

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE UNA  
PLANTA ENSAMBLADORA DE AUTOS APLICANDO  
BALANCE DE LÍNEAS**

26

*Optimization of production of a car assembly plant by applying balance  
lines*

Ángel Geovanny Guamán Lozano<sup>1</sup>

Gloria Elizabeth Miño Cascante<sup>2</sup>

Carlos José Santillán Mariño<sup>3</sup>

**RESUMEN**

El presente trabajo muestra la aplicación de una variante del modelo heurístico de balanceo de líneas de montaje denominado Método Informático para Secuenciar Operaciones para Líneas de Ensamblaje (COMSOAL) a un problema de tipo SALBP-2. El estudio se desarrolla en la sección de pintura de una empresa ensambladora de autos en Ecuador y tiene como objetivo optimizar su sistema de producción apoyando la asignación de tareas a las diferentes estaciones y mejorando los tiempos de ciclo. La aplicación del algoritmo propuesto permitió minimizar el tiempo de ciclo en el sistema cumpliendo con las especificaciones técnicas y de calidad propios del proceso. Los resultados de la investigación demuestran un incremento en la eficiencia de la línea de pintura utilizando los mismos recursos disponibles, adicionalmente se puede mejorar la productividad de la compañía permitiendo cumplir con la demanda establecida en el

---

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. EC060155. Riobamba, Ecuador. E-mail: a\_guaman@esPOCH.edu.ec

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. EC060155. Riobamba, Ecuador. E-mail: gloriamino@yahoo.es

<sup>3</sup> Escuela de Ingeniería Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. EC060155. Riobamba, Ecuador. E-mail: carsanti@andinanet.net

mercado. Todos estos factores prueban que el modelo se puede adaptar a la industria automotriz.

Palabras clave: Optimización, Balance, algoritmo, COMSOAL.

### **ABSTRACT**

*The present work shows the application of a variant of the heuristic model of rolling of assembly lines denominated Computer Method to Sequence Operations for Lines of Assembly (COMSOAL) to a problem of type SALBP-2. The study is developed in the painting section of a car assembling company in Ecuador and aims to optimize its production system by supporting the assignment of tasks to different stations and improving cycle times. The application of the proposed algorithm allowed to minimize the cycle time in the system complying with the technical specifications and quality of the process. The results of the research show an increase in the efficiency of the paint line using the same available resources, in addition it can improve the productivity of the company allowing to meet the established demand in the market. All these factors prove that the model can be adapted to the automotive industry.*

*Keywords: Optimization, Balance, algorithm, COMSOAL.*

### **INTRODUCCIÓN**

Las industrias manufactureras han ayudando a impulsar el crecimiento económico y el aumento de los niveles de vida durante casi tres siglos y seguirá haciéndolo en las economías en desarrollo. Según el centro de investigaciones *McKinsey Global Institute* el papel de la industria en la economía mundial continúa evolucionando, durante los próximos quince años, 1.8 millones de personas entrarán en la clase consumidora a nivel global y el consumo en todo el mundo casi se duplicará a \$ 64 billones de dólares [1].

El sector automotriz no es ajeno a la evolución de la industria manufacturera cuyo desarrollo está ligado al control de parámetros técnico-económicos, con el objetivo de hacer organizaciones más eficientes. El ensamblaje de vehículos se basa en las líneas de montaje inicialmente aplicadas por Henry Ford de forma empírica.

Las líneas de montaje son componentes de muchos sistemas de producción, tales como la industria automotriz y de electrodomésticos [2] y se han desarrollado de forma significativa para la gestión de operaciones de modo que permite un alto volumen, bajo costo, la producción estandarizada [3] y aporta a la personalización en masa, el incremento de la flexibilidad en las plantas de fabricación y la mejor relación con las empresas proveedoras.

Cuando pensamos en una cadena de montaje, la imaginación nos lleva directamente a la moderna fábrica con máquinas, robots y operarios que participan en el montaje de productos complejos que salen de la línea de producción en un proceso sin fin. Inicialmente las líneas de montaje se crearon para una producción eficiente en masa de pocos productos estándar; en la actualidad existen varias opciones para el cliente en el mercado, de modo que los productores de bienes necesitan ofrecer millones de modelos bien manufacturados.

Desde el año 1950, la industria ha considerado el concepto de línea de montaje balanceado (ALB). Una línea de montaje comprende varias tareas,  $n$ , y varias estaciones de trabajo,  $m$ , que son arregladas en una secuencia serial y paralela, a través de los cuáles el flujo del trabajo genera un producto. El problema de diseño y balanceo de líneas de montaje es muy difícil de solucionar de forma óptima [4]. La teoría y la práctica maximizan la eficiencia diseñando sistemas de producción con un rendimiento definido y capacidad limitada de desviarse de eso. [3]

El equilibrio de la línea es uno de los principales factores que inciden en la mejora de la eficiencia de la producción, el WIP (work-in-process), la posición, el rendimiento y el tiempo de ciclo. Un buen equilibrio de la línea permite [5]: 1) Una mejor utilización de los recursos productivos, tales como horas-hombre o las horas de uso de la máquina. 2)

Una menor acumulación de WIP en la línea. 3) Menor tiempo de ciclo de producción de la línea, entre otros.

El objetivo de resolver un problema de balance de línea de ensamble (ALBP) es determinar cuáles tareas se realizarán en la estación de trabajo, es decir asignar las tareas a una secuencia ordenada de estaciones de trabajo, considerando las limitaciones del sistema (es decir, restricciones de capacidad, restricciones de asignación, restricciones de relaciones de precedencia, etc.) [6]

Numerosos algoritmos se han desarrollado para resolver ALBP, la mayoría de los cuales se centran en la solución de SALBP (problemas de balance de líneas simple). Se pueden esbozar dos grupos principales: los métodos exactos, que son basados principalmente en programación lineal, programación dinámica, métodos heurísticos y metaheurísticos. [7]

El equilibrio simple de líneas de montaje, con problemas (SALBP) normalmente se representa en forma de gráfico de precedencia que consta de nodos y bordes. Cada nodo en el gráfico representa una tarea específica, mientras que un borde de conexión de dos nodos representa la relación de precedencia entre las tareas correspondientes. [8]

Rapeepan clasifica el SALBP en dos tipos. El primer tipo, SALBP-1, minimiza el número de estaciones para un determinado tiempo de ciclo mientras que el segundo tipo, SALBP-2, intenta minimizar el tiempo de ciclo de una estación de trabajo para un número determinado de estaciones de trabajo. [8].

De forma paralela a esta investigación Becker y A. Scholl [9] complementan la clasificación con un tercer tipo, SALBP-E, que intenta maximizar la eficiencia de la línea, minimizando el producto del tiempo de ciclo y el número de estaciones. Una maximización de eficiencia también minimiza los tiempos ociosos y un cuarto tipo, SALBP-F, no tiene el objetivo de maximizar ni minimizar ninguna variable, sino determinar una solución que combine un número de estaciones y un tiempo de ciclo de forma factible.

Este artículo se centra principalmente en la resolución de SALBP-2, debido a que se adapta de forma apropiada a la industria automotriz, objeto de nuestro estudio, para reducir el tiempo de ciclo y distribuye las tareas a los trabajadores de manera más homogénea. Estas restricciones conducen a la disminución de costos de producción y mejorar la competitividad de costos de la planta. En dicha industria funcionan sistemas que pueden modelarse para representar procesos como producción o inventarios. [10]

Las técnicas utilizadas en la actualidad abarcan desde reglas muy simples como el tiempo de trabajo más largo, hasta el COMSOAL (Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines) basado en computadoras, hasta los métodos avanzados y más sofisticados que utilizan métodos de búsqueda y optimización. Así que el equilibrio de líneas es un área muy concurrida para los investigadores y las industrias. [11]

Varias investigaciones han aplicado métodos de optimización matemática tales como la programación lineal para la resolución de problemas de SALBP-2. Oña y Céspedes definen a la programación lineal como un método determinista de análisis para elegir la mejor solución entre muchas alternativas [12]. La herramienta cuenta con estos componentes: una función objetivo, como medida cuantitativa del funcionamiento del sistema, variables de decisión que deberían tomarse de manera óptima para encontrar el mejor valor de la función objetivo; y las restricciones, que representan el conjunto de relaciones, expresadas mediante ecuaciones o inecuaciones que ciertas relaciones de variables están obligadas a satisfacer.

Por otro lado, los modelos heurísticos son alternativas de solución al momento de reducir la complejidad computacional, debido a aspectos no lineales del problema, Otto y Scholl propusieron una heurística de dos etapas del SALBP-1 seguido por una técnica de recocido simulada con un algoritmo de búsqueda local. [13]. Una línea de ensamblaje simple multiobjetivo de equilibrio tipo 2 (SALBP-2) se ha resuelto utilizando el *método general de evolución diferencial* (DE) propuesto por Nearchou [14] y muestra que DE supera al algoritmo genético propuesto por Kim [15].

Existen varias investigaciones que comparan la aplicación del algoritmo COMSOAL con otros algoritmos heurísticos, así Mohan, Ganesan & Suresh [16] y Lerttira & Yarlagadda [17] concluyen en sus trabajos que la técnica COMSOAL proporciona mejores resultados con menor tiempo de ciclo, menos tiempo de inactividad, mayor eficiencia de línea y productividad media diaria que el método MSNSH (Multi-Started Neighborhood Search Heuristic).

Sin embargo, debido y como resultado de la revisión de la literatura se pudo determinar que no existen investigaciones que apliquen el algoritmo COMSOAL a una línea de ensamble de vehículos. Considerando los aspectos anteriormente mencionados, la presente investigación plantea la aplicación del algoritmo en la fase de pintura de una empresa ensambladora de autos en Ecuador, con el objetivo de optimizar el sistema de producción de la planta a través del balance de líneas en la sección. Se abordan aspectos como la identificación de las actividades que componen la fase de pintura de un vehículo compacto mediante el proceso de electroforesis precisando las restricciones que tiene el sistema, debido a especificaciones técnicas en materiales, tiempos disponibles, *takt time*, *throughput* y eficiencia de línea. La gerencia de la planta necesitaba balancear el ritmo de producción para cumplir con la demanda exigida por el mercado.

La propuesta de la presente investigación estuvo basada en la metodología utilizada en [18] y que ha sido adaptada para el estudio, esta propuesta se compone de las siguientes fases: 1) definición de objetivos y requerimientos; 2) recolección y análisis de los datos del sistema; 3) aplicación del modelo de optimización; 4) validación de resultados; 5) presentación de resultados.

Los resultados obtenidos proporcionaron evidencias para indicar que existe una mejora en la eficiencia de la línea de ensamble al aplicar el algoritmo COMSOAL en la industria automotriz. El trabajo concluye con la propuesta de reasignación más apropiada de actividades en las estaciones de trabajo de la planta de vehículos, este presenta una mejora significativa respecto del tiempo de ciclo y al balanceo de línea en general.

## METODOLOGÍA

El proceso de optimización de la línea de ensamble se basó en la metodología descrita en la Figura 1 que consta de cinco fases, esta ilustración muestra de forma adecuada el proceso general para obtener la adaptación del modelo. Cada una de estas fases se detalla a continuación.

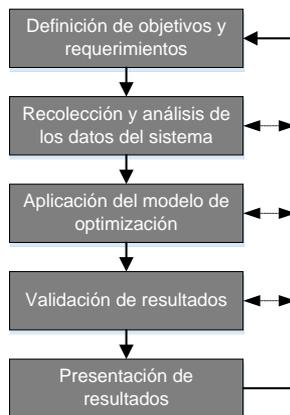


Figura 1. Esquema metodológico del estudio

Fase de la investigación.

1) Definición de objetivos y requerimientos. Los objetivos deciden qué rumbo tomará la investigación, deben ser alcanzables, realistas, medibles y de alto impacto para obtener resultados concisos en el problema de optimización. Mientras que los requerimientos de información del sistema de producción de la planta necesitan determinar cuáles son los recursos necesarios para aplicar el modelo de balance de líneas.

2) Recolección y análisis de los datos del sistema. Esta fase se realiza para establecer todas las métricas que rigen al sistema, involucra todo lo referente a las distintas etapas que conforman el proceso de pintura, así como las principales actividades realizadas durante el mismo; identifica todas las restricciones reales a través de la colección,

registro, y procesamiento de los datos. Esta fase necesita una correcta definición de los elementos que componen el sistema, desarrollar la descripción de las operaciones, calcular la eficiencia de línea y tomar los datos y analizarlos de forma estadística.

3) Aplicación del modelo de optimización. El modelo deberá construirse simple y detallado de modo que permita una interpretación práctica del problema, pero ajustada a la realidad para que se pueda implementar en la planta. Además, se deben incorporar todas las restricciones técnicas para el proceso de pintura de electroforesis de las carrocerías con el fin de garantizar la calidad del acabado. Una vez obtenidas estas características en el modelo se genera la alternativa de solución.

4) Validación de resultados. Los resultados deben ser verificados para ver si el modelo de optimización refleja correctamente la realidad conceptual del sistema, se buscan errores, inconsistencias y omisiones, comparando la eficiencia inicial con la conseguida al final del experimento.

5) Presentación de resultados. Se proporcionan los resultados más relevantes para la toma de decisiones o para posteriores análisis que complementen la investigación. Se generan gráficas que muestren de manera sencilla las cifras obtenidas y expliquen las ventajas del modelo.

## **RESULTADOS**

### *1) Definición de objetivos y requerimientos.*

La dirección de la ensambladora requiere trazar como objetivo de la investigación balancear las estaciones de trabajo de la sección de pintura optimizando los recursos disponibles, minimizando los tiempos inactivos y conservando los estándares internacionales de la marca asiática que representa en Ecuador. Como resultado de la investigación se espera contar con información que muestre la asignación correcta de las actividades en las estaciones de trabajo existentes.

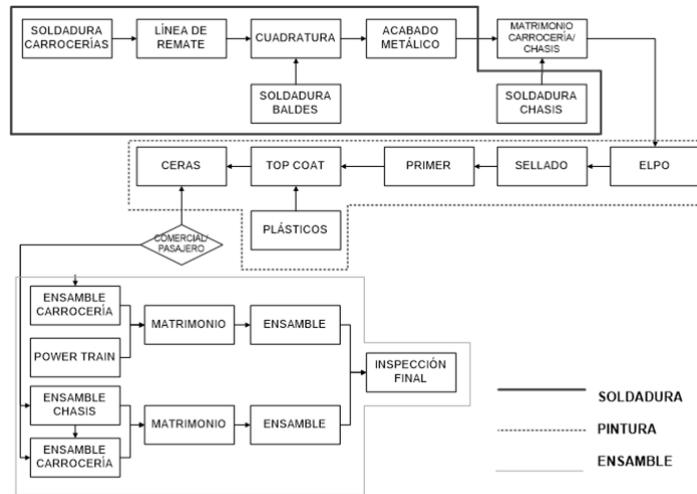


Figura 2. Esquema general del ensamble de autos en la planta.

La empresa cuenta con tres secciones representativas (Ver figura 2): soldadura, pintura y ensamble. Se encarga de la producción de tres modelos de vehículos tipo SUV y Pickup ensamblados en el país a través de la importación de CKDs. La organización es relativamente joven, fue inaugurada en febrero de 2013 por lo cual los sistemas de producción no se encuentran totalmente controlados y balanceados.

## 2) Recolección y análisis de los datos del sistema.

En esta fase se determinaron cuales métricas del sistema servirán para el modelo de optimización empezado por la descripción completa de las operaciones por las que atraviesa el chasis del vehículo con sus respectivos tiempos.

### Descripción del proceso de Pintura.

La empresa ensambla vehículos con chasis de la marca Great Wall Motors bajo el sistema de *just in time*, con un índice de producción fijado por la empresa de diez vehículos por turno y cuenta con ocho horas operativas por turno. El proceso de pintura sigue el esquema descrito en la tabla 1 y se basa en la técnica de electroforesis aplicada en la mayoría de fábricas ensambladoras del mundo. Los índices de producción están

marcados por la duración en el horno de electroforesis con un tiempo de cuarenta y dos minutos, con un tiempo total de 331,92 minutos y empleando treinta y dos estaciones de trabajo.

#### *Cálculo del takt time*

El tiempo efectivo resulta de restar al tiempo operativo los tiempos suplementarios correspondientes a las siguientes actividades: refrigerio (10 min), preparaciones de entrada y salida (10 min), almuerzo (10 min) y las paras programadas (5 min); obteniendo un tiempo disponible por turno de 7,42 horas. El tiempo que se debe tardar en manufacturar una unidad se denomina *takt time* y se utiliza para cumplir con la demanda como se muestra en la ecuación 1, dando como resultado 0,742 horas. Sin embargo, se debe considerar la eficiencia en el sistema debido a factores tales como la frecuencia de paros de línea y el estado del stock de unidades (ecuación 2). Se utiliza un valor de eficiencia del 90%

$$TT = \frac{\text{Tiempo disponible para la demanda}}{\text{Número de unidades requeridas por la demanda}} \quad (1)$$

$$ATT = TT \times \eta \quad (2)$$

Se tienen a disposición 40,07 minutos para completar un vehículo en la fase de pintura y cumplir con las 10 unidades diarias demandadas.

Tabla 1. Principales procesos en la línea de pintura.

ESTACIÓN	MACRO PROCESO	PROCESO	PARÁMETROS DE PROCESO		
			TIEMPO	TIEMPO MÁS TRANSPORTE	CAPACIDAD
1	PRETRATAMIENTO	DESENGRASE	3	8,9	3
2		ENJUAGUE 1	1	6,91	3
3		ENJUAGUE 2	1	7,42	3
4		ACONDICIONADOR	1	6,91	3
5		FOSFATO	3	8,91	3
6		ENJUAGUE 3	1	6,91	3
7		ENJUAGUE AGUA DI 1	1	10,04	3
8	ELECTROFORE	ELECTROFORESIS	3	8,91	3
9		ULTRA FILTRADO 0	0,3	0,3	3
10		ULTRA FILTRADO 1	1	6,91	3
11		ULTRA FILTRADO 2	1	6,91	3
12		ENJUAGUE AGUA DI 2	1	10,04	3
13	PRIMER	HORNO ELECTROFORESIS	35	42	4
14		BUFFER ELECTROFORESIS	2,7	8,1	3
15		MASILLA	5	5	1
16		PULIDO	4	4	1
17		SELLADO	5	5	1
18		MASCARA	5	5	1
19		PVC	3	3	1
20		DESMASCARAR	3	3	1
21		LIJADO	6,5	6,5	1
22		PINTURA	12	12,17	2
23	TOP COAT	CLEAR COAT	8	8	1
24		HORNO	36	37,76	6
25		ENFRIADO	6	6	1
26		LIJADO	6,5	6,5	1
27	TOP COAT	PINTURA	12	12,17	1
28		CLEAR COAT	8	8	1
29		HORNO	36	37,64	6
30		ENFRIADO	6	6	1
31		INSPECCIÓN	6	6	1
32		REPARACIÓN DE PUNTOS	6	6	1

Fuente: CIAUTO

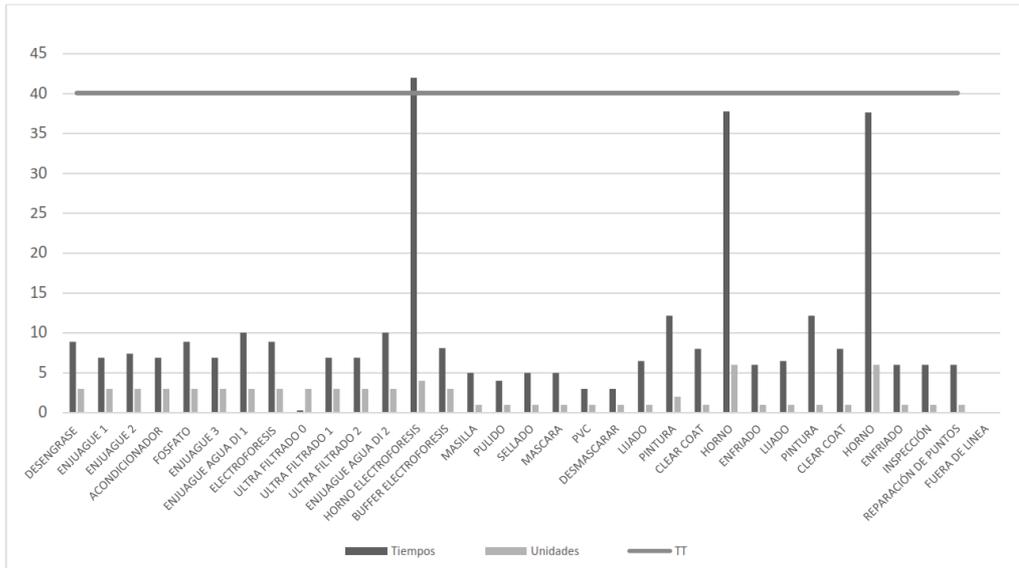


Figura 3. Takt time vs tiempos por estación de trabajo

### Resumen de manufactura

El análisis de los datos anteriores permite describir de forma sintetizada los resultados obtenidos del estudio y que se muestran en la gráfica de barras de la figura 3, la misma que muestra que la línea no se encuentra balanceada.

### Cálculo de la eficiencia de la línea.

El indicador utilizado para determinar cuan balanceada está la línea de montaje es la eficiencia de línea, cuya fórmula de cálculo (ecuación 3) se muestra a continuación [19]:

$$e = (1 - q) \cdot 100 \quad (3)$$

La variable  $q$  está descrita por:

$$q = \frac{\text{Tiempo total de trabajo requerido / unidad} - \text{tiempo de trabajo / unidad}}{\text{Tiempo total de trabajo requerido / unidad}}$$

Identificadas las variables se procede al cálculo de la eficiencia inicial de la línea correspondiente al 23,58%.

### 3) Aplicación del modelo de optimización.

El modelo de optimización para los problemas de tipo SALBP-2, propio del caso de estudio, que permite la asignación de actividades por estación se detalla a continuación:

*Min C*

*s.a*

$$\sum_{i=1}^N t_i \cdot x_{ij} \leq C \quad j = 1, \dots, M \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M j \cdot x_{kj} - \sum_{j=1}^M j \cdot x_{ij} \leq 0 \quad \forall k < i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i \cdot x_{ij} \geq t_{\min \text{Horno}} \quad j = 1, \dots, M \quad (6)$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \quad \forall (i, j); \quad C \in \mathfrak{R}^+$$

Donde:

$x_{ij} = 1$  si la operación  $i$  se hace en la estación  $j$

$C =$  tiempo de ciclo

$M =$  n° de estaciones

$N =$  n° de tareas

$t_{\min \text{Horno}} =$  tiempo mínimo en el horno

El modelo garantiza que la función objetivo busque el menor tiempo de ciclo posible y que dicho tiempo sea menor al tiempo en cada estación (ecuación 3). Además, cada operación debe ser asignada a una estación (4) con la variable binomial  $x_{ij}$ . En la ecuación 5 cumple las relaciones de precedencia entre las actividades y finalmente cumple con la especificación técnica de la permanencia mínima en el horno (6) determinadas en la tabla 2 para el curado de los sellantes.

Tabla 2. Temperaturas y tiempos de curado para los sellantes

Nº	Materiales Auxiliares	Tiempo de curado/min	Temperatura de curado / °C
1	The protective PVC glue for base coating-DT-125	30	140
2	The protective PVC glue for base coating-UC	30	140
3	PVC Weld sealant	30	140
4	Spot Welding Sealant	20	170
5	Shock Absorption Expansion Adhesive	20	170
6	Figure seal sealant	20	140

Fuente: CIAUTO

Arcus [20] desarrolló el algoritmo *Método Informático para Secuenciar Operaciones* que cumple con todos los requerimientos anteriormente dichos para el modelo matemático; consta de 6 pasos, sin embargo, es necesaria la adaptación del procedimiento considerando que las especificaciones técnicas de la pintura establecen una permanencia mínima de treinta minutos para el curado, quedando como resultado el siguiente procedimiento:

1. Identificar las tareas predecesoras e inmediatas para cada tarea.
  
2. Generar una tabla A con las actividades no asignadas, el total de operaciones que la preceden no asignadas y sus predecesoras subsiguientes no asignadas. A partir de la tabla A, nace la tabla B conformada por las tareas que no cuentan con predecesores. Sí no existe tarea alguna sin ser asignada a alguna estación, entonces se detiene el proceso.

Tabla 3. Principales operaciones del horno de electroforesis.

N°	OPERACIONES					DESCRIPCIÓN	t1	t2	t3	t4	tm	Ts
1	○	▽	→	□	□	Transporte carrocería armada hacia ELPO	0,70	0,74	0,67	0,69	0,70	0,72
2	●	▽	→	□	□	Desembarque de carrocería	0,94	0,99	0,89	0,92	0,94	0,97
3	●	▽	→	□	□	Montaje de la carrocería sobre el dolliers	1,30	1,37	1,24	1,27	1,29	1,34
4	●	▽	→	□	□	Posicionamiento de la carrocería en el conveyor	0,50	0,53	0,48	0,49	0,50	0,51
5	●	▽	→	□	□	Ajuste de las mordazas	0,50	0,53	0,48	0,49	0,50	0,51
6	○	▽	→	□	■	Verificación de la temperatura interna del horno a 175°C	1,20	1,26	1,14	1,18	1,19	1,24
7	●	▽	→	□	□	Elevación de la carrocería a una altura de 0,5 m	5,20	5,50	5,30	4,90	5,23	5,41
8	●	▽	→	□	□	Encendido del sistema de transporte Fast Transfer	0,50	0,53	0,48	0,49	0,50	0,51
9	○	▽	→	□	■	Mantenimiento de la temperatura de 175°C	19,80	20,50	20,40	20,00	20,18	20,88
10	●	▽	→	□	□	Descenso de la carrocería de una altura de 0,5 m	4,95	5,40	5,30	5,10	5,19	5,37
11	●	▽	→	□	□	Desacople de la carrocería del dollier	1,50	1,58	1,43	1,47	1,49	1,54
12	●	▽	→	□	□	Desmontaje de carrocería del conveyor	1,50	1,58	1,43	1,47	1,49	1,54
13	○	▽	→	□	■	Verificación de acabado	2,10	2,21	2,00	2,06	2,09	2,16
14	○	▽	→	□	□	Transporte de producto hacia overhead de sellado	0,60	0,63	0,57	0,59	0,60	0,62
15	●	▽	→	□	□	Desembarque de carrocería	0,50	0,53	0,48	0,49	0,50	0,51
T	10	0	2	1	2					TOTAL	42,37	43,85

3. A partir de la tabla B, se genera la tabla C integrada por las actividades que tienen tiempo de proceso que no sea mayor al tiempo disponible en la estación.

4. Utilizando la tabla C, se forja una tabla D que conste de las tareas que tienen mayor tiempo que el tiempo mínimo de permanencia en el horno de curado. Si la tabla D está vacía, se abre una nueva estación de trabajo y se repite el paso número 2.

5. Seleccionar aleatoriamente de la lista D una actividad para asignarla a la estación actual.

6. Se actualiza el tiempo disponible en la tabla A y en la estación. Se retorna al paso tres.

El proceso de pintura en la planta cuenta con tres puestos de trabajo que cuentan con la mayor duración en la línea: el horno ELPO, el horno *primer* y *toap coat* como se detalló en la tabla 1. El algoritmo se aplica en estos procesos, utilizando inicialmente hojas de proceso para detallar de forma exacta las actividades del proceso como se muestra en la tabla 3. Luego se construyen los diagramas de precedencia para los procesos anteriormente descritos. En el primer caso, se muestra que es necesaria la aplicación de quince iteraciones para finalizar la asignación de actividades en la estación. De la misma forma se aplica el algoritmo a los restantes dos procesos y se obtienen los resultados de la tabla 4.

#### 4) Validación de resultados.

Los resultados pueden ser corroborados con el software de Pearson Education denominado POM Windows como se muestra en la figura 4.

Station	Task	Time (minutes)	Time left (minutes)	Ready tasks	
1	Task 6	1,24	38,38	Task 1	
	Task 1	,72	37,66	Task 2, Task 3	
	Task 3	1,34	36,32	Task 2	
	Task 2	,97	35,35	Task 4	
	Task 4	,51	34,84	Task 5	
	Task 5	,51	34,33	Task 7	
	Task 7	5,41	28,92	Task 8	
	Task 8	,51	28,41	Task 9	
	Task 9	20,88	7,529999	Task 10	
	Task 10	5,37	2,16	Task 11, Task 12	
	Task 13	2,16	0	Task 11, Task 12	
	2	Task 11	1,54	38,08	Task 12
		Task 12	1,54	36,54	Task 14
		Task 14	,62	35,92	Task 15
		Task 15	,51	35,41	
Summary Statistics					
Cycle time	39,62	minutes			
Time allocated (cyc*sta)	79,24	minutes/cycle			
Time needed (sum task)	43,83	minutes/unit			
Idle time (allocated-needed)	35,41	minutes/cycle			
Efficiency (needed/allocated)	55,31%				
Balance Delay (1-efficiency)	44,69%				
Min (theoretical) # of stations	2				

Figura 4. Resultados del balanceo del horno ELPO.

Fuente: POM for Windows.

Tabla 4. Tiempos asignados después de la aplicación del modelo

ESTACIÓN	PROCESO	PARÁMETROS DE PROCESO		
		TIEMPO (MIN)	CAPACIDAD ESTACIÓN	TIEMPO POR UNIDAD
1	DESENGRASE	8,90	3	2,97
2	ENJUAGUE 1	6,91	3	2,30
3	ENJUAGUE 2	7,42	3	2,47
4	ACONDICIONADOR	6,91	3	2,30
5	POSFATO	8,91	3	2,97
6	ENJUAGUE 3	6,91	3	2,30
7	ENJUAGUE AGUA DI 1	10,04	3	3,35
8	ELECTROFORESIS	8,91	3	2,97
9	ULTRA FILTRADO 1	7,21	3	2,40
10	ULTRA FILTRADO 2	6,91	3	2,30
11	ENJUAGUE AGUA DI 2	10,04	3	3,35
12	HORNO ELECTROFORESIS ESTACIÓN A	39,00	4	9,75
13	HORNO ELECTROFORESIS ESTACIÓN B	4,93	1	4,93
14	BUFFER ELECTROFORESIS	8,10	3	2,70
15	MASILLA	5,00	1	5,00
16	PULIDO	4,00	1	4,00
17	SELLADO	5,00	1	5,00
18	MASCARA	5,00	1	5,00
19	PVC	3,00	1	3,00
20	DESMASCARAR	3,00	1	3,00
21	LIJADO	6,50	1	6,50
22	PINTURA	12,17	2	6,09
23	CLEAR COAT	8,00	1	8,00
24	HORNO ESTACIÓN A	13,05	2	6,53
25	HORNO ESTACIÓN B	24,07	6	4,01
26	ENFRIADO	6,00	1	6,00
27	LIJADO	6,50	1	6,50
28	PINTURA	12,17	2	6,09
29	CLEAR COAT	8,00	1	8,00
30	HORNO ESTACIÓN A	13,02	2	6,51
31	HORNO ESTACIÓN B	24,61	6	4,10
32	ENFRIADO	6,00	1	6,00
33	INSPECCION	6,00	1	6,00
34	REPARACION DE PUNTOS	6,00	1	6,00

158,39

Ingresa los datos de cada estación en el programa POM, se puede determinar que la eficiencia del algoritmo COMSOAL modificado es semejante a los resultados obtenidos por el programa con una eficiencia de 55,31% y la asignación en dos estaciones.

##### 5) Presentación de resultados.

Una vez efectuado el balance de líneas en las estaciones descritas, la eficiencia general ha aumentado al 47,78 %, cuyo efecto se ve reflejado en la resolución del problema SALB-2. Debido a que la infraestructura de la planta no puede ser modificada por las restricciones económicas, se debieron incorporar tres estaciones ficticias adicionales que se encuentran balanceadas y ordenadas de tal forma que cumplan con el modelo

matemático. Además, se unifican las estaciones de ultrafiltrado uno y cero porque existe similitud en las actividades en dichas estaciones, quedando un total de treinta y cuatro (34) estaciones de trabajo.

El nuevo escenario establece mejores tiempos de producción, los procesos de pintura de *primer* y *toap coat* cuentan con un mejor índice de producción con un tiempo de 39,00 y 24,07 minutos respectivamente.

La figura 5 muestra los tiempos de ciclo individuales considerando la capacidad de las instalaciones e infraestructura.

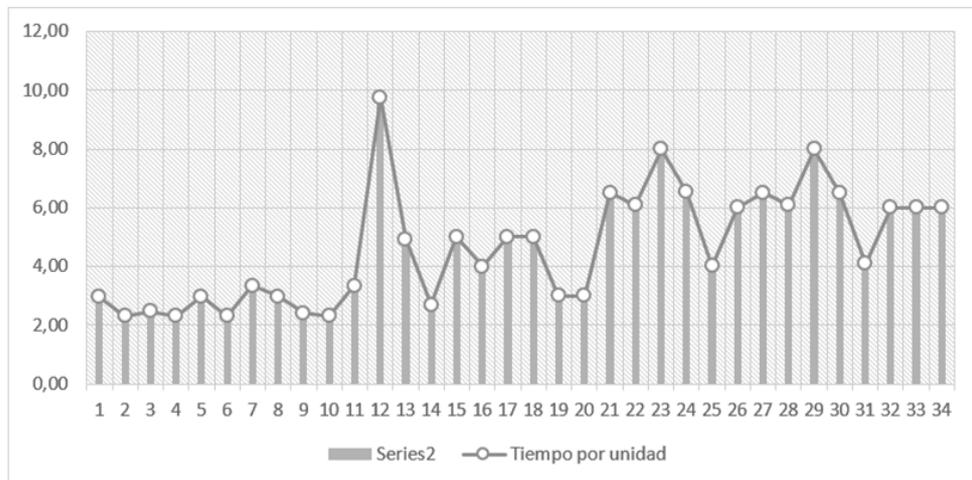


Figura 5. Gráfica de los tiempos de ciclo por estación.

## CONCLUSIONES

La investigación clasificó a la línea de ensamble de vehículos de una empresa en Ecuador como un problema simple de equilibrio de líneas de montaje de tipo dos (SALB-2), cuya solución se da mediante la aplicación de una variante del algoritmo heurístico denominado *Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines*, sujeta a restricciones teóricas y reales como las especificaciones de curado de los materiales sellantes aplicados en la carrocería.

La simulación demostró que la línea optimizada disfruta de mejoras significativas en la tasa de equilibrio de línea permitiendo cumplir con las cuotas de mercado demandadas por la gerencia con una producción diaria de 10 vehículos por jornada y una eficiencia del 47,78%. El beneficio financiero acumulado se ve reflejado en el incremento de la productividad y la reducción de los tiempos ociosos. Paralelamente se puede fijar un nuevo *takt time* de 9,75 minutos.

La aplicación de técnicas simples permite mejores tiempos computacionales, y reducen el número de iteraciones necesarias para calcular soluciones óptimas. Además, se pudo demostrar que la asignación correcta de las actividades en cada estación mejora de forma sustancial los tiempos de operación. La compañía puede utilizar la técnica para equilibrar sus líneas futuras si se realizan cambios en sus líneas de producción.

Se puede abrir el campo para futuras investigaciones, debido a que queda por analizar cómo reaccionaría el sistema si los niveles de inventarios temporales (buffer) tienen un mejor abastecimiento, entre otras variables.

## REFERENCIAS

- [1] M. G. Institute, «McKinsey,» 01 11 2012. [En línea]. Available: <http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing>. [Último acceso: 05 11 2016].
- [2] R. Pastor, «LB-ALBP: the lexicographic bottleneck assembly line balancing problem,» *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 8, p. 2425–2442, 2010. DOI: 10.1080/00207541003705856
- [3] W. James M, «Henry Ford vs. assembly line balancing,» *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 3, p. 757–765, 2014. DOI: 10.1080/00207543.2013.836616
- [4] I. Moon , R. Logendran y J. Lee, «Integrated assembly line balancing with resource restrictions,» *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 19, pp. 5525-5541, 2009. DOI: 10.1080/00207540802089876
- [5] D. D. Sheu y J.-Y. Chen, «Line balance analyses for system assembly lines in an

- electronic plant,» *Production Planning & Control*, vol. 19, n° 3, pp. 256-264, 2008. DOI:10.1080/09537280801966616
- [6] I. Kucukkoc y D. Z. Zhang, «A mathematical model and genetic algorithm-based approach for parallel two-sided assembly line balancing problem,» *Production Planning & Control*, vol. 26, n° 11, pp. 874-894, 2015. DOI: 10.1080/09537287.2014.994685
- [7] L. Capacho y R. Pastor, «ASALBP: the alternative subgraphs assembly line balancing problem,» *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 16, pp. 3503-316, 2008. DOI: 10.1080/00207540701197010
- [8] P. Rapeepan , «Differential evolution algorithm for simple assembly line balancing type 1 (SALBP-1),» *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 32, n° 2, pp. 104-114, 2015. DOI: 10.1080/21681015.2015.1007094
- [9] C. Becker y A. Scholl, «A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing,» *European Journal of Operational Research*, pp. 694-715, 2006.
- [10] L. M. Guerrero Guerra, J. D. Gómez Ruiz, D. L. Zapata Ruiz y M. Valencia Cárdenas, «Comparación de tres metaheurísticas para la optimización de inventarios con estimación de demanda,» *Revista de Ingeniería Industrial*, vol. 1, n° 15, pp. 51-68, 2016.
- [11] S. Shaaban y S. Hudson, *Production Line Efficiency*, Segunda ed., New York: Business Expert Press, LLC, 2013, p. 18.
- [12] O. Nápoles Oña y N. Céspedes Trujillo , Folleto de investigación de operaciones I, 1 ed., Ciudad de la Habana: Editorial Universitaria, 2006.
- [13] D. Battini, X. Delorme, A. Dolgui, A. Persona y F. Sgarbossa, «Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model,» *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 3, pp. 824-845, 2015. DOI:10.1080/00207543.2015.1074299
- [14] A. Nearchou, «Multi-objective balancing of assembly,» *International Journal of Production Research*, vol. 46, p. 2275–2297 , 2008.
- [15] Y. K. Kim y Y. J. Kim, «Genetic algorithms for assembly line balancing with

- various objectives,» *Computers and Industrial Engineering*, vol. 30, p. 397–409, 1996.
- [16] M. Mohan Prasad , K. Ganesan y R. Suresh, «An Optimal Balancing Of Multiple Assembly Line For A Batch Production Unit,» *International Journal of Lean Thinking*, vol. 4, n° 2, pp. 22-32, 2013.
- [17] A. Lerttira y P. Yarlagadda, «Assembly line balancing the comparison of COMSOAL and MSNSH technique in Motorcycle manufacturing company,» *Advanced Materials Research*, vol. 605, n° 607, pp. 166-174, 2013.
- [18] Y. J. Costa Salas y N. J. Castaño Pérez, «Simulación y optimización para dimensionar la flota de vehículos en operaciones logísticas de abastecimiento-distribución,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 23, n° 3, pp. 372-382, 2014.
- [19] M. Grover, *Work Systems and the Methods, Measurement, and Managment of Work*, New York: Pearson Education International, 2007.
- [20] A. L. Arcus, «COMSOAL a Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines,» *International Journal of Production Research* , vol. 4, n° 4, p. 259-277, 1966.
- [21] R. G. Askin y C. R. Standridge, *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, New York: Wiley, 1993.