuenta que, para aumentar la competitividad y posicionamiento en el mercado, las empresas de producción se ven obligadas al mejoramiento de sus procesos; por tanto, la evaluación de los procedimientos de fabricación permite realizar un análisis del sistema o línea de ensamble. De esta forma, la existencia de un recurso restrictivo dentro del proceso de

fabricación de cualquier producto puede generar fallas en el proceso, lo que traería consigo disminución de las ventas y a su vez clientes insatisfechos al no recibir sus pedidos en el momento deseado.

Chapman (2006) indica que el desempeño óptimo del sistema no es igual a la suma de óptimos locales; sino que se encuentra limitado por el recurso restrictivo. Por tanto, la producción de la línea siempre estará dada por el tiempo que tarda la máquina cuello de botella en realizar su función sobre el material.

A partir de lo expuesto anteriormente surge el siguiente interrogante: ¿De qué manera contribuir a la mejora de la productividad del proceso de fabricación de placas expandidas para baterías plomo-ácido buscando equiparar cargas para la minimización del tiempo ocioso y optimización del tiempo de producción?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Diseñar una propuesta de mejora utilizando el balanceo de línea con el fin de incrementar la productividad en la fabricación de placas expandidas de baterías plomo-ácido.

3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el proceso por medio de indicadores para evaluar las medidas de desempeño de la línea de producción de baterías.
- Identificar alternativas de solución al problema de balanceo de líneas de producción a través de una revisión de literatura.
- Determinar un método idóneo de solución al problema de balanceo de línea de producción, teniendo en cuenta los indicadores de productividad.

4. Justificación

El presente trabajo de grado surge principalmente por la necesidad de la empresa de realizar mejoras al proceso de producción, con el fin de optimizar la productividad de las operaciones y el cumplimiento de los objetivos de la compañía. El diseño de la propuesta busca mejorar la productividad de la línea y consigo la de la empresa, generando un gran beneficio en la optimización y el uso de recursos destinados al desarrollo y producción de las placas plomo-ácido en caso de llegar a una fase de implementación.

Como se mencionó en la sección anterior, la empresa cuenta con formatos para la planeación, seguimiento, control y documentación de cada uno de los eventos que se van a realizar y que son planeados por cada una de las partes interesadas de la empresa como los comités ejecutivos, de personal, técnicos entre otros, aunque aun teniéndolos no son suficientes porque se detectan inconvenientes en la línea de producción. Estas fallas generan retrasos en el proceso de fabricación, así como incumplimientos, errores en la programación de órdenes, incremento de niveles de inventarios, generación de *back orders* (pedidos o unidades de producto del cual no se cuenta con existencias para su despacho), acumulación de saldos y el aumento de costos productivos por pérdidas y reprocesos.

Con base en todos estos efectos, surge la necesidad de buscar soluciones a dicha problemática. Para esto, se requiere de la implementación de una metodología que le permita a la empresa garantizar el cumplimiento de sus objetivos relacionados con la producción, de tal manera que pueda enfrentar de manera efectiva el crecimiento de la compañía con diversificación a nuevos mercados e incremento de la demanda.

El balanceo de líneas de producción es una solución a este problema, porque según (Suñé, Gil, & Arcusa, 2004), su implementación garantiza que las operaciones en la línea de producción o montaje se repartan de modo que, los recursos productivos sean utilizados de la forma más ajustada posible a lo largo de todo el proceso.

Según Orozco et al (2016) el objetivo del balanceo de líneas es buscar alternativas que permitan el uso óptimo de la capacidad, esto con la finalidad de mantener un flujo continuo y uniforme de los productos, a través de los diferentes procesos dentro de la planta, por medio de la aplicación de técnicas que permitan equilibrar las cargas y equiparar los tiempos de trabajo en cada estación, lo que puede generar grandes ventajas y beneficios a la empresa.

Las organizaciones que centran su estrategia de desarrollo operativo en la utilización de herramientas de mejora continua y en el uso de tecnologías para el análisis de sus operaciones, procesos y actividades, son capaces de responder mejor a los cambios del entorno empresarial al que pertenecen (R. Chapman & Hyland, 2004). Por esta razón, las empresas tienen la necesidad de contar con sistemas de producción acordes y alineados con nuevas tecnologías y/o métodos que permitan generar el control de la producción. De ahí la importancia del balanceo para generar una línea de fabricación equilibrada, optimizando los tiempos de fabricación y flujo de operaciones maximizando la eficacia y reduciendo los retrasos de las operaciones que pueden afectar la calidad tanto del producto como de la empresa.

5. Metodología

5.1. Tipo de estudio

El tipo de estudio a desarrollar es una investigación aplicada, porque se desea resolver un problema basado en una necesidad social-práctica en un sector productivo, en este caso la industria de baterías.

La investigación aplicada observa la realidad de las organizaciones y cada uno de sus descubrimientos para implementar innovaciones que sirvan para la mejora de los problemas y, a su vez permitan el crecimiento de ésta (Cívicos Juárez & Hernández Hernández, 2011).

5.2. Procedimiento metodológico

Para el desarrollo de este proyecto se establecieron 3 fases, en la Figura 1. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra una descripción más detallada sobre cómo se llevará a cabo el estudio.

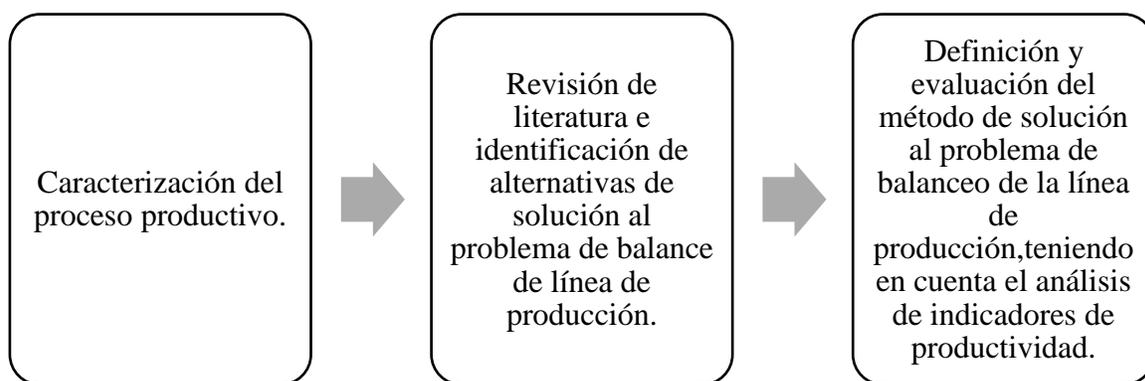


Figura 1. Fases del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Fase 1: Caracterización del sistema productivo.

Dentro de esta fase se busca realizar una descripción detallada de la línea de producción de baterías, indicando las operaciones que integran el proceso, el tiempo empleado para ello y los problemas actuales. Para la caracterización, se emplearán fuentes de información primarias como la observación, con el fin de garantizar la veracidad y credibilidad de la información.

5.2.2 Fase 2: Revisión de literatura e identificación de alternativas de solución al problema de balanceo de línea de producción.

Esta segunda fase busca identificar por medio de un trabajo arduo de investigación, la literatura relevante frente al tema de balanceo de líneas de producción, determinando alternativas de solución a problemas similares presentados en diversas organizaciones, priorizando los métodos pertinentes al caso en estudio.

5.2.3 Fase 3: Definición y evaluación del método de solución al problema de balanceo de la línea de producción, teniendo en cuenta el análisis de indicadores de productividad.

Para esta tercera y última fase es necesario tomar todas las alternativas posibles y definir las, con el fin de reconocer cada una de ellas; luego se desarrollarán los métodos de solución preseleccionados para comparar los y seleccionar no solo una opción factible sino la alternativa que proporcione la solución más cercana al resultado óptimo específico para este caso en estudio.

6. Marco de referencia

6.1. Marco Teórico

En esta sección se definen los ejes que enmarcan la investigación, en primera medida se presentara una conceptualización sobre el balanceo de líneas, la definición sobre las baterías y el proceso de producción de baterías plomo-ácido. Posteriormente, en la siguiente sección (estado del arte), se abordan investigaciones relacionadas con el balanceo de línea.

6.1.1 Balanceo de líneas

El balanceo de líneas es una solución que frecuentemente utilizan las empresas de producción para mitigar ciertos errores debido al número de tareas o trabajos diferentes que poseen y deben ejecutar para cada artículo. Debido a esto, el tiempo de procesamiento para cada tarea es una constante conocida.

Por consiguiente, el objetivo principal del balanceo de líneas es establecer las tareas en grupos, con el fin de que cada grupo cree una única estación de trabajo. Sin embargo, para este fin se debe planear y considerar la tasa de producción de toda la línea de trabajo (Nahmias, 2014).

Con base a lo anterior, Chapman (2006) plantea que las empresas para llevar una buena organización o planificación de los recursos tienen en cuenta dos aspectos o categorías que son:

- Oferta: en donde se evalúa y se intenta cambiar el suministro de producción.
- Mercadeo y ventas: donde se busca modificar los valores de la demanda, para que se asemejen a los de la producción.

Con el fin de garantizar el cumplimiento de los conceptos mencionados anteriormente, Chapman (2006) expone diversas estrategias; las cuales se clasifican en internas y externas. Las internas agrupan:

- Contratar y despedir personal
- Trabajadores temporales
- Tiempo extra / Tiempo de inactividad
- Subcontratación
- Inventarios
- Cartera de pedidos
- No atender la demanda
- Modificación de la tasa de producción

Por su parte, las estrategias externas se encuentran dirigidas hacia la demanda, buscan alterar la misma con el fin de tener cierto control sobre ella. Dentro de esta categoría encontramos las siguientes:

- Fijación de precios
- Promociones
- Publicidad
- Reservaciones
- Ofertas en paquetes

6.1.1.1 Tipos de problema de balanceo de líneas.

ALBP (*The Assembly Line Balancing Problem*, o en español, problema de balanceo de línea de ensamble) es conocido como un problema NP-hard. Grzechca & Foulds (2015) afirman que “este tipo de problemas implica distribuir las tareas necesarias para fabricar cualquiera de los productos a ensamblar entre las estaciones de trabajo a lo largo de la línea de fabricación”.

SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*, o en español, **Problema de balanceo de líneas de ensamble simple**): esta categoría de problemas fue propuesta por Baybars (1986) y Scholl (1995) y agrupan los problemas de equilibrio más simples, donde se supone que todos los parámetros se conocen con seguridad. En este caso, una tarea no puede ser dividida entre dos o más estaciones de trabajo. De igual forma, es bueno recalcar que existen secuencias que deben respetarse y todas las tareas deben llevarse a cabo. Además, las estaciones de trabajo deben estar dotadas de los implementos y/o insumos necesarios para realizar cada tarea bajo el mismo costo, y el tiempo que emplea la ejecución de una actividad no depende de la estación a la cual se asigne ni de las actividades predecesoras. Existen cuatro tipos de SALBP:

- SALBP-1: dispone de un tiempo de ciclo asignado o tasa de producción y tiene por objetivo disminuir el número de estaciones que se requieren para llevar a cabo el proceso (Restrepo, Daniel Medina, & Cruz Trejos, 2008).
- SALBP-2: tiene por objetivo minimizar el tiempo de ciclo para un número fijo de estaciones de trabajo (Restrepo et al., 2008).
- SALBP-E: su finalidad es maximizar la eficiencia de la línea de ensamble y a su vez, busca minimizar el resultado de la multiplicación del número de estaciones y el tiempo de ciclo (Restrepo et al., 2008).

- SALBP-F: su objetivo es encontrar si existe una solución factible para una combinación cualquiera ya sea de tiempo de ciclo y/o número de estaciones (Restrepo et al., 2008)

GALBP (*General Assembly Line Balancing Problem*, o en español, **Problema de balanceo de líneas de ensamble general**): Restrepo et al (2008) afirman que esta categoría engloba todos los problemas de equilibrio de líneas de ensamble que no son SALBP, dentro de ellos, los más comunes son: modelos mixtos, estaciones en paralelo, procesamientos alternativos y tiempos de proceso variables. Existen cuatro tipos de GALBP:

- UALBP (*U-line Assembly Line Balancing Problem*, o en español, problema de balanceo de líneas de ensamble en U): se distinguen porque no trabajan con una línea en serie, si no que trabaja con una línea tipo U. Dentro de este tipo de problema se encuentra el UALBP-1 que minimiza el número de estaciones, el UALB-2 que se encarga de minimizar el tiempo de ciclo y el UALBP-E que maximiza la eficiencia de la línea.
- MALBP (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*, o en español, problema de balanceo de líneas de ensamble de modelo mixto): este tipo de problema se caracteriza porque se manejan varios modelos de un mismo producto, teniendo un conjunto de tareas comunes a ejecutar en la totalidad de cada modelo sin tener en cuenta los tiempos de preparación de la línea. En este modelo se presentan problemas como: MALBP-1, MALBP-2 y MALBP-E.
- RALPB (*Robotic Assembly Line Balancing Problem*, o en español, problema de balanceo de líneas de ensamble robótica): su función es optimizar la ejecución de las tareas en la línea, teniendo en cuenta la asignación de tareas a cada estación como la distribución de cada uno de los robots a las diferentes estaciones (León, Neira, & Reynel, 2016).

- MOALBP (*Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem*, o en español, problema de balanceo de líneas de ensamble multiobjetivo): persigue el cumplimiento de varios objetivos a la vez; es decir, su objetivo resulta de la combinación de una serie de objetivos individuales.

TALBP (*The two-sided assembly line balancing problema*, o en español, problema de balanceo de líneas de dos lados): consiste en un conjunto de estaciones acopladas y secuenciales conectadas por el sistema de manejo de materiales. Existen dos tipos de TALBP dentro de ellos están:

- TALBP-I -*The two-sided assembly line with the workstation number minimization criterion*: su objetivo es minimizar el número de estaciones para un tiempo de ciclo dado.
- TALBP-II -*The two-sided assembly line with the cycle time minimization criterion*: este método es utilizado para disminuir el tiempo de ciclo para estaciones acopladas dadas. Además, es adecuado para la reconfiguración de la línea de ensamble. (Hu, Wu, & Jin, 2008)

6.1.2 Batería

6.1.2.1 Definición

De acuerdo con FERVE (2013), “Una batería es un acumulador químico de energía eléctrica continua”. Las baterías son capaces de almacenar reacciones químicas que durante la descarga se revierten en todos los electrodos y cuando estos son conectados a través de un circuito externo se produce una corriente eléctrica.

6.1.2.2 Funcionamiento

Una batería funciona transformando la energía eléctrica que recibe en energía química, a través de una reacción en la que intervienen placas positivas y negativas que se sumergen en una solución a base de electrolito, una solución de ácido sulfúrico y agua. En la Figura 2 podemos apreciar los componentes de una batería.

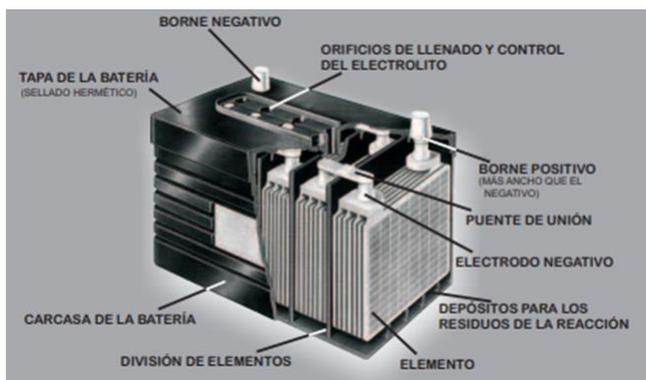


Figura 2. Componentes de una batería Fuente: (FERVE, 2013)

6.1.2.3. Elemento

(Free & Cargadores, n.d.)argumenta que un elemento está formado por varias placas de plomo cubiertas exteriormente con una sustancia activa positiva, óxido de plomo (Pb_3O_4) y varias con una sustancia activa negativa (plomo poroso, Pb) separadas entre sí por separadores para evitar cortocircuitos. En la Figura 3 se muestran las partes del elemento.

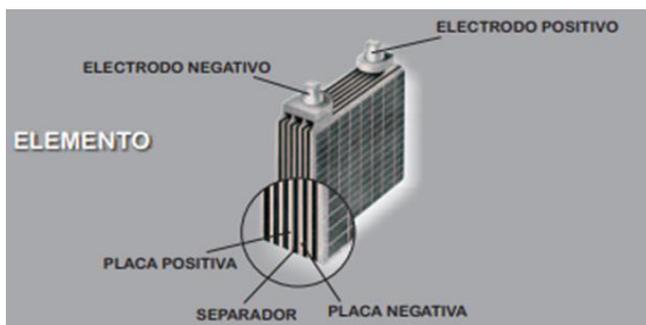


Figura 3. Partes del elemento. Fuente: (FERVE, 2013)

El elemento está ubicado en una celda del contenedor sumergido en una solución electrolítica que contiene ácido sulfúrico y agua destilada. Cada elemento genera una diferencia de potencial de 2V. El proceso de carga y descarga consiste en la migración de cargas eléctricas entre placas, a través de la solución electrolítica. Debido al uso normal de la batería las placas se van gastando y generan un pequeño residuo: sulfato de plomo ($PbSO_4$) que se va acumulando en la parte baja de las celdas.

6.1.2.4. Clasificación de la Batería

Existen innumerables tipos de baterías según los materiales implementados para su elaboración o según su fabricante, no obstante, las baterías se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Baterías con electrolito líquido (líquidas): También conocidas como baterías abiertas, las cuales pierden líquido electrolítico con el pasar del tiempo, por lo que es necesario realizarles mantenimiento (agua destilada). Actualmente ya existen baterías de este tipo que no requieren mantenimiento, gracias a la adición en sus componentes de limitantes de pérdida de líquido electro-líquido.
- Baterías con electrolito sólido (GEL): los líquidos electrolíticos de este tipo de baterías se encuentran fijados en un gel, por lo que no es necesario someterlas a mantenimientos. Además, estas baterías pueden colocarse en cualquier posición sin producirse derrames de líquido electrolítico; esta gama de baterías actualmente es más costosa que las líquidas.

6.2. Estado del Arte

A continuación, se incluyen las principales investigaciones relacionados con el tema balanceo de líneas. El equipo de trabajo se dio a la tarea de revisar la literatura existente usando bases de datos como: Scielo, Science Direct, Scopus, Web of Science; buscando así antecedentes de investigaciones relacionadas que permitieran identificar métodos de solución relevantes para el problema en estudio.

6.2.1. Métodos de solución exactos.

Inicialmente, Jaramillo Garzon & Restrepo Correa (2010) utilizaron un algoritmo exacto para solucionar el problema simple de balanceo de una línea de ensamble (SALBP-1). El algoritmo que utilizaron fue la programación dinámica y la problemática a solucionar era determinar el número de estaciones que se necesitaban para realizar las tareas de la línea y a su vez determinar el tiempo de ciclo.

Por su parte, Durango Cruz et al., (2015) aplicaron en una empresa manufacturera del sector textil, líneas de modelos mixtos para ensamblar diferentes productos de una familia en una misma línea, por lo que realizaron una revisión bibliográfica para analizar cuáles son los factores que afectan a la línea. Así mismo, realizaron un modelo matemático que estabilizara las cargas de trabajo, facilitando así la decisión sobre las secuencias de producción que se programan en la línea determinando varios escenarios para hallar resultados mejores que los métodos obtenidos con un modelo de balanceo tradicional.

Tiempo después, Orejuela Cabrera & Flórez González (2019) emplearon la programación por metas para abordar un modelo de balanceo de líneas que considerara minimizar el número de

estaciones, el tiempo de ciclo y el inventario en proceso, donde implementaron el modelo en LINGO para validar el cumplimiento de las restricciones planteadas, la precedencia de las operaciones y el buen funcionamiento del modelo mediante las soluciones óptimas obtenidas.

Por lo tanto, las líneas de flujo automatizadas necesitan ser eficientes porque si no lo son disminuyen el rendimiento de las estaciones de trabajo. Müller et al (2016) establecieron una formulación matemática para equilibrar las líneas de flujo frente a los diferentes problemas que se pudiesen presentar en la línea automatizada, para así maximizar el nivel en el que las estaciones aguas abajo asumen automáticamente las tareas de las estaciones fallidas y, por lo tanto, hacen que la línea sea más robusta contra las fallas. Esta solución fue aplicada por una industria de robótica que utiliza robots para automatizar u optimizar procesos.

Ahora bien, en lo relativo a líneas de ensamble multimodelo (MuMALBP), se producen varios productos en lotes separados por una sola línea de ensamble. Jafari Asl et al., (2019) aplicaron el balanceo de líneas en un problema de equilibrio del tipo MuMALBP, donde propusieron un método exacto para solucionar las líneas de ensamble con el fin de minimizar el tiempo de ciclo de cada modelo, maximizar el número de tareas comunes asignadas a las mismas estaciones de trabajo, y maximizar el nivel de suavidad de la distribución de trabajo. A partir de los resultados del modelo propuesto se concluye que se obtiene un tiempo de ciclo mínimo posible para cada modelo, todas las tareas se asignan a las mismas estaciones de trabajo y se logra el mayor nivel posible de distribución de carga de trabajo.

Resulta de suma importancia que se distribuyan de forma uniforme las estaciones de trabajo de acuerdo con sus tiempos de ciclo en las líneas de producción. Por ello, Bartos & Bertok (2020) emplearon el balanceo de línea por medio de los gráficos de procesos o gráficos P en una planta

de ensamble de computadoras. El método consistía en establecer la tarea potencial para cada empleado, así como las opciones para generar un método exacto para ser resuelto por solucionadores de uso general (Software P-graph) y obtener el N óptimo y alternativo.

Del mismo modo, la meta principal de las empresas es producir y entregar sus productos de una manera eficiente, a través de las buenas prácticas que empleen en su proceso productivo. Hazir et al., (2015) presentaron un artículo de revisión que tenía por objetivo facilitar la identificación de problemas de optimización sobre los enfoques y métodos base para llevar a cabo un proceso productivo eficiente. Los autores obtuvieron información sobre los costos y ganancias en problemas, también acerca de los métodos de equilibrio de líneas que pueden generarse al momento de fabricar un producto durante su ciclo de vida.

6.2.2 Métodos de solución heurísticos.

Los métodos heurísticos se encuentran representados por un conjunto de técnicas que se emplean con el fin de encontrar y solucionar un problema en aquellos casos en los que es difícil hallar una solución óptima, en palabras más sencillas es la implementación de metodologías manuales que permiten hallar una solución aceptable al problema de balanceo de línea.

Por otro lado, Li et al., (2017) presentan en su artículo una revisión exhaustiva de heurísticas y metaheurísticas para el problema del equilibrio de línea de ensamble a dos caras, donde hacen comparaciones con métodos publicados como: TALBP-I y TALBP-II, los cuales son muy conocidos y permiten la selección adecuada del esquema de codificación, procedimiento de decodificación y función objetivo para tener un algoritmo con un alto rendimiento. Dentro de las conclusiones del artículo se encuentra que la selección adecuada de la función objetivo, así como, los esquemas y procedimientos de codificación y decodificación mejoran el rendimiento de los

algoritmos por un margen significativo; asimismo, se logró identificar 15 soluciones al problema de balanceo de líneas de ensamble de dos caras tipo II durante la reimplementación y evaluación de las metaheurísticas en ensayo, ya que este tipo de algoritmo TALBP-II presenta soluciones óptimas.

Así mismo, Fazlollahtabar et al (2011) implementan una metodología heurística para el equilibrio de la línea de montaje considerando el tiempo estocástico y las pruebas de validez, para ello utilizaron reglas como el RPW (*Rank Positioned Weight*), una heurística que se basa en ponderaciones posicionales. Además, el objetivo del estudio consistió en determinar el número de estaciones teniendo en cuenta pruebas de eficiencia y la simulación de Montecarlo.

De la misma manera, Reginato et al. (2016) aplican en una línea de ensamble mixta una heurística de balanceo de líneas titulada RPW objetivo móvil (RPW-AVM), que se basa en la heurística de los pesos posicionales RPW para equilibrar las líneas de producción sujetas a diferentes mezclas de productos y así aliviar las restricciones de capacidad en las estaciones de trabajo y aumentar la eficiencia del equilibrio.

La heurística RPW ha sido analizada junto con otros procedimientos como lo es el método LCR (*Largest Candidate Rules*), el cual por sí solo consiste en brindarle prioridad en la asignación a las tareas cuyo tiempo de duración es mayor. Fahin & Banuwati (2018) realizaron un estudio de caso de Beam Comp Stering Hanger, el cual tuvo como objetivo minimizar el número de horas de trabajo de su línea de producción a través de la comparación de dos métodos de equilibrio de línea heurística como RPW y LCR. Al aplicar este método, la empresa aumentó la eficiencia de su producción y disminuyeron los tiempos de retrasos.

Por su parte, Harikrishnan et al.(2020) realizaron un estudio en la línea de embalaje Poly-cover Rs. 7.2 Lakhs en una industria fabricante de máquinas agrícolas, con el objetivo de eliminar residuos, disminuir el tiempo takt, automatizar y equilibrar la línea. A través del estudio se identificó el problema, el cual estaba asociado con el equilibrio de la línea y su automatización. Para esto implementaron una heurística RPW, obteniendo de esta manera el aumento de sus ingresos a través de la reducción de los costos de fabricación y la fidelización de sus clientes.

Otro claro ejemplo de esta metodología la ilustra (Iwan, 2018), dentro del artículo se presentó un problema de congestión encontrado en una de las secciones de la línea de ensamble de una industria que fabrica calzado en Indonesia. El objetivo principal de la investigación fue optimizar el tiempo de ciclo garantizando de esta manera el flujo de materias primas y bienes intermedios entre cada estación de trabajo, como método de solución se implementaron conceptos básicos del balanceo de línea con el fin de evaluar mejoras que se podrían obtener al mover los puestos de trabajo existentes en el área de producción de forma paulatina. Como resultado se obtuvo un cambio de distribución y un total de 18 estaciones mejorando con esto la eficiencia a un 93.38 %.

Por otro lado, la asignación de tareas al conjunto mínimo de estaciones juega un papel importante al momento de balancear las líneas de ensamble. De acuerdo con lo anterior, Baskar & Anthony Xavier (2019) propusieron y analizaron algunas heurísticas como Hoffman, Dar-El para el problema SALBP-I y de esta manera ordenar los trabajos y asignarlos a una estación de trabajo.

6.2.3 Métodos de solución metaheurísticos.

Inicialmente se encontró que Zhao & De Souza (2000) aplican un esquema de equilibrio de línea de producción inteligente basado en la simulación, donde su objetivo era determinar las especificaciones de variables ajustables en una línea de producción para mejorar el rendimiento y evitar desniveles. El método que proponen emplea un algoritmo genético que integra la simulación por computadora para lograr soluciones óptimas. Por otro lado, se discute una codificación cromosómica de matriz real, una selección cromosómica parabólica, y se aborda una implementación detallada en el entorno de simulación ExtendTM y se presenta un estudio de caso realista enfocado en una industria de unidades de disco duro.

La integración de métodos heurísticos ha sido utilizada en otras investigaciones. Tal es el caso de Huo et al. (2018) quienes utilizaron en su artículo un enfoque híbrido, donde ejecutaron un algoritmo de colonia de hormigas en combinación con la búsqueda por haz ACO-BS para resolver el (SALBP). La investigación que realizaron en este artículo es de tipo básica y es simulada en varios escenarios, ya que el objetivo principal era minimizar el número de estaciones de trabajo para un tiempo de ciclo fijo determinado, buscando mejorar la calidad de la solución y acelerar el proceso de búsqueda.

Rubiano-Ovalle & Arroyo-Almanza (2009) aplican un método de solución a un problema de línea de ensamble serial de dos lados, donde se implementan algoritmos meméticos usando el programa Matlab en una línea de ensamble de motos en una empresa local de motocicletas en Cali (Colombia), esto con el fin de minimizar el número de estaciones y de ese modo, satisfacer el tiempo *Takt*, que corresponde al ritmo en el que las unidades deben ser producidas para cumplir con las exigencias de los consumidores.

6.2.4 Métodos de solución con herramientas de manufactura esbelta.

López et al., (2011) implementaron el concepto de filosofía esbelta para el balanceo de líneas en una empresa que elabora sistemas de seguridad, donde su propósito es disminuir los tiempos en su línea de producción porque sus operaciones no habían sido balanceadas y no se había establecido un trabajo y tiempo estándar para cada operario, lo que ocasionaba caos en la organización. Gracias a esa filosofía, la empresa logró entender que no es importante tener un número mayor de operarios para que se generen más piezas; si no lo que realmente importa es que los operarios mantengan un ritmo de trabajo uniforme con equilibrio de cargas.

Por su lado Qattawi & Chalil Madathil (2019) presentaron un método para diseñar líneas de ensamble de producción automotriz que integran enfoques de manufactura esbelta y el desarrollo de un algoritmo de agrupamiento e índice de mutualidad de labores para cada una de las tareas de ensamble, con la finalidad de rediseñar y reequilibrar una línea de producción de ensamble con un diseño y maquinaria fijas, donde se tuvo en cuenta la variabilidad de la demanda del producto y la introducción de nuevos modelos de productos.

Las Tablas 1 y 2 exponen cada uno de los artículos que son tenidos en cuenta en la investigación como referencias al tema de investigación.

Tabla 1.

Artículos que emplean soluciones al problema de balanceo de línea.

Tipo de problema	Método de solución	Industria	Cita
SALBP-1		Genérico	Jaramillo, A., & Restrepo, J (2010)
MOALBP	Exacto	Farmacéutica	Orejuela y Flórez (2019)
SALBP-I y SALBP II		Planta de ensamblaje de computadoras	Hazir, Delorme, & Dolgui (2015)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.

Artículos que emplean soluciones a balanceo de línea. Parte II.

Tipo de problema	Método de solución	Industria	Cita
TALBP-I y TALBP-II	RPW	Genérico	Li, Kucukkoc & Nilakantan (2017)
ALB	RPW y LCR	Empresa de producción (línea de ensamblaje mixta)	Reginato, Anzanello, Kahmann & Schmidt (2016)
SALBP-I	Hoffman Dar-El	De fabricación	Baskar & Xavior (2020)
SALBP	Algoritmo de colonia de hormigas	Manufacturera	Huo et al (2018)
TALBP	Algoritmos meméticos	Línea de ensamble de motos	Rubiano y Arroyo (2009)

Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, es posible evidenciar que los métodos más usados son exactos, y la mayoría de ellos son enfocados a problemas tipo SALBP-1 y SALBP-2 en diferentes tipos de industria porque a través de ellos se obtienen resultados positivos que se ven reflejados en los factores de productividad o en su defecto en la eficiencia de los procesos. Además, se puede apreciar en las tablas que otros métodos bastante utilizados son los heurísticos y metaheurísticos, pues son métodos sencillos y brindan una solución factible a problemas que no tienen solución exacta.

7. Caracterización del proceso productivo de baterías plomo-ácido

7.1. Generalidades

Antes de describir el proceso productivo de fabricación de baterías plomo-ácido, es importante resaltar que este mercado ha venido creciendo en Colombia, debido al aumento del parque automotor, el cual se ha visto influenciado por la compra de automóviles nuevos (“ABC Economía » Baterías automotrices, un mercado en crecimiento,” n.d.)

De acuerdo con el Departamento de Mercados y Estadísticas de Asopartes se presentó un incremento significativo en la venta de autos, por esta razón las baterías juegan un papel importante ante esta tendencia, debido a que la mayoría de los vehículos cuentan con diversas tecnologías y accesorios que exigen una mayor demanda de energía, como sistemas *Start Stop* y las baterías con tecnología AGM (separador de vidrio absorbente o *Absorbent Glass Mat*, por sus siglas en inglés) que no son la excepción *ABC Economía » Baterías Automotrices, Un Mercado En Crecimiento*, n.d.)

7.2 Descripción del proceso productivo

El proceso de fabricación comienza cuando un montacargas toma la estiba de cintas, y el operario hala la cinta (1 min/0,20 m). Cada estiba contiene 3 rollos de cinta. Después de 1 min, un operario se encarga de empalmar ambas cintas, es decir la cinta antigua con el nuevo rollo de cinta (2,97 min), y esto lo hace con la ayuda de una maquinaria manual.

Al tener la cinta en la posición deseada, se enciende la máquina y se inicia la transformación del material.

La cinta de plomo es traccionada por las máquinas siguientes desplazándose (2,37 m/0,83 min) hasta llegar a la primera máquina, donde recibe innumerables perforaciones (0,5 min). Mientras sigue avanzando, para evitar sobrecalentamiento en las herramientas de corte, se le aplica un refrigerante; luego la cinta traccionada pasa por la expansora, expandiendo la rejilla (0,17 min), recibiendo así el tamaño que se necesita, convirtiéndose en una malla continua.

Posteriormente, la cinta es transportada unos 123 m (0,5 min), hasta llegar a la troqueladora con el fin de identificar cada placa y facilitar el corte más adelante; debido a que la troqueladora emite desechos o recortes de plomo. Después, se dirige a la empastadora, recorriendo unos 2,43 m (0,67min), para convertir las rejillas unidas que se encuentran en proceso en las placas necesarias. Luego, se procede a agregarles papel y una mezcla a las placas.

La mezcla es preparada en la planta de producción de la siguiente manera: el proceso inicia con la espera del montacargas (5min), luego traen la cinta de la máquina mezcladora, la cual se encuentra ubicada en la parte superior de la empastadora (justo donde entra la mezcla al proceso), esta se encuentra conectada directamente a la línea de producción. Además, la máquina también posee ductos o tuberías conectadas por donde se le suministra el material necesario para la elaboración de la mezcla.

Después de realizar la mezcla, esta ingresa por medio de un ducto conectado directamente a la máquina empastadora. Al tener ambos materiales, las rejillas son empastadas (0,34 min) y llevadas (1,60 m en 0,42 min) más adelante para ser cortadas (1,5 min) y secadas lentamente para evitar que se dañen por la interacción inmediata con el ambiente (1,5 min).

Finalmente, las placas pasan por el túnel de tocado (el túnel de tocado está al final del horno y regula la temperatura para que no se produzca un choque térmico al salir las placas del horno),

llegando a la piladora, donde dos operarios se encargan de colocarlas en un almacenamiento temporal (0,40 m/ 0,08 min). En este almacenamiento temporal, el lote de placas espera unos 180 min aproximadamente para ser llevadas a cuartos de curado o secado, donde recorren unos 2,5 m (1,5 min) con ayuda del montacargas.

Para la operación siguiente se tienen dos opciones, la primera es que el lote de placas entre a cámaras automáticas, donde el secado y curado se hacen en 48 h (2880 min); la otra opción son cámaras un poco antiguas donde los lotes demoran 42 horas (2520 min) en curado y 48 horas (2880 min) en secado. Por último, son almacenadas, y la distancia varía dependiendo del espacio que esté disponible.

Las Figuras 4-6 ilustran el proceso de una manera sencilla y ordenada, facilitando su comprensión.

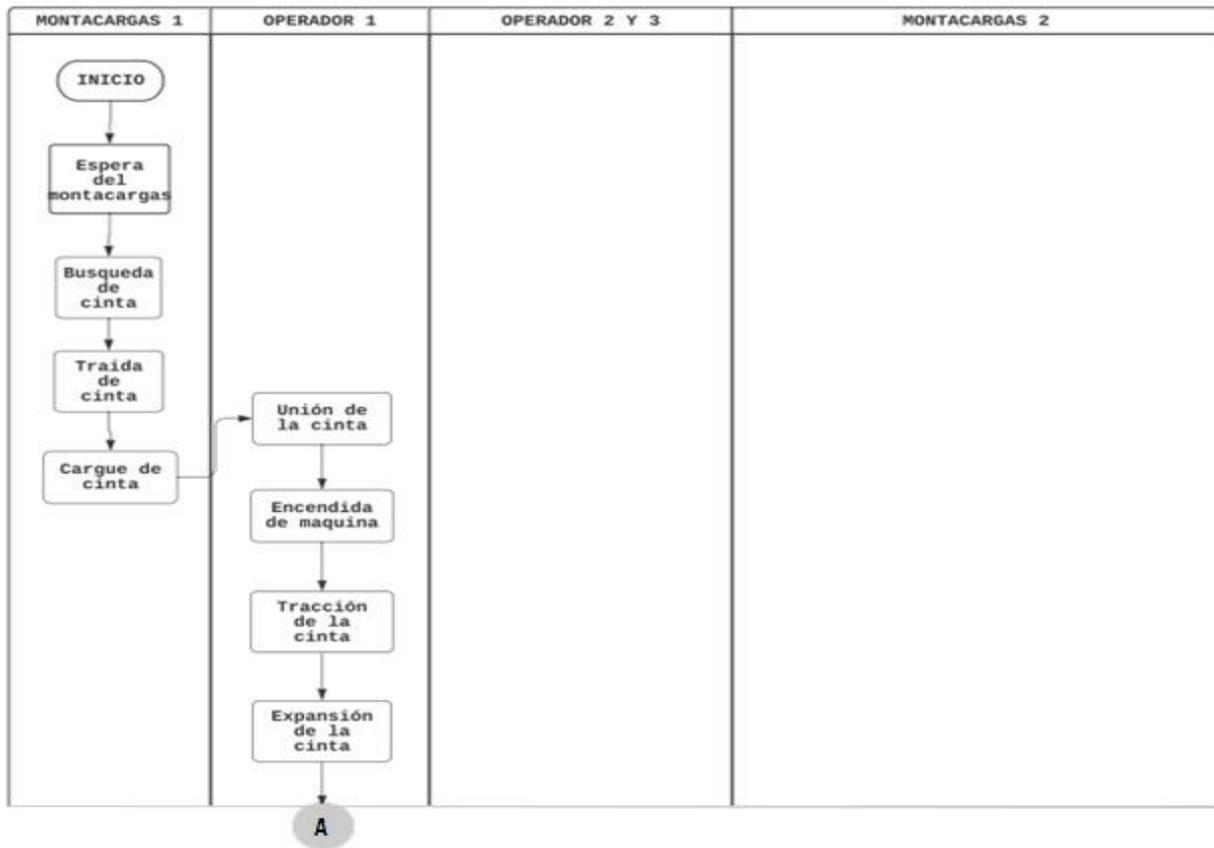


Figura 4. Diagrama del proceso de fabricación de baterías plomo-ácido. Fuente: Elaboración propia

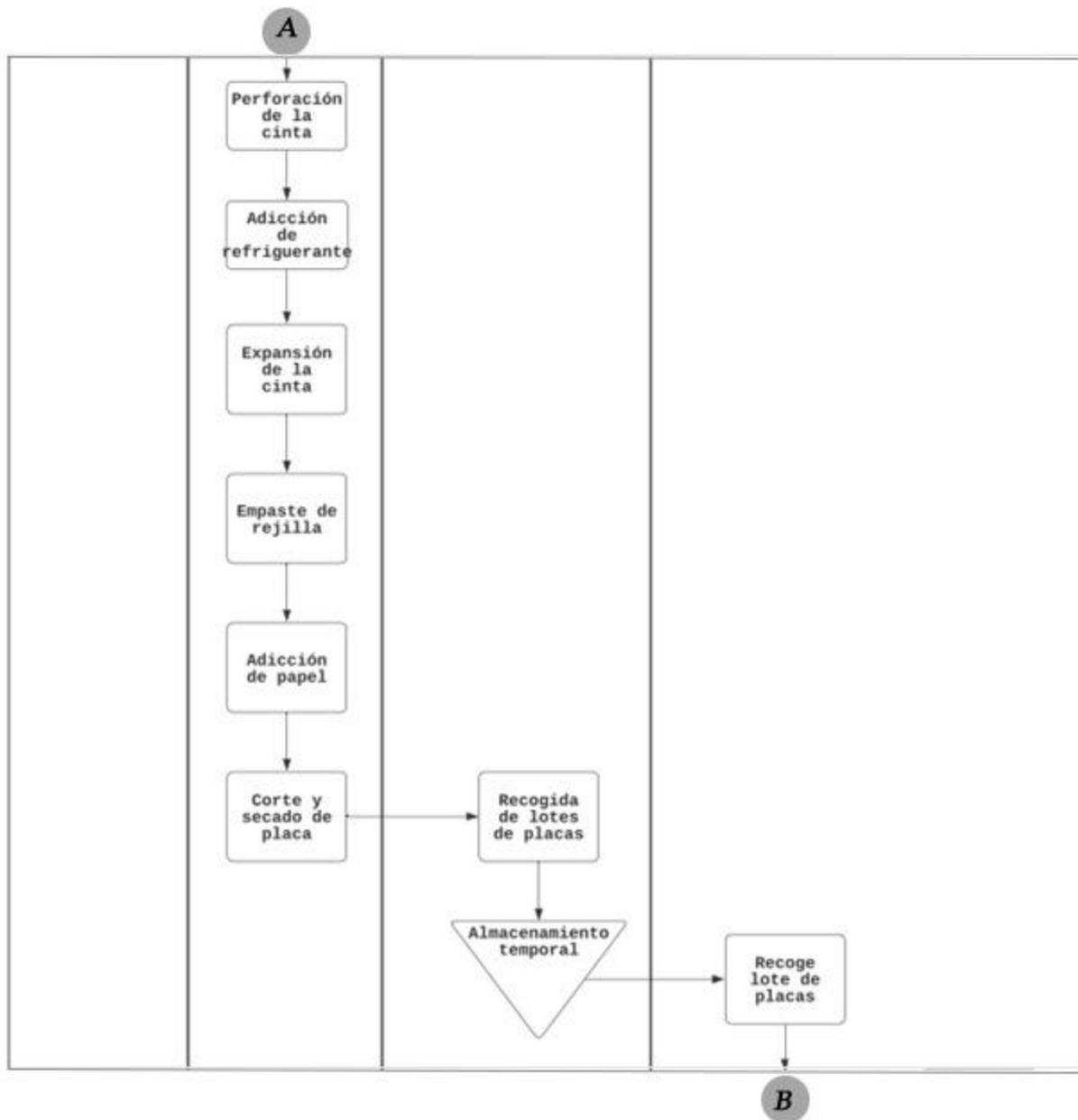


Figura 5. Diagrama del proceso de fabricación de baterías plomo-ácido (Continuación II).

Fuente: Elaboración propia

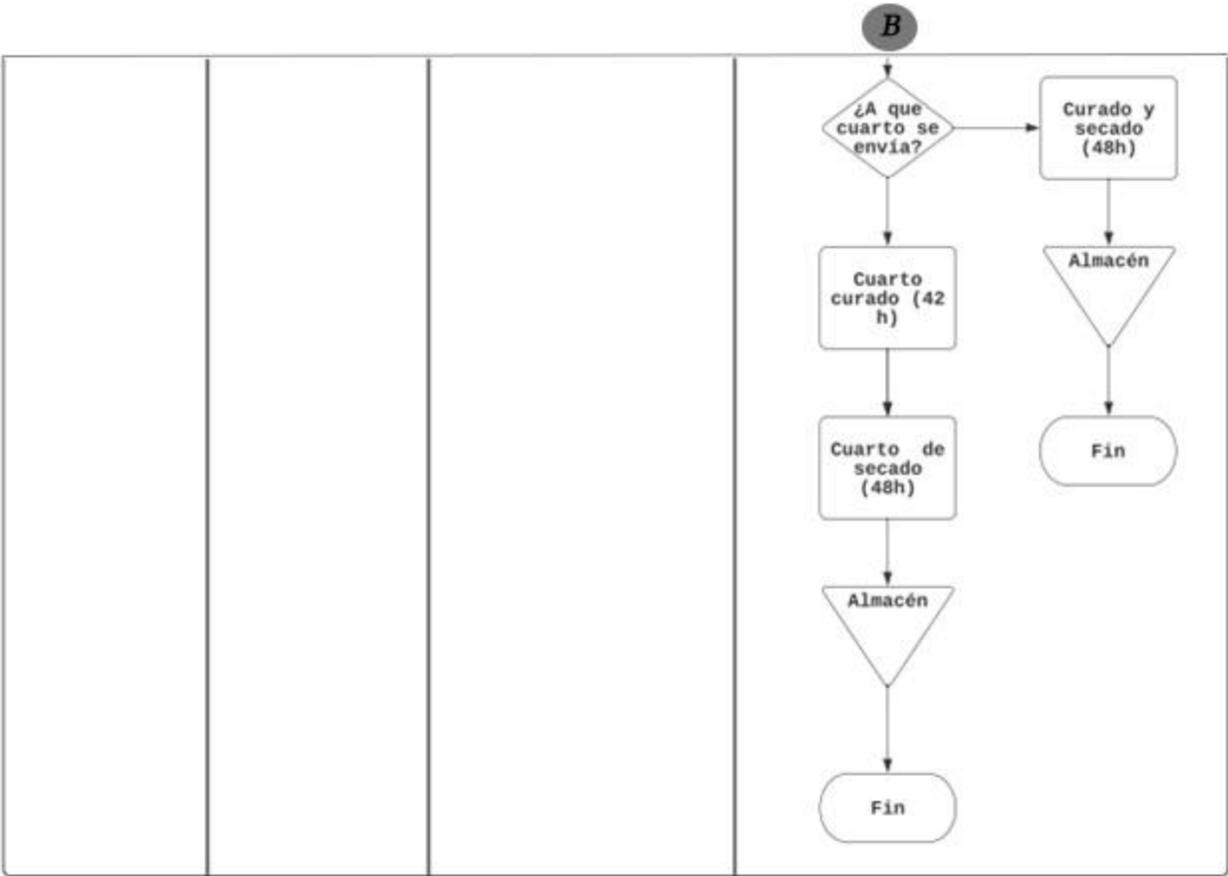


Figura 6. Diagrama del proceso de fabricación de baterías plomo-ácido (continuación III).

Fuente: Elaboración propia

8. Implementación del método de solución

Al tratarse de un problema de balanceo de línea en el que el objetivo radica en brindar una mejora al proceso evitando retrasos por medio de la optimización de los recursos es necesario tener en cuenta los resultados obtenidos en el estudio de métodos y tiempos (tiempos de procesado estandarizados por actividad); para de esta manera realizar la respectiva selección del método de solución, posteriormente para determinar cuál es el método a utilizar se comenzó a identificar los datos que se tenían como: tiempo de procesado y número de estaciones vs los que se desconocían: tiempo de ciclo. A partir de esto, surgen métodos de solución como la implementación de una heurística, metaheurística o método exacto. Para determinar cuál era el método más adecuado se tuvo en cuenta las variables mencionadas anteriormente y también cual era el que arrojaba una solución factible que se acerque lo más posible a la óptima.

Finalmente, se elige el método más pertinente es el exacto, dentro de estos los más utilizados son los SALBP 1 y 2; después se verificó que parámetros exige cada uno y se evidencia que para el SALBP-2 no se poseen los datos necesarios, es por eso que se decide implementar el SALBP tipo 1.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza un análisis de los datos para verificar que se cuenta con la información necesaria para la implementación del SALBP. De esta forma, se identifica que existan actividades manuales que requieren el cálculo estandarizado de su duración.

8.1. Estandarización de tiempos

En la Figura 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es posible apreciar los tiempos tomados gracias a conceptos básicos de métodos y tiempos, donde se tienen en cuenta las

actividades manuales que están afectando el proceso productivo para luego ser estandarizadas y así determinar el tiempo en que la tarea debe realizarse.

ANALISTAS: Ana Riquett & Esteban Navas													
O P E R A R I O	ELEMENTOS	NÚMERO DE CICLOS					ACTIVIDAD: Fabricación de placas positivas y negativas						
		TIEMPO DEL ELEMENTO (s)											
		1	2	3	4	5	Σ T	(Σ T)2	Σ T2	n'	N	T̄	
1	Halar y acomodar	R	31	23	25	22	27						
		A	31	23	25	22	27	128	16384	3328	5	25	25,6
1	Pegar	R	109	51	56	57	59						
		A	140	74	81	79	86	223	49729	12467	4	405,59	55,75
1	Quitar excesos	R	35	24	19	21	26						
		A	175	98	100	100	112	125	15625	3279	5	78,85	25
2	Desmontar rollo antigua	R	25	26	25	21	27						
		A	25	26	25	21	40	124	15376	3096	5	10,82	24,8
2	Montar rollo nuevo	R	41	43	39	49	25						
		A	66	69	64	70	65	197	38809	8077	5	64,97	39,4
2	Cuadrar	R	30	99	39	95	97						
		A	96	168	103	165	162	360	129600	30656	5	292,35	72

Figura 7. Tiempos por actividad (en segundos). Fuente: Elaboración propia

Las equivalencias incluidas en la Figura 7 son:

- R, representa los tiempos restados
- A, representa los tiempos acumulados
- ΣT representa la sumatoria de todos los tiempos tomados. La fórmula para determinar su valor es la siguiente:

$$\sum T = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n \tag{1}$$

- (ΣT)² representa: la sumatoria de todos los tiempos elevada al cuadrado. Cuya fórmula se ilustra a continuación

$$(\sum T)^2 = (T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n)^2 \quad (2)$$

- $\sum T^2$ representa:

$$\sum T^2 = T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + \dots + T_n^2 \quad (3)$$

- n, es el número de datos
- N, representa:

$$N = \left[\frac{40 \times \sqrt{(4 \times \sum T^2) - (\sum T)^2}}{\sum T} \right]^2 \quad (4)$$

- \bar{T} se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{T} = \frac{\sum T}{n} \quad (5)$$

Para su determinación, fue necesario medir el tiempo de duración de cada una de las actividades que hacen parte de la línea en estudio. Para simplificar la toma de tiempos, cada actividad, a su vez, está dividida por elementos. A continuación, se describe el detalle de cada actividad incorporada en la Figura 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y sus respectivos elementos.

- Actividad 1 - Pegado de la cinta: Esta operación se realiza cuando se acaba un rollo de cinta, el operario tiene que halar el rollo, y usar la máquina para unir el rollo nuevo con el sobrante. Después, el operario retira los excesos de plomo sobre la pega para continuar la producción.

Elementos: Halar y acomodar, pegar, y quitar excesos.

- Actividad 2 - Cambio de papel: Esta operación se realiza cuando se terminan los rollos de papel que se utilizan en la empastadora; el operario primero debe retirar la base del rollo antiguo, luego colocar los nuevos y finalmente acomodar el papel para poner en marcha la producción.

Elementos: Desmontar rollo antiguo, montar rollo nuevo, y cuadrar.

Cabe resaltar que el tiempo indicado en color amarillo en la Figura 7 es un tiempo atípico, generado por una distracción del operario encargado, por lo que se elimina.

Del mismo modo, mediante el estudio de métodos y tiempos se valoró el ritmo de trabajo de trabajo actual de cada una de las operaciones que presentan cuellos de botellas y retrasos para luego normalizar el tiempo básico de trabajo; es decir, estandarizar el tiempo que requiere cada operador para realizar la actividad (Anexo 3).

8.2. Diagrama analítico

Con el propósito de determinar las precedencias entre actividades, se hace necesario tener un diagrama analítico. Dicha representación gráfica se presenta en las Figuras 8-9, las cuales resumen el proceso de fabricación de baterías plomo-ácido.



Figura 8. Diagrama Analítico. Fuente: Elaboración propia.

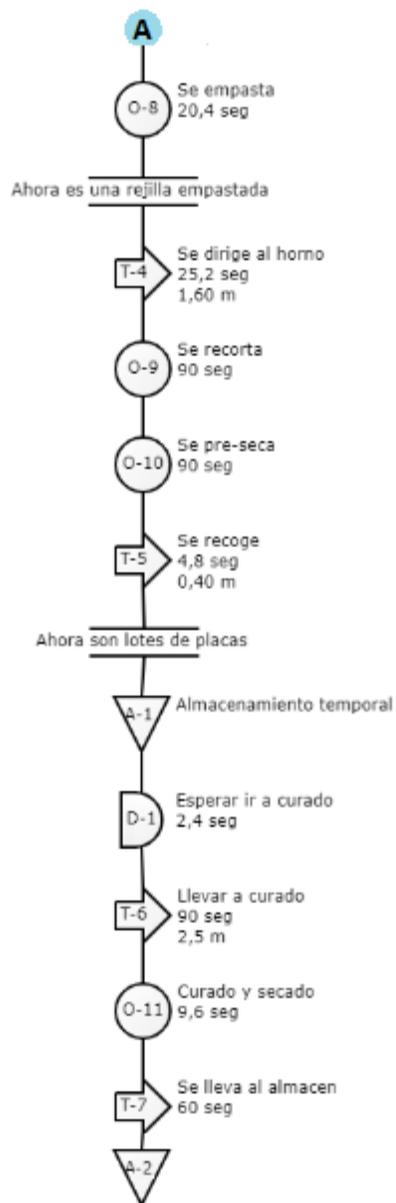


Figura 9. Diagrama Analítico parte II. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 es posible apreciar cómo se identifican las actividades en el diagrama de precedencias (letra y número asignados para su representación). Por ejemplo, a la actividad A se le asigna el número 1, a la actividad B el número 2, y así sucesivamente hasta llegar a la actividad L identificada con el número 12.

Tabla 3.

Identificación de las Actividades en el diagrama de precedencias y en el código.

Nodo	Equivalente en número	Actividad que representa
A	1	Halada de cinta
B	2	Empalme de cinta
C	3	Tracción de cinta
D	4	Aplicar refrigerante
E	5	Pasa a la perforadora y expansora
F	6	Pasa a la troqueladora
G	7	Pasa a la empastadora
H	8	Preparación de mezcla
I	9	Se empasta
J	10	Se dirigen al horno, son cortadas y pre-secadas
K	11	Pasan a curado
L	12	Son llevadas al almacenamiento

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que para realizar la identificación de las actividades E, J y K se unieron diferentes actividades que son dependientes una de las otras. Esta decisión obedece a que al momento de tomar los tiempos es difícil tomarlos por separado debido a que dichas actividades se realizan en simultáneo y requieren las mismas precedencias; por otra parte, las operaciones

realizadas dentro del horno son imposibles de visualizar por lo que también son unidas. De esta forma las operaciones que integran cada actividad anteriormente señalada son:

- En la actividad E, pasa a la perforadora y expansora se unen las operaciones: se perfora y se expande.
- En la actividad J, se dirigen al horno, son cortadas y pre-secadas se unen las operaciones: se dirige al horno, recortan y secan previamente.
- Finalmente, en la actividad K, pasan a curado se unen las operaciones: esperar ir a curado más curado y secado.

8.3. Desarrollo del balanceo de línea

Paso 1. Elaboración del diagrama de precedencias

Para la modelación del problema como un SALBP se inicia con la elaboración del diagrama de precedencias (Figura 10; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), el cual no es posible entender sin observar la Tabla 4, correspondiente a la precedencia de las tareas.

Para su elaboración se consideró como insumo el proceso de fabricación, específicamente si se realiza por placas o por rollo de cinta. Teniendo en cuenta lo anterior, la toma de datos para las actividades: hala la cinta, empalmar, son llevadas a curado y llevadas al almacén, se realiza con respecto al número de placas producidas. En tanto que, los datos del resto de las actividades al ser semiautomatizadas se tomaron basándose en la velocidad a la que trabajan las máquinas, en este caso a 41 m/s.

Tabla 4.*Tabla de precedencias.*

Nodo	Actividad que le precede
A	-
B	A
C	B
D	C
E	D
F	D, E
G	F
H	-
I	G
J	I
K	J
L	K

Fuente: Elaboración propia

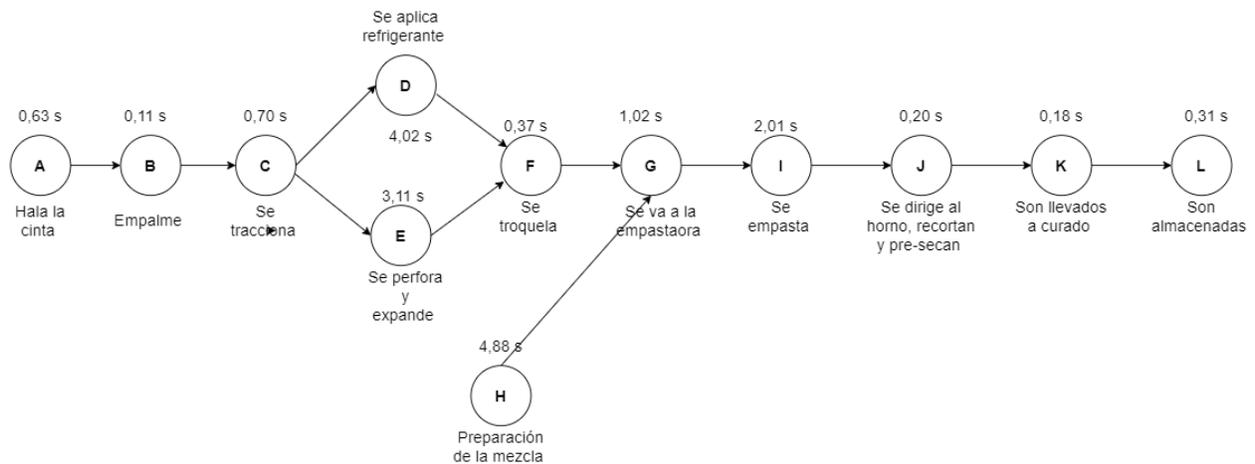


Figura 10. Diagrama de precedencias. Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que en el diagrama de precedencias (Figura 10), el nodo H corresponde a una actividad independiente a las demás, siendo esta la fabricación de la mezcla.

Ahora bien, teniendo en cuenta que el objetivo del balanceo es disminuir el número de estaciones, se plantean las restricciones representadas en la Figura 13. Lo anterior, con el fin de que la suma de los tiempos de las actividades en cada estación no sea superior al tiempo de ciclo. Así mismo, se tiene en cuenta que una tarea no puede ser dividida; sino que debe estar en una sola estación. Por último, el tiempo total de procesamiento en cada estación debe ser exactamente igual a la sumatoria de los tiempos de las tareas de la línea de producción.

Paso 2. Determinación del tiempo de ciclo (C)

De acuerdo con Sataloff et al. (2020) la capacidad es definida como la restricción dada por el cuello de botella, siendo este la actividad con mayor tiempo de ciclo. Por tanto, la producción de la planta se limita a una pieza por cada ciclo (C). Este tiempo de ciclo puede ser igual o distinto al tiempo de entrega ya que hay colas y/o retrasos en el proceso.

Con base en lo anterior, el tiempo de ciclo se toma teniendo en cuenta el tiempo con mayor capacidad de restricción, el cual equivale al tiempo de la actividad H que corresponde a la preparación de la mezcla en el diagrama de precedencia, es decir, 4.88 segundos.

Paso 3. Determinación del número mínimo de estaciones

Número mínimo de estaciones (N_t): Para determinar el N_t se utiliza la Ecuación 6 (Chase et al., 2009)

$$N_t = \frac{\text{Suma de tiempos de las tareas (T)}}{\text{Tiempo del ciclo (C)}} \quad (6)$$

Según el tiempo de ciclo seleccionado a partir de la teoría y los tiempos de las tareas descritas en la Ecuación 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se procede al cálculo del número mínimo de estaciones requeridas para el balanceo de línea.

$$N_1 = \frac{17,54 \text{ s}}{4,88 \text{ s}} = 3,59 \approx 4 \text{ estaciones} \quad (7)$$

Paso 4. Definición del modelo matemático

A continuación, se incluye la formulación del modelo matemático para la representación del problema como un SALBP-1.

- **Conjuntos**

i : Actividades, $i = 1, \dots, m$

j : Estaciones, $j = 1, \dots, n$

- **Variables de decisión y parámetros:**

Variables

$tacum_j$: Tiempo acumulado hasta la estación j

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la actividad } i \text{ es realizada en la estación } j \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{si existe la estación } j \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Parámetros

t_i : duración de la actividad i

c : tiempo de ciclo

- **Función Objetivo**

La función objetivo busca minimizar el número de estaciones

$$Z_{min} = \sum_{j=1}^{Mmax} y_j$$

- **Restricciones**

La primera restricción (rest1) representa que la sumatoria de los tiempos por estación no debe exceder el tiempo de ciclo.

$$rest1: \sum_{i=1}^n t_i x_{ij} \leq c y_j; \quad \forall j = 1, \dots, n$$

La segunda restricción (rest2) representa que una actividad solo puede ser asignada a una sola estación, es decir, una actividad no puede estar en dos estaciones.

$$rest2: \sum_{j=1}^{Mmax} x_{ij} = 1; \quad \forall i = 1, \dots, Mmax$$

La tercera restricción (rest3) garantiza que se asignen de manera ordenada las actividades a las estaciones de trabajo.

$$rest3: y_{j+1} \leq y_j; \quad \forall j = 1, \dots, Mmax - 1$$

La cuarta restricción (preced) representa el cumplimiento de las relaciones de precedencia.

$$preced: \sum_{j=1}^{Mmax} jx_{kj} \leq \sum_{j=1}^{Mmax} jx_{ij}; \quad \forall k < i$$

Naturaleza de las variables:

$$tacum_j \geq 0, \quad \forall j$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \forall i,j$$

$$y_j = \{0,1\} \forall j$$

9. Resultados

9.1. Programación del modelo en GAMS

Para la implementación del algoritmo se utilizó el Sistema General de Modelaje Algebraico (GAMS), versión 31.2.0 y el solver CPLEX, en un computador Intel® Core i7 de 8th generación, 8565U con 1.80 GHz de procesador, 4 GB de RAM y sistema operativo Windows 10.

En el portafolio de software shop se afirma que “GAMS se encuentra diseñado específicamente para suplir dos necesidades: modelar problemas de optimización lineales, no lineales y mixtos, y realizar programación matemática” (“Software Shop - GAMS,” n.d.)

A continuación, se describe el código empleado para la solución del problema. En la Figura 11 es posible apreciar dos conjuntos “i” y “j”, el primero representa las actividades y el segundo las estaciones de trabajo.

```
SETS  
i actividades /1*12/  
j estaciones /1*10/ ;
```

Figura 11. Conjuntos “i” y “j”. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente en la se aprecian los parámetros dentro del código que están dados por el tiempo de procesamiento “t (i)” y el tiempo de ciclo “c”. A continuación, se encuentra la primera variable “z” la cual hace referencia a la función objetivo. Luego se declaran el resto de las variables. Dentro de las variables positivas se encuentra el tiempo acumulado de cada estación “tacum (j)” y por otra parte en las variables binarias se tiene a “x (i, j)” y “y (j)” las cuales representan en su orden: 1) la asignación de la actividad i a la estación j, y 2) la variable que decide si la estación j es utilizada o no.

SCALAR

c tiempo de ciclo /4.88/;

PARAMETERS

t(i) /1=0.63, 2=0.11, 3=0.70, 4=4.02, 5=3.11,6=0.37,
7=4.88, 8=1.02, 9=2.01, 10=0.20, 11=0.18,12=0.31 /;

FREE VARIABLES

z Cantidad total de estaciones ;

POSITIVE VARIABLES

tacum (j) tiempo acumulado de cada estacion ;

BINARY VARIABLES

x(i,j) la actividad i es asignada a la estacion j

y(j) la estacion j es utilizada ;

Figura 12. Parámetros y Variables. *Fuente:* Elaboración propia.

A partir del modelo matemático de la metodología escogida (SALBP-1) el cual está basado en la teoría de restricciones de Goldratt, se procede a la declaración de las restricciones, siendo estas las reglas para el balanceo de líneas incluidas en la Figura 13.

```

fobj.. z =E= sum (j,y(j));
rest1(j).. sum (i, t(i) * x(i,j)) =L= c * y(j) ;
rest2(i).. sum(j, x(i,j))=E= 1;
rest3(j)$ (ord(j)<= (card(j)-1)).. y(j+1) =L= y(j);

*restricciones de precedencia*

preced1.. sum(j, ord(j) * x('1',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('2',j));
preced2.. sum(j, ord(j) * x('2',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('3',j));
preced3.. sum(j, ord(j) * x('3',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('4',j));
preced4.. sum(j, ord(j) * x('3',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('5',j));
preced5.. sum(j, ord(j) * x('4',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('6',j));
preced6.. sum(j, ord(j) * x('5',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('6',j));
preced7.. sum(j, ord(j) * x('6',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('8',j));
preced8.. sum(j, ord(j) * x('7',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('8',j));
preced9.. sum(j, ord(j) * x('8',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('9',j));
preced10.. sum(j, ord(j) * x('9',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('10',j));
preced11.. sum(j, ord(j) * x('10',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('11',j));
preced12.. sum(j, ord(j) * x('11',j)) =L= sum(j, ord(j) * x('12',j));

tiempoacum(j).. tacum(j)=e= sum(i, t(i) * x(i,j));

```

Figura 13. Restricciones del código. Fuente: Elaboración propia

9.2 Solución del modelo

La Figura 14, incluye el nivel de la variable $x(i, j)$, el cual permite visualizar la asignación óptima de cada una de las actividades a las estaciones. De lo anterior, se puede inferir que las actividades A, B, C y E son asignadas a la estación 1; las actividades D y F son asignadas a la estación 2; la actividad G es asignada a la estación 3 y, por último, las actividades H, I, J, K y L son asignadas a la estación 4.

```

----      66 VARIABLE x.L  las actividades i es asignada a la estacion j
          1          2          3          4
1         1.000
2         1.000
3         1.000
4         1.000
5         1.000
6         1.000
7         1.000
8         1.000
9         1.000
10        1.000
11        1.000
12        1.000

```

Figura 14. Resultado de la variable x. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la variable $y(j)$ arrojó un número óptimo de estaciones (Figura 15), de manera que se disminuye el número de estaciones y se equilibra el trabajo, pues dentro de los parámetros de entrada se ingresó un total de 10 estaciones, y el algoritmo organizó las actividades de tal manera que redujo este número a 4, siendo esta la cantidad obtenida por medio de la aplicación de la ecuación 6, garantizando así el funcionamiento óptimo de la línea.

```

----      68 VARIABLE y.L  la estacion j es utilizada
1 1.000,   2 1.000,   3 1.000,   4 1.000

```

Figura 15. Resultado variable y. Fuente: Elaboración propia

9.3 Eficiencia de la solución

La propuesta de mejora consistió en solucionar el SALPB-1 de forma exacta, con el fin de mejorar la productividad de la línea de ensamble, pero al mantenerse los tiempos de producción iguales en ambos escenarios (actual y propuesto), se decidió medir el impacto de la propuesta con un indicador como lo es la eficiencia; por lo que se procede en primera instancia con el cálculo de esta, teniendo en cuenta el escenario actual, el cual consta de 10 estaciones mientras que el mejorado consta de 4 estaciones.

Para determinar la eficiencia se utiliza la Ecuación 7 (Heizer & Render, 2009), la cual ha sido utilizada para el mismo fin en investigaciones similares demostrando su aplicabilidad y pertinencia (Decana, 2020; Miño, Moyano, & Santillán, 2019).

$$Eficiencia = \frac{\Sigma \text{Tiempo de tareas}}{\text{Número de estaciones} * \text{tiempo de ciclo}} \quad (7)$$

En la Tabla 5 se puede evidenciar un incremento del 53,92% de la eficiencia. Teniendo en cuenta que esta es la capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función, este indicador nos permite afirmar que, en caso de una implementación, se mejoraría significativamente la utilización de la línea de ensamble, sacando un buen provecho de la capacidad de la misma, pasando así de un 35,94% (antes de la mejora) a un 89,86% (después de la mejora).

Tabla 5.*Cálculo de la eficiencia.*

	Actual	Mejorado
Tiempo de tarea (s)	17,54	17,54
Número de estaciones	10	4
Tiempo de ciclo (s)	4,88	4,88
Eficiencia	35,94%	89,86%

*Fuente: Elaboración propia***9.3.1 Recomendaciones adicionales.**

Adicionalmente, se le pueden aportar a la empresa en estudio algunas recomendaciones como:

- Planear desde el área administrativa en conjunto con el Departamento de Mantenimiento, un mantenimiento preventivo y/o correctivo para garantizar la vida útil de todos los elementos que hacen parte del proceso de producción
- Reorganizar la línea de producción, de forma tal que se evidencien las diferentes estaciones de trabajo, y así cuando una estación tenga problemas se logre observar cuál es y minimizar el tiempo ocioso.
- Realizar un plan de seguimiento a cada uno de los procedimientos del Departamento de Mantenimiento con el objetivo de verificar que estén siendo eficientes al momento de presentarse algún inconveniente.
- Escoger el ritmo de trabajo más adecuado para las actividades manuales, y de esta manera realizar entrenamientos a los nuevos trabajadores de la empresa y capacitar a los que

tengan un menor ritmo en el oficio con técnicas que les permitan agilizar el proceso, para así evitar pérdidas de tiempo y paradas prolongadas de la línea de producción.

- Incentivar a los colaboradores a través de jornadas de capacitación con el fin de aumentar sus capacidades técnicas, permitiendo el reconocimiento personal y grupal, lo cual lleva consigo al incremento del desempeño productivo de la empresa.

10. Conclusiones

El presente trabajo de grado permitió proponer una solución factible al problema de balanceo de líneas en una empresa fabricante de baterías plomo-acido para autos, logrando disminuir el número de estaciones que existen en la línea de placas expandidas; esto le brinda a la línea de ensamble una mejor tasa de eficiencia y eficacia.

A partir de la caracterización del proceso se logró tener información más detallada sobre el proceso productivo y así lograr identificar cada una de sus etapas, su descripción, su tiempo de duración y los elementos utilizados; cabe resaltar que durante el proceso el equipo investigador identificó fallas o problemáticas que afectan el proceso productivo como lo son: la falta de planificación de la producción según la demanda, la ausencia o poca frecuencia de los mantenimientos preventivos de la maquinaria y la poca capacitación del personal de la línea en específico. Asimismo, a través de la revisión literaria se pudo tener más claridad sobre cada uno de los métodos de balanceo para así escoger el más pertinente para el caso estudio.

De igual manera, el balanceo de línea de ensamble consistió en asignar todas las tareas a una serie de estaciones de trabajo de modo que cada una de ellas no superará el tiempo de ciclo y que el tiempo inactivo de todas las estaciones de trabajo sea el menor posible; gracias a esto, fue posible obtener una reorganización de las actividades minimizando el número de estaciones, pues una tarea no causaría retraso a la otra si se cumple con la propuesta.

Por otro lado, dentro de las oportunidades para futuras investigaciones se puede mencionar la implementación de técnicas de distribución de planta para una reorganización física de la línea y así buscar mejorar aún más la productividad y la eficiencia en los movimientos y desplazamientos.

También, se recomienda la implementación de softwares de simulación para una evaluación más detallada de la línea de producción y comparación de mejoras teniendo en cuenta el escenario actual vs el simulado y, por último, la optimización del tiempo de ciclo por medio de un estudio de métodos y tiempos realizados por estación; esto se haría con una nueva implementación de SALBP: SALPB-2.

11. Referencias

ABC Economía » Baterías automotrices, un mercado en crecimiento. (n.d.).

Bartos, A., & Bertok, B. (2020). Production line balancing by P-graphs. *Optimization and Engineering*, 21(2), 567–584. <https://doi.org/10.1007/s11081-019-09462-1>

Baskar, A., & Anthony Xavier, M. (2019). Heuristics based on Slope Indices for Simple Type i Assembly Line Balancing Problems and Analyzing for a Few Performance Measures. *Materials Today: Proceedings*, 22, 3171–3180. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.454>

Baybars, I. (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem*. *Management Science*, 32(8), 909–932.

Chapman, R., & Hyland, P. (2004). Complexity and learning behaviors in product innovation. *Technovation*, 24(7), 553–561. [https://doi.org/10.1016/S0166-4972\(02\)00121-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4972(02)00121-9)

Chapman, S. N. (2006). *Planificación Y Control De La Producción* (P. Educación, Ed.). Pearson Educación.

Chase, R., Jacobs, R., & Aquilano, N. (2009). Administración de operaciones, producción y cadena de suministros. In *McGraw-Hill* (12th ed., Vol. 1).

Cívicos Juárez, A., & Hernández Hernández, M. (2011). Algunas reflexiones y aportaciones en torno a los enfoques teóricos y prácticos de la investigación en Trabajo Social. *Acciones e Investigaciones Sociales*, (23), 25. https://doi.org/10.26754/ojs_ais/ais.200723306

Decana, P. (2020). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos “ Mejora de la rentabilidad de una empresa retail de confecciones aplicando el Balanced Scorecard ” Para optar el Título Profesional de Ingeniera Textil y.*

Durango Cruz, L. F., Orejuela Cabrera, J. P., & Ortiz Dorado, L. A. (2015). Balance horizontal de líneas de ensamble para modelos mixtos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 121–138. <https://doi.org/10.22395/rium.v14n26a8>

Fahin, I. S., & Banuwati, N. (2018). Reducing Work Overtime in Production Line by Comparing Two Heuristic Line Balancing Method: Case Study of Beam Comp Stering Hanger at PT. Metindo Era Sakti. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 453(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/453/1/012049>

Fazlollahtabar, H., Hajmohammadi, H., & Es’Haghzadeh, A. (2011). A heuristic methodology for assembly line balancing considering stochastic time and validity testing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(1–4), 311–320. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2708-1>

FERVE. (2013). Generalidades sobre baterías.

Free, R., & Cargadores, D. (n.d.). *CARGADORES : CARACTERÍSTICAS Y OPCIONES.*

Grzechca, W., & Foulds, L. R. (2015). The assembly line balancing problem with task splitting: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2002–2008. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.382>

Harikrishnan, R., Rajeswaran, M., Sathish Kumar, S., & Dinesh, K. (2020). Productivity

improvement in poly-cover packing line through line balancing and automation.

Materials Today: Proceedings, 33, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.253>

Hazir, Ö., Delorme, X., & Dolgui, A. (2015). A review of cost and profit oriented line design and balancing problems and solution approaches. *Annual Reviews in Control*, 40, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.09.001>

Heizer, J., & Render, B. (2009). Principios de Administración de Operaciones. In *Pearson Educación*.

Huo, J., Wang, Z., Chan, F. T. S., Lee, C. K. M., & Strandhagen, J. O. (2018). Assembly Line Balancing Based on Beam Ant Colony Optimisation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2481435>

Iwan, R. (2018). Analysis of productivity improvement using line balancing method (study case assembling line in PT XYZ). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 453(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/453/1/012055>

Jafari Asl, A., Solimanpur, M., & Shankar, R. (2019). Multi-objective multi-model assembly line balancing problem: a quantitative study in engine manufacturing industry. *OPSEARCH*. <https://doi.org/10.1007/s12597-019-00387-y>

Jaramillo Garzon, A., & Restrepo Correa, J. (2010). Aplicación De La Programación Dinámica Para Resolver El Problema Simple De Balanceo De Linea De Ensamble. *Scientia Et Technica*, XVII(46), 62–67. <https://doi.org/10.22517/23447214.249>

Kanawaty, G. (1996). *Introduccion Al Estudio Del Trabajo - Kanawatypdf* (p. 521). p. 521.

- León, D., Neira, A., & Reynel, A. (2016). Application of line balancing techniques to balance workloads in the storage area of a warehouse storage. *Scientia et Technica*, 21(ISSN 0122-1701), 10.
- Li, Z., Kucukkoc, I., & Nilakantan, J. M. (2017). Comprehensive review and evaluation of heuristics and meta-heuristics for two-sided assembly line balancing problem. *Computers and Operations Research*, 84, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.03.002>
- López, M., Martínez, G., Quirós, A., & Sosa, J. (2011). Balanceo de líneas utilizando herramientas de manufactura esbelta. *Revista El Buzón de Pacioli*, (Número especial 74), 7–22.
- Miño, G., Moyano, J., & Santillán, C. (2019). Tiempos estándar para balanceo de línea en área soldadura del automóvil modelo cuatro. *Ingeniería Industrial*, 40(2), 110–122.
- Müller, C., Grunewald, M., & Spengler, T. S. (2016). Redundant Configuration of Automated Flow Lines. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 751–756.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.864>
- Nahmias, S. (2014). *Análisis de la producción y las operaciones*. McGraw Hill.
- Navas, E., & Riquett, A. (2020a). *TABLA 1*.
- Navas, E., & Riquett, A. (2020b). *Tabla 2. Dataset*.
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11780124.v1>
- Navas, E., & Riquett, A. (2021, May). *TIEMPOS ESTANDARIZADOS*.

<https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.14691648.V1>

Orejuela Cabrera, J. P., & Flórez González, A. (2019). Balanceo de líneas de producción en la industria farmacéutica mediante Programación por metas. *Inge Cuc*, *15*(1), 109–122.

<https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.1.2019.10>

Orozco, P., León, D., García, N., María, Á., Grisales, R., & Alberto, R. (2016). Aplicación de técnicas de balanceo de línea para equilibrar las cargas de trabajo en el área de almacenaje de una bodega de almacenamiento Application of line balancing techniques to balance workloads in the storage area of a. *Scientia et Technica Año Año XXI*, *21*(3), 239–247.

Qattawi, A., & Chalil Madathil, S. (2019). Assembly line design using a hybrid approach of lean manufacturing and balancing models. *Production and Manufacturing Research*, *7*(1), 125–142. <https://doi.org/10.1080/21693277.2019.1604274>

Reginato, G., Anzanello, M. J., & Kahmann, A. (2016). Balanceamento de linha de montagem mista em cenários com distintos mix de produtos. *Gestao e Producao*, *23*(2), 294–307.

<https://doi.org/10.1590/0104-530X1874-14>

Restrepo, J., Daniel Medina, P., & Cruz Trejos, E. (2008). Problemas de balanceo de línea salbp-1 y salbp-2: un caso de estudio. *Scientia et Technica*, *3*(40), 105–110.

<https://doi.org/10.22517/23447214.3077>

Rubiano-Ovalle, Ó., & Arroyo-Almanza, A. (2009). Solving a two-sided assembly line balancing problem using memetic algorithms. *Ingenieria y Universidad*, *13*(2), 267–280.

Sataloff, R. T., Johns, M. M., & Kost, K. M. (2020). *PLANEACION Y CONTROL DE LA*

PRODUCCIÓN.

Scholl, A. (1995). Balancing and Sequencing of Assembly Lines. In *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-00861-4>

Software Shop - GAMS. (n.d.).

Suñé, A., Gil, F., & Arcusa, I. (2004). Manual práctico de Diseño de Sistemas Productivos. *Díaz de Santos, 1*, 318.

Wang, Z., & Feng, C. (2015). A performance evaluation of the energy, environmental, and economic efficiency and productivity in China: An application of global data envelopment analysis. *Applied Energy, 147*, 617–626.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.108>

Zhao, Z. Y., & De Souza, R. (2000). Genetic production line-balancing for the hard disk drive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16*(4), 297–302.
<https://doi.org/10.1007/s001700050160>

12. Anexos

Anexo 1. Cálculos de productividad estudio de métodos y tiempos.

Proceso actual, tiempo total: 8525 minutos = 142 horas

Unidades realizadas: 12000

Operarios = 5

142h x 5 = 15 HH

$$\text{Productividad Actual} = \frac{12000 \text{ Un}}{710 \text{ HH}} = \mathbf{16,9 \text{ un/HH}}$$

Proceso Mejorado, tiempo total 3119 minutos = 51,9 horas

Unidades realizadas: 12000

Operarios = 5

51,9 h x 5 h = 259,5 HH

$$\text{Productividad Mejorado} = \frac{12000 \text{ Un}}{259,5 \text{ HH}} = \mathbf{46,2 \text{ Un/HH}}$$

$$\text{Incremento} = \frac{46,2 - 16,9}{16,9} \times 100 \% = \mathbf{173,37\%}$$

Figura 16. Cálculos de productividad

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Entrevista realizada al ingeniero de la planta y jefe de producción sobre el diagnóstico de la empresa

- ¿Tiene la empresa definidos claramente la descripción de sus procesos productivos?
¿Desde hace cuánto no actualiza la descripción de sus procesos?

La empresa tiene claro la descripción del proceso productivo, en cada parte de su transformación de materia prima hasta el producto final, se actualizo la descripción en junio del presente año junto con la actualización de la norma ISO.

- ¿Existen algunas áreas de la empresa que presenten problemas relacionados con retrasos en el cumplimiento de los pedidos?

Si, existen áreas de la empresa que presentan retrasos en sus procesos, algunos por problemas de mantenimiento, otros por problemas de calidad y otros por bajo productividad. Entre estas las líneas de empaste expandido, empaste de rejillas y rejilladoras.

- ¿Existen algunas áreas de la empresa que presenten problemas relacionados con cuellos de botella?

Los cuellos de botellas se presentaban en mayor parte en la línea de ensamble por esta razón se adquirió una nueva máquina automática con mayor capacidad, debido a esto la línea de expandido la cual provee de materia prima esta máquina automática, que en este caso son las placas expandidas se convirtió en el nuevo cuello de botella.

- ¿Existen algunas áreas de la empresa que presenten problemas relacionados con altos costos de producción o con altos niveles de desperdicios? Explique brevemente.

Los desperdicios de la línea de empaste de rejillas son mayores a los de la línea de empaste expandido por esta razón se ha pasado la mayor parte de producción a la línea de expandido,

esta línea permite un mayor control de peso que disminuye los sobre consumo de materias primas generando menores sobre costos

- ¿Existen algunas áreas de la empresa que tengan empleados con poco trabajo o empleados con exceso de trabajo? Explique brevemente.

Sí, existen trabajadores con un poco más carga que otros en la línea de expansión, por ejemplo, en la elaboración de la mezcla que cubre las placas, el trabajador debe esperar un tiempo de 40 minutos hasta que esté lista y durante este no realiza ninguna otra actividad.

- ¿Existen algunas áreas de la empresa que presenten problemas relacionados con maquinaria parada constantemente? Explique brevemente.

No existen problemas con máquinas paradas constantemente, existen problemas cortos por daños o arreglos, pero no muy repetitivos por máquina.

- ¿Qué productos o servicios requieren de una revisión de los métodos de trabajo con el fin de incrementar su productividad?

La línea de expandido es una línea de operación continua, pero con muchas paradas operacionales durante el proceso, como por ejemplo en la pegada de cinta, cambio de estiba, cambio de rack, cambio de papel, cambio de referencia puesta a punto de máquina y cuadro de máquina.

- ¿Tiene la empresa establecido tiempos estándares para sus procesos? ¿Cuándo fue la última vez que se realizó un estudio de tiempos?

La línea por estudiar tiene un estándar de 18750 placas por h este se estableció hace alrededor de 5 años teniendo en cuenta los tiempos de parada requeridos por operación.

- ¿Está dispuesto a apoyar con toda la información pertinente y necesaria para desarrollar un estudio de métodos y tiempos para el área o proceso que se determine?

Sí, estamos dispuestos a colaborar con toda la información necesaria para realizar el estudio de métodos y tiempos.

Anexo 3. Valoración, suplementos y tiempo tipo sugerido.

En el siguiente anexo se realizará el cálculo respectivo de los suplementos que requiere cada actividad, los cuales fueron identificados en la observación de la labor realizada por los operarios dentro de la línea de placas. Es preciso señalar que cada uno de los operarios que realizan las actividades, trabajan a un ritmo normal y a su vez, actúan con gran seguridad y tranquilidad porque cada operación requiere de un tiempo y de mucha concentración para que no se vea afectado todo el proceso de fabricación de placas.

Sin embargo, para estandarizar el tiempo de trabajo se asignarán unas puntuaciones que dependerán de el grado de la actividad (si es bajo, mediano o alto) de acuerdo con la tabla de suplementos tomadas del libro “Introducción al estudio del trabajo” (Kanawaty, 1996), donde se adjuntan las figuras 17 y 18. Adicionalmente, se realizará la valoración de los operarios de acuerdo con la labor que realizan para determinar si es un operario calificado.

Tabla I. Puntos asignados a las diversas tensiones: resumen

Tipo de tensión	Grado		
	Bajo	Mediano	Alto
A. Tensión física provocada por la naturaleza del trabajo			
1. Fuerza ejercida en promedio	0-85	0-113	0-149
2. Postura	0-5	6-11	12-16
3. Vibraciones	0-4	5-10	11-15
4. Ciclo breve	0-3	4-6	7-10
5. Ropa molesta	0-4	5-12	13-20
B. Tensión mental			
1. Concentración o ansiedad	0-4	5-10	11-16
2. Monotonía	0-2	3-7	8-10
3. Tensión visual	0-5	6-11	12-20
4. Ruido	0-2	3-7	8-10
C. Tensión física o mental provocada por la naturaleza de las condiciones de trabajo			
1. Temperatura			
Humedad baja	0-5	6-11	12-16
Humedad mediana	0-5	6-14	15-26
Humedad alta	0-6	7-17	18-36

501

Figura 17. Puntos asignados a las diversas tensiones.

Fuente: (Kanawaty, 1996)

2. POSTURA (FACTOR A.2)

Determinar si el trabajador está sentado, de pie, agachado o en una posición engorrosa, si tiene que manipular una carga y si ésta es fácil o difícil de manipular.

	<i>Puntos</i>
Sentado cómodamente	0
Sentado incómodamente, o a veces sentado y a veces de pie	2
De pie o andando libremente	4
Subiendo o bajando escaleras sin carga	5
De pie o andando con una carga	6
Subiendo o bajando escaleras de mano, o debiendo a veces inclinarse, levantarse, estirarse o arrojar objetos	8
Levantando pesos con dificultad, traspalando balasto a un contenedor	10
Debiendo constantemente inclinarse, levantarse, estirarse o arrojar objetos	12
504 Extrayendo carbón con un zapapico, tumbado en una veta baja	16

Figura 18. Postura.

Fuente: (Kanawaty, 1996)

2. MONOTONIA (FACTOR B.2)

Considerar el grado de estímulo mental y, en caso de trabajar con otras personas, espíritu de competencia, música, etc.

	<i>Puntos</i>
Efectuar de a dos un trabajo por encargo	0
Limpiarse los zapatos solitariamente durante media hora	3
Efectuar un trabajo repetitivo } Efectuar un trabajo no repetitivo }	5
Hacer una inspección corriente	6
Sumar columnas similares de cifras	8
Efectuar solo un trabajo sumamente repetitivo	11

Figura 19. Monotonía. Fuente: (Kanawaty, 1996)

En la actividad 1, pegado de cinta se aplican los suplementos que se observan en las figuras anteriormente mencionadas, debido a que en el área donde operan los montacargas se evidencian factores como lo son el ruido, las vibraciones, las altas temperaturas ocasionadas por los diferentes procesos que se desarrollan en la planta.

En el caso del ruido, se puede considerar inaceptable debido a que los sonidos causados por las máquinas son muy altos, por lo que el operario se ve obligado a utilizar medidas de protección. De acuerdo con el total de puntos obtenidos por la sumatoria de los suplementos, nos dirigimos a las tablas de conversión y con este valor ubicamos el porcentaje.

ELEMENTO N° 1,2,3	
DESCRIPCIÓN	PUNTOS
TENSION FISICA	
ESFUERZO MEDIO (8KG)	21
POSTURA	
DE PIE ANDANDO CON UNA CARGA	6
ROPA MOLESTA	
ROPA DE PROTECCION INCOMODA Y MASCARILLA DE RESPIRACION	20
MONOTONIA	
EFFECTUAR TRABAJO NO REPETITIVO	5
CONCENTRACION/ANSIEDAD	
CARGAR/DESCARGAR TROQUEL DE UNA PRENSA; ALIMENTAR LA PRENSA A MANO	6
TEMPERATURA Y HUMEDAD	
HUMEDAD DEL 78% Y UNA TEMPERATURA MAYOR DE 32°C	26
VENTILACION	
TALLER CON VENTILACION ACEPTABLE, CON UN POCO DE CORRIENTE DE AIRE	1
TOTAL DE PUNTOS	85
%	52%

Figura 20. Porcentaje del suplemento para la actividad 1. Fuente: Elaboración propia.

Para la actividad 2, cambio de papel se hace la valoración de los puntos atribuidos por la observación, donde los suplementos son similares a los determinados anteriormente, añadiéndole unos cuantos kilogramos de más. Los demás aspectos los pudimos apreciar en todas las tablas presentadas. Gracias a la sumatoria de los puntos ubicar el valor del porcentaje en la tabla de conversión.

ELEMENTO N° 1,2,3	
DESCRIPCIÓN	PUNTOS
TENSION FISICA	
ESFUERZO MEDIO (8KG)	21
POSTURA	
DE PIE ANDANDO CON UNA CARGA	6
ROPA MOLESTA	
ROPA DE PROTECCION INCOMODA Y MASCARILLA DE RESPIRACION	20
MONOTONIA	
EFFECTUAR TRABAJO NO REPETITIVO	5
CONCENTRACION/ANSIEDAD	
CARGAR/DESCARGAR TROQUEL DE UNA PRENSA; ALIMENTAR LA PRENSA A MANO	6
TEMPERATURA Y HUMEDAD	
HUMEDAD DEL 78% Y UNA TEMPERATURA MAYOR DE 32°C	26
VENTILACION	
TALLER CON VENTILACION ACEPTABLE, CON UN POCO DE CORRIENTE DE AIRE	1
TOTAL DE PUNTOS	85
%	52%

Figura 21. Porcentaje del suplemento de la actividad 2. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la anterior información se logran obtener los siguientes datos de acuerdo a las ecuaciones 8, 9 y 10 propuestas por (Kanawaty, 1996):

Donde:

$$\text{Tiempo básico} = \text{tiempo total en minutos o segundos} * \% \text{ actividad} / 100 \quad (8)$$

$$\text{Tiempo tipo} = \text{Suma contenido de trabajo} * (1 + \text{suplemento}) \quad (9)$$

$$\text{Contenido de trabajo} = \text{tiempo basico} * (1 + \text{suplemento}) \quad (10)$$

Cabe resaltar que la empresa maneja suplementos por contingencia 3%, por necesidades personales 5% y suplementos generales del 8%.

Pegada de cinta.

- Elemento 1: Acomodar.

$$\text{Tiempo básico: } 25,6s * 85 = 21,76 s$$

$$\text{Contenido del trabajo: } 21,76 s * (1 + 0,42) = 30,8992s$$

- Elemento 2: Pegar

$$\text{Tiempo básico: } 55,75s * 75/100 = 41,8125s$$

$$\text{Contenido del trabajo: } 41,8125s * (1 + 0,42) = 59,37375s$$

- Elemento 3: Quitar excesos

$$\text{Tiempo básico: } 25s * 80/100 = 20s$$

$$\text{Contenido del trabajo: } 20s * (1 + 0,42) = 28,4s$$

Suplementos Generales =8%

$$\text{Tiempo tipo} = (30,8992s + 59,37375s + 28,4s) * (1 + 0,08) = 128,166786s$$

Cambio de Papel.

- Elemento 1: Desmontar rollo

$$\text{Tiempo básico: } 24,8s * 80/100 = 19,84s$$

$$\text{Contenido del trabajo: } 19,84s * (1 + 0,52) = 30,1568s$$

- Elemento 2: Montar rollo nuevo

$$\text{Tiempo básico: } 39,4s * 80/100 = 31,52s$$

$$\text{Contenido del trabajo: } 31,52s * (1 + 0,52) = 47,9104s$$

- Elemento 3: Acomodar

$$\text{Tiempo básico: } 72s * 70/100 = 50,4s$$

$$\text{Contenido del trabajo: } 50,4s * (1 + 0,52) = 76,608$$

$$\text{Suplementos Generales } = 8\%$$

$$\text{Tiempo tipo } = (30,1568s + 47,9104s + 76,608s) * (1 + 0,08) = 167,049216 s$$

Con base a los resultados arrojados en las ecuaciones anteriores, se tomaron dos procesos que se realizan en la línea como lo son la pegada de la cinta y el cambio de papel donde se dividieron en diferentes elementos, por último, se definieron los tiempos estandarizados de cada actividad teniendo como resultado:

- Pegada de la cinta 2,13 Min cabe resaltar que hay operarios que trabajan a diferentes ritmos de trabajos (Con las visitas realizadas a la empresa se tomaron tiempos a 3 operarios

diferentes donde se observó que el operario más capacitado es el número 2, el cual trabaja con un buen ritmo de trabajo y sus tiempos son cercanos al tiempo estandarizado).

- Cambio de papel 2,78 Min

Anexo 4. Código del modelo en GAMS.

```
OPTION limrow=0;

OPTION limcol=0;

OPTION solprint=on;

OPTION sysout=off;

OPTION LP=CPLEX;

OPTION MIP=CPLEX;

OPTION NLP=CONOPT;

OPTION MINLP=DICOPT;

OPTION OPTCR=0;

SETS

i actividades /1*12/

j estaciones /1*10/;

SCALAR

c tiempo de ciclo /4.88/;

PARAMETERS

t(i) /1=0.63, 2=0.11, 3=0.70, 4=4.02, 5=3.11,6=0.37,

      7=4.88, 8=1.02, 9=2.01, 10=0.20, 11=0.18,12=0.31 /;

FREE VARIABLES

z Cantidad total de estaciones;

POSITIVE VARIABLES

tacum (j) tiempo acumulado de cada estación;
```

BINARY VARIABLES

$x(i, j)$ la actividad i es asignada a la estación j

$y(j)$ la estación j es utilizada;

EQUATIONS

* =E= es igual; =L= es menor igual; =G= es mayor igual*

Fobj, rest1, rest2, rest3, preced1, preced2, preced3, preced4, preced5,
preced6, preced7, preced8, preced9, preced10, preced11, preced12, tiempoacum;

fobj.. $z =E= \sum (j, y(j));$

rest1(j).. $\sum (i, t(i) * x(i, j)) =L= c * y(j) ;$

rest2(i).. $\sum (j, x(i, j)) =E= 1;$

rest3(j)\$ $(ord(j) <= (card(j)-1))$.. $y(j+1) =L= y(j);$

restricciones de precedencia

preced1.. $\sum (j, ord(j) * x('1', j)) =L= \sum (j, ord(j) * x('2', j));$

preced2.. $\sum (j, ord(j) * x('2', j)) =L= \sum (j, ord(j) * x('3', j));$

preced3.. $\sum (j, ord(j) * x('3', j)) =L= \sum (j, ord(j) * x('4', j));$

preced4.. $\sum (j, ord(j) * x('3', j)) =L= \sum (j, ord(j) * x('5', j));$

preced5.. $\sum (j, ord(j) * x('4', j)) =L= \sum (j, ord(j) * x('6', j));$

preced6.. $\sum (j, ord(j) * x('5', j)) =L= \sum (j, ord(j) * x('6', j));$

preced7.. $\sum (j, ord(j) * x('6', j)) =L= \sum (j, ord(j) * x('8', j));$

preced8.. $\text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('7',j)) =L= \text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('8',j));$

preced9.. $\text{Sum}(j, \text{ord}(j) * x('8',j)) =L= \text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('9',j));$

preced10... $\text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('9',j)) =L= \text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('10',j));$

preced11... $\text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('10',j)) =L= \text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('11',j));$

preced12... $\text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('11',j)) =L= \text{sum}(j, \text{ord}(j) * x('12',j));$

Tiempoacum(j)... $\text{tacum}(j) =e= \text{sum}(i, t(i) * x(i,j));$

MODEL Balance /ALL/

SOLVE Balance using MIP minimizing z;

display x.l;

display tiempoacum.l;

display y.l;