

## Balance de línea de producción en una empresa de calzado mediante la metaheurística búsqueda tabú

### Line balancing production in a shoe's company by metaheuristic tabu search

Erwin Coletti Romero, Alicia Cirila Riojas Cañari\*

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Email Erwin Coletti: [coletti.erwin@gmail.com](mailto:coletti.erwin@gmail.com)

Email Alicia Riojas: [ariojasc@unmsm.edu.pe](mailto:ariojasc@unmsm.edu.pe)

\* Autor para correspondencia

#### Resumen

El problema de balance de línea de producción BLP consiste en asignar tareas a una secuencia ordenada de estaciones de manera que se satisfagan las relaciones de precedencia entre las tareas y se optimice alguna medida de rendimiento. Cuando una línea de producción no está bien balanceada, se producen cuellos de botella, descontento entre los trabajadores pues siempre habrá unos que trabajan más que otros en las mismas unidades de tiempo, retrasos en la entrega entre otros. Es un problema NP-hard que requiere ser tratado tanto en empresas grandes como pequeñas. En este artículo se presenta un BLP en una fábrica de calzado mediana de la ciudad de Lima-Perú. Se recolectaron tiempos y costos del proceso de producción de la temporada de invierno del 2011. Se aplicó la metaheurística búsqueda tabú, encontrándose un modelo para la distribución de trabajadores a las actividades de producción, la cual se implementó en la temporada de invierno del 2012 lográndose una mejora en la eficiencia del 75%. Asimismo, los reprocesos por fallas tuvieron una reducción del 8.21% obteniéndose con ello un ahorro para la empresa en estudio. Para la implementación de la búsqueda tabú se realizó un programa computacional.

**Palabras clave:** Metaheurísticas; Búsqueda Tabú; Balance de Línea de producción.

#### Abstract

The Assembly Line Balancing problem (ALBP) consists of assigning tasks to an ordered sequence of stations in order to satisfy the precedence relations between the tasks and optimize some performance measure. When a production line is not well balanced, there are bottlenecks, discontent among the workers because, there will always be some who work more than others in the same units of time, delays in delivery etc. It is a NP-hard problem that needs to be solved in both large and small companies. This article presents a BLP in a medium shoe factory in the city of Lima-Peru. Times and costs of the production process of the 2011 winter season were collected. The metaheuristic taboo search was applied, finding a model for the distribution of workers to the production activities, which was implemented in the winter season of 2012, achieving an improvement in efficiency of 75%. Likewise, the reprocesses for failures had a reduction of 8.21%, thus obtaining savings for the company under study. To implement the taboo search, a computer program was carried out.

**Keywords:** Metaheuristics; Tabu search; assembly line balancing

#### Correspondencia:

Dirección: Facultad de Ciencias Matemáticas, Ciudad Universitaria de San Marcos, Av. Venezuela s/n [puerta N°1]. Lima 1.

Recibido 13/02/2018 - aceptado 12/03/2018

#### Citar como:

Coletti E, Riojas A. Balance de Línea de Producción en una Empresa de Calzado mediante la Metaheurística Búsqueda Tabú. Revista Peruana de Computación y Sistemas 2018 1(1):9-22. <http://dx.doi.org/10.15381/xxxxxx>

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Peruana de Computación y Sistemas de la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución - No Comercial\_Compartir Igual 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

## 1. Introducción

En este trabajo se aborda el problema de balance de línea de producción, que se aplica a una fábrica de calzado, esta fábrica no contaba con un método justificado matemáticamente de asignación de recursos humanos para que el sistema produzca la cantidad requerida en el mínimo tiempo posible.

Con los mercados emergentes, los productos nuevos tienen un ciclo de vida relativamente corto. Este cambio tiene dos implicaciones. Primero, las compañías deben diseñar productos y llevarlos al mercado lo más rápido posible. Segundo, una vida más corta del producto proporciona menos tiempo para recuperar los costos de desarrollo.

Por lo tanto, las empresas deben usar nuevas tecnologías para reducir el tiempo y el costo en el diseño del producto [1].

El diseño del producto es reflejado en el proceso de producción el cual debe ser adecuado por no decir óptimo para responder a la demanda en el mismo tiempo o menos que el de la competencia.

Para ganar en el mercado global, las empresas manufactureras deben mejorar su capacidad competitiva. Los elementos clave incluyen nuevos productos creativos, mayor calidad, mejor servicio, mayor agilidad, baja contaminación ambiental. Los nuevos productos creativos son de vital importancia para las empresas en la actual "economía del conocimiento" [1]. En una fábrica de zapatos mediana la clave es la experticia de los maestros zapateros, más aun por la falta de nuevos empleados para los trabajos calificados que son esenciales para una fábrica. Por otro lado, muchas personas pueden no tener suficiente educación para estar calificados para estos trabajos [2]. Sin embargo los maestros zapateros requieren de ayudantes para la realización de tareas simples que no requieren una gran experticia.

Una técnica usada actualmente es la *Just-in-Time* o la producción Lean. Pero estas técnicas requieren que se cuente con mercados masivos, una personalización masiva tiene como objetivo ofrecer un mejor servicio a los clientes con productos y servicios más cercanos a sus necesidades y crear productos en una economía de escala que conduzca a la eficiencia de la producción en masa [3].

El desafío radica en cómo aprovechar las familias de productos y cómo lograr la sinergia entre las diferentes capacidades funcionales en la cadena de valor. Esto puede generar un impacto significativo en la estructura organizativa de la empresa en términos de nuevos métodos, educación, división del trabajo en marketing, ventas, diseño y fabricación. (Tseng, 2001) [4]

Las dos formas más comunes de enfocar el problema de asignación de recursos son un taller de trabajo (*job shop*) y una línea de flujo de montaje (*flow line*) a la cual se le aplica un Balance de línea de producción

(BLP). El objetivo de equilibrar una línea de flujo es minimizar el tiempo total de inactividad (balance delay time).

Se necesitan tres datos: de entrada (1) una tabla de elementos de trabajo con sus tiempos asociados (2) un diagrama de precedencia que muestra las relaciones de precedencia entre elementos y (3) unidades / minutos requeridos desde el línea. Las tres incógnitas son (1) el número de estaciones, (2) el número de trabajadores en cada estación y (3) los elementos que se deben hacer en cada estación [5].

El objetivo del BLP es dar a cada operador la misma cantidad de trabajo de ser posible o que la diferencia entre los tiempos de trabajo de cada operario sea mínima. No tiene ningún valor que una persona o una estación de trabajo tenga la capacidad mejor al resto de la planta porque una persona no puede producir más que la cantidad que le llega o más de lo que las operaciones posteriores pueden usar [6].

En términos de su complejidad computacional, el BLP es un problema NP-difícil [7]. Más aun es NP-hard, ya que una versión especial del problema, aquella que no tiene relaciones de precedencia entre las tareas es un problema análogo al de empaquetamiento de contenedores (*bin packing*) el cual es NP-hard en el sentido fuerte [8].

BLP es el causante del buen o mal desempeño de la planta de producción, no en lo referente a la calidad del producto, ya sea por causa de la materia prima o por la experticia de los operarios sino por los tiempos de realización de los productos.

Una línea de producción mal balanceada ocasiona dos tipos de problemas: uno por exceso y otro por escasez; en el primer caso si hay muchos más operarios de lo que requiere el flujo de producción se producirá tiempo de ocio, por otro lado si alguna estación de producción no cuenta con el personal necesario para atender el flujo de producción se producirán cuellos de botella, es decir, puntos de congestión donde el flujo es detenido con el consiguiente tiempo de ocio en otras estaciones.

En la empresa de calzado en estudio había demoras en el proceso de producción porque no se utiliza un método adecuado para distribuir el trabajo equitativamente según la capacidad de trabajo de cada trabajador (ayudante) en consecuencia a esto, se pide velocidad y que los trabajadores hagan horas extras para cumplir con los plazos requeridos por el cliente, esto hace que se cometan errores y al final no se controla bien la calidad del producto terminado, haciendo que los clientes devuelvan algunos productos por las fallas producidas, esos productos devueltos son reprocesados con uso adicional de energía eléctrica, horas/hombre y maquinaria que no están considerados en los costos de producción.

El objetivo de la investigación fue plantear una solución de tal manera que mejore el rendimiento, ya que si se terminan los productos a tiempo y en el volumen demandado por los clientes con una tasa de error mínima, la empresa cumplirá con el plazo pactado con los clientes, con lo cual no se recurrirá a costos de reprocesamiento, se reducirán los cuellos de botella y así se haría fluida la producción, lo que conllevaría a que la empresa genere más ingresos, reduciendo sus costos.

Se seleccionó una metaheurística en vez de un método exacto por la posibilidad de incrementar ayudantes en el proceso en cuyo caso no es necesario modificar el software pues ese es un dato de entrada.

En general los métodos que buscan buenas aproximaciones son más adecuados comparados con los métodos exactos, los cuales aspiran a soluciones óptimas, Según Vélez y Montoya [9] *“La mayor ventaja de los metaheurísticos frente a otros métodos está en su gran flexibilidad, lo que permite usarlos para abordar una amplia gama de problemas (Voß y Woodruff, 2006). Esta característica ha hecho que en los últimos años hayan cobrado una relevancia que se ve reflejada en el surgimiento de revistas especializadas como el Journal of Heuristics y el INFORMS Journal on Computing, y en la publicación de un importante número de libros, entre los que se destacan los de Aarts y Lenstra, 2003; Blum y Roli, 2003; Glover y Kochenberger, 2003; Martí, 2003; Melián, Moreno y Vega, 2003; Osman y Kelly, 1996, y Sait y Youssef, 1999.”*

En el acápite 2 se presenta la fundamentación teórica tanto del problema de balance de línea de producción como de la metaheurística búsqueda tabú.

En el acápite 3 se describe los pasos que se siguió durante la investigación para llegar a la mejor solución factible, aplicando la Búsqueda Tabú al BLP, para que el lector pueda reproducir la misma experiencia a otros problemas similares y sacar sus propias conclusiones.

En el acápite 4, se presentan los resultados obtenidos en la investigación por medio del software en la empresa de calzado, además se presenta la implementación y la evaluación de la eficiencia de la solución en términos de volúmenes y costos de producción. Finalmente se presenta las conclusiones y recomendaciones.

## 2. Fundamentación teórica

Raymundo P Adolfo en “Balance de sistemas de producción integrados, Producción-inventario [10] presenta una aplicación básica utilizando modelos de balance de producción usando métodos exactos, en el presente estudio se ha utilizado una meta heurística para resolver problemas más complejos en el balance de línea de producción.

La tesis “Minimización de los costos totales en el problema de balanceo de línea con ciclo variable y estaciones en paralelo” de Mejía [11] presenta un marco teórico que ha servido de base para el presente estudio.

### 2.1. Balance de Línea de Producción

*“El Balance de líneas es la agrupación de las actividades que sigue una secuencia de trabajo en una planta de producción, con el fin de lograr el máximo aprovechamiento de los recursos como son: la mano de obra y los equipos y de esa forma reducir o eliminar el tiempo ocioso” [11].*

Los factores que tienen más influencia en la selección del diseño de la línea de producción son el flujo del producto y la efectividad o utilización de los recursos de labor y maquinaria. Ambos factores son impactados en forma significativa por el balanceo de línea y por el despliegue de la planta física [12].

Hay ciertas restricciones que pueden complicar el problema y pueden plantearse cuestiones importantes acerca de algunos aspectos del diseño que no se refieran a la secuencia ni al balance. Se presentan otros problemas de balance cuando el tiempo de una o más tareas excede el ciclo para el que nosotros estamos tratando de obtener el balance. [12]

El (BLP) ha sido clasificado como NP-Hard es decir no se ha encontrado un algoritmo polinómico para solucionarlo, por lo que el tiempo para encontrar una solución crece exponencialmente con respecto al tamaño del problema.

### 2.2. Métodos de Solución

Para la solución razonable de los problemas difíciles se utiliza métodos de aproximación como son las heurísticas y las metaheurísticas.

#### 2.2.1 Heurísticas

*“Se califica de heurístico a un procedimiento para el que se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de alta calidad con un costo computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad o su factibilidad, e incluso, en algunos casos, no se llegue a establecer lo cerca que se está de dicha situación. Se usa el calificativo heurístico en contraposición a exacto” Melian [13]*

#### Clasificación de heurísticas

Según Martí [14], las heurísticas se clasifican de la siguiente manera:

- Métodos de Descomposición. El problema original se descompone en subproblemas más sencillos de resolver, teniendo en cuenta, aunque sea de manera general, que ambos pertenecen al mismo problema.
- Métodos Inductivos. La idea de estos métodos es generalizar de versiones pequeñas o más sencillas al caso completo. Propiedades o técnicas identificadas en estos casos más fáciles de analizar pueden ser aplicadas al problema completo.

- **Métodos de Reducción.** Consiste en identificar propiedades que se cumplen mayoritariamente por las buenas soluciones e introducirlas como restricciones del problema. El objeto es restringir el espacio de soluciones simplificando el problema. El riesgo obvio es dejar fuera las soluciones óptimas del problema original.
- **Métodos Constructivos.** Consisten en construir literalmente paso a paso una solución del problema. Usualmente son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección en cada iteración.
- **Métodos de Búsqueda Local.** Los procedimientos de búsqueda o mejora local comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El procedimiento realiza en cada paso un movimiento de una solución a otra con mejor valor. El método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible que la mejore.

El método utilizado en este trabajo de investigación es el de búsqueda local.

### 2.2.2 Metaheurística

Las metaheurísticas son estrategias o reglas inteligentes que sirven para mejorar los procedimientos o diseños heurísticos muy generales con un alto grado de rendimiento que resolverá el problema dado.

Aun así, estas reglas no son rígidas y tienen flexibilidad, permitiendo, por un lado, el diseño de diferentes métodos basados en la misma metodología, pero, dejando por otro lado al investigador la libertad para tomar decisiones e iniciativas al diseñar el método.

Tipos de metaheurística [13]

- Las **metaheurísticas de relajación**, que se refiere a procedimientos de solución que hace modificaciones en el modelo para que simplifique el problema.
- Las **metaheurísticas de búsqueda**, que son las que guían los procedimientos que usan transformaciones o movimientos para recorrer las soluciones alternativas y explorar los entornos asociados.
- Las **metaheurísticas evolutivas**, las cuales se enfocan en los procedimientos basados en los conjuntos de soluciones que evolucionan dentro de su mismo espacio.

Entre los algoritmos de búsqueda más utilizados está la búsqueda tabú.

### 2.3. Búsqueda Tabú

La búsqueda tabú es un procedimiento heurístico de “alto nivel” introducido y desarrollado en su forma

actual por Fred Glover en 1986 el cual se utiliza con gran éxito para resolver problemas de optimización cuya característica principal es la de “escapar” de la optimalidad local [14].

#### 2.3.1. Características de la Búsqueda tabú:

Glover, F y Melián, B. [15] definen la búsqueda tabú como una técnica que se basa en la premisa de que para poder calificar de inteligente la solución de un problema, debe incorporar memoria adaptativa y exploración sensible. El uso de la memoria adaptativa contrasta con diseños “desmemoriados”, tales como los que se inspiran en metáforas de física y la biología, y con diseños de “memoria rígida”, como aquellos ejemplificados por ramificación y acotamiento, y sus “primos” de IA (inteligencia artificial).

La búsqueda tabú se caracteriza porque utiliza una estrategia basada en el uso de estructuras de memoria para escapar de los óptimos locales, en los que se puede caer al “moverse” de una solución a otra por el espacio de soluciones. Como dicen Glover y Kochenberger en *Handbook of Metaheuristics* [16] las estructuras de memoria usadas son de dos tipos:

**Memoria explícita.** Esta memoria conserva soluciones completas, y consiste típicamente en una elite de soluciones visitadas durante la búsqueda.

Estas soluciones especiales se introducen estratégicamente para ampliar  $N^*(x)$  (otro entorno de soluciones), que registra vecindarios altamente atractivos pero inexplorados de las soluciones de elite, y así presentar opciones útiles que no se encuentran en  $N(x)$  (conjunto de soluciones).

**Memoria basada en atributos.** La cual guarda información sobre atributos de las soluciones que cambian al moverse de una solución a otra. Por ejemplo, en un contexto de grafos, los atributos pueden consistir de nodos o arcos que se añaden, se suprimen o se sustituyen por los movimientos ejecutados. En formulaciones de problemas más abstractas, los atributos pueden corresponder a valores de variables o funciones.

Memoria: Principalmente la estructura de la memoria de la búsqueda tabú está relacionada con cuatro dimensiones principales:

- Calidad
- Influencia
- Memoria de corto plazo (reciente)
- Memoria de largo plazo (frecuente)

#### 2.3.2 Estrategias de búsqueda: Pueden ser de corto o de largo plazo.

**Memoria de corto plazo.** La memoria de corto plazo que es comúnmente usada, lleva la cuenta de los atributos de solución que han sido cambiados en el pa-



sado reciente. Para explorar esta memoria, los atributos seleccionados que se presentan en soluciones recientemente visitadas son designados como “tabú-activos”, las soluciones que contienen elementos tabú-activos, o combinaciones particulares de estos atributos, son las que se convierten en tabú.

Sus elementos son

- **La lista tabú.**- arreglo donde se registra la memoria reciente.
- **Tabú tenure.**- cantidad de iteraciones durante las cuales las soluciones que se encuentran en la lista tabú estarán penalizadas, es decir, aunque sean las mejores soluciones no podrán ser elegidas.
- **Criterio de aspiración.**- dan umbrales de atracción, los cuales controlan el hecho de que las aspiraciones puedan ser consideradas admisibles a pesar de estar clasificadas como tabú.

**Memoria de largo plazo.**- tiene dos componentes altamente importantes:

- **La estrategia de intensificación.** Está basada en la modificación de reglas de elección de tal manera que se favorezcan combinaciones de movimientos y características de solución que históricamente hayan sido buenas. Pueden además iniciar un regreso hacia regiones atractivas para buscar en ellas más extensamente.
- **La estrategia de diversificación.** Está diseñada para conducir la búsqueda hacia nuevas regiones. Con frecuencia están basadas en modificar las reglas de elección para llevar a atributos de la solución que no hayan sido usados frecuentemente. Alternativamente, pueden introducir dichos atributos al reiniciar parcial o completamente el proceso de solución.

### 2.3.3. Algoritmo básico de la búsqueda tabú:

El algoritmo de búsqueda tabú básico involucra las siguientes etapas [17]:

- **Configuración inicial.** La cual puede ser aleatoria
- **Generación del vecindario.**-Esta etapa es fundamental en el proceso ya que de ella depende, en gran parte, el éxito de la búsqueda.
- **Selección del mejor vecino.** Una vez que el vecindario es definido, cada vecino es evaluado para determinar el valor de su función objetivo y si cumple o no con las restricciones planteadas; Los vecinos son clasificados en un ranking de acuerdo al valor de la función objetivo y el proceso selecciona el mejor candidato. El primer candidato de la lista (de mejor función objetivo) es seleccionado si él no es tabú (prohibido), de lo contrario se busca entre los siguientes vecinos.

- **Actualización de la lista Tabú.** Finalmente cuando un mejor vecino es seleccionado, la posición de la configuración  $X$  a partir de la cual fue generado se debe prohibir durante  $k$  iteraciones (tabu tenure) y los sitios que están prohibidos deben disminuir su estado tabú en una iteración. Esto corresponde al proceso de actualización de la estructura tabú.

A continuación se presenta el esquema básico del algoritmo tabú. Escobar [18]

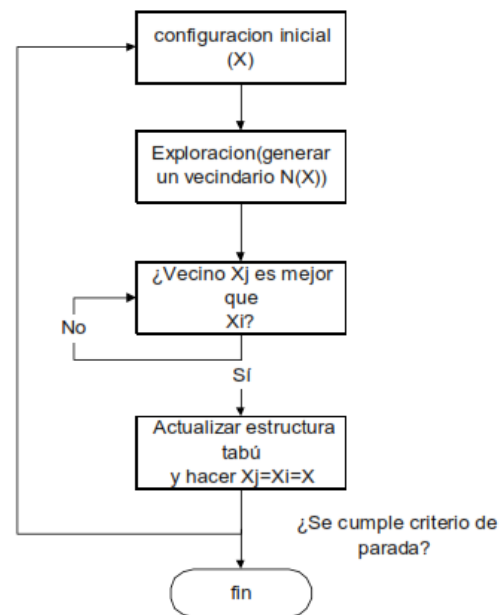


Figura N° 1: Diagrama de flujo del Algoritmo básico de la búsqueda tabú

## 2.4. Marco conceptual

Se deben precisar ciertos conceptos para la mejor comprensión del presente estudio.

- **Demora:** Se refiere al retraso en el cumplimiento de una obligación desde el momento en que esta se puede exigir. En nuestro caso se dan las demoras en la producción ya sea en el corte, armado, aparado, ensuelado y/o acabado.
- **Velocidad:** Llamamos velocidad a la cualidad física que permite al trabajador procesar un producto (calzado) en el menor tiempo posible, pero esto tiene su desventaja ya que si solo se aplica la velocidad tal vez se incurra a mayores fallas.
- **Tiempo de trabajo por producto:** Se refiere a lo que un trabajador puede hacer en un determinado intervalo de tiempo para un cierto producto (calzado), aquí se ve que tan rápido puede hacer un producto, que en nuestro caso es un par de zapatos, para así poder aprovechar la capacidad de cada trabajador.

- **Calidad:** Se refiere al grado en el que un conjunto de características esenciales cumplen con las necesidades establecidas, para que estas sean comparadas con otras de su misma especie que en nuestro caso son zapatos.
- **Errores o fallas:** Definimos la palabra error o fallas, a la acción equivocada de hacer un producto (calzado) incumpliendo las especificaciones de la empresa que requiere el producto, como son las terminaciones de las costuras o la ubicación de las etiquetas, entre otras.
- **Cuellos de botella:** Definimos los cuellos de botella como la acumulación de los productos no terminados en una determinada estación de trabajo.
- **Eficiencia de balance de línea:** Definimos como el uso racional de los recursos disponibles para la fabricación de los productos, es decir obtener más productos con menos recursos.

### 3. Método

Para realizar el estudio se elaboró un plan de trabajo con de las siguientes etapas:

- Recopilación de datos del sistema en estudio.
- Análisis de los datos recolectados para estimar los tiempos promedios.
- Construcción del modelo utilizando la Búsqueda Tabú para el balance de línea de producción.
- Elaboración de un software para la implementación de la metaheurística Búsqueda Tabú.
- Aplicación del algoritmo.
- Análisis de los resultados para la toma de decisiones.

#### 3.1. Recopilación de datos

Para recopilar los datos (tiempos) se utilizó el método del cronometraje y una hoja de observación, los tiempos están en horas para un lote de una docena de pares de zapatos.

Se tomó la data histórica del volumen de producción de la empresa, que fue del mes de abril a junio del año 2011, en este trabajo se concentra solo una campaña, la temporada de invierno (de febrero a julio), ya que en el rubro de la confección del calzados se trabaja por temporadas.

A continuación se muestra en la tabla N°1: la data de un trabajador con su correspondiente producción.

Una tabla similar se construyó por cada trabajador y se contabilizó los totales por mes por cada proceso.

Las tareas evaluadas fueron divididas en elementos operativos u operaciones elementales fáciles de reconocer y de separar de los demás, en los que está muy claro su comienzo y terminación, esto se hizo para cada subproceso del proceso de producción. Los subprocesos que fueron evaluados son: Corte, aparado, armado, ensuelado y acabado; a cada una de las personas que trabajan en estos subprocesos se les cronómetro el tiempo de sus actividades. Cabe resaltar que también se observaron los tipos de fallas que se cometen en cada una de los procesos.

**Tabla N° 1:** Data de la producción de un trabajador

TRABAJADOR 1					
Fecha	Modelo	Color	N° de tarjeta	Cliente	Pares
10/05/2011	B-241	sintético gris	380	LITZY	12
11/05/2011	B-242	sintético bronce	389	LITZY	12
13/05/2011	SCO-114	cuero vino	353	LITZY	14
14/05/2011	SCO-112	cuero marrón	411	LITZY	14
16/05/2011	B-241	sintético gris	378	LITZY	12
17/05/2011	B-240	sintético marrón	425	LITZY	12
17/05/2011	SCO-112	cuero beige	413	LITZY	14

#### 3.2. Análisis de los datos recolectados

Una vez que se obtuvieron los datos (tiempos en horas) se procedió a analizarlos utilizando el software SPSS y EXCEL,

Se graficó diagramas de cajas para analizar los tiempos que están fuera de control y que tanto afectan al promedio para cada subproceso del sistema de producción.

Se calculó las estadísticas descriptivas para encontrar las características de los datos y hacer una interpretación; y así poder emitir una conclusión respecto al estimador que represente las duraciones de las actividades. En pocas palabras encontrar medidas que permitan hacer una descripción de las características del conjunto de datos para cada subproceso.

Se graficó las frecuencia de cada subproceso para analizar el comportamiento y la tendencia de los datos gráficamente. Se halló los intervalos de confianza de cada subproceso para saber que tan representativos son los datos para hallar un buen estimador, con un 95 % de confiabilidad.

#### 3.3. Construcción del modelo Búsqueda Tabú

En el punto anterior, se obtuvieron los tiempos en horas para cada subproceso de producción para comenzar a construir el modelo que mejor se asemeje a la realidad.

Se optó por aplicar una metaheurística para resolver el balance línea de producción, la metaheurística elegida fue la “Búsqueda Tabú”.

A continuación se define el problema del balance de línea de producción en términos de la Búsqueda Tabú:

**Función Objetivo:** Minimizar la sobrecarga de trabajo de los trabajadores.

**Espacio de soluciones:** Una matriz de  $n \times m$  posiciones donde se ubica en las filas a los trabajadores ( $n$ ) y cada columna representa una actividad ( $m$ ). A continuación se presenta un ejemplo.

Tabla N° 2: Representación de una solución

	A1	A2	A3	A4	A5
T1	0	9	0	0	0
T2	3	0	0	2	0
T3	0	0	0	0	8
T4	0	0	5	0	0

Al trabajador 1 se le asigna la actividad 2 siendo su duración de 9 minutos.

**Movimiento:** Se elegirá el trabajador que tenga el mayor tiempo acumulado en las actividades que desempeña y se le asignará a otro trabajador alguna de sus actividades. La elección de dicha actividad estará en función de su duración, eligiéndose la menor.

**Vecindario de X:** El vecindario está conformado por los demás trabajadores no asignados a dicha actividad, por lo tanto, el número de vecinos es igual a (trabajadores - 1).

**Lista tabú:** Contiene los movimientos considerados prohibidos, se registran los atributos de las permutaciones (el intercambio de actividades a los trabajadores), para prevenir que se vuelvan a tomar otra vez esta solución. La solución entra a la tabla tabú y permanece un número de periodos previamente establecido (*tabú tenure*).

La forma de la lista tabú se presenta en la siguiente figura:

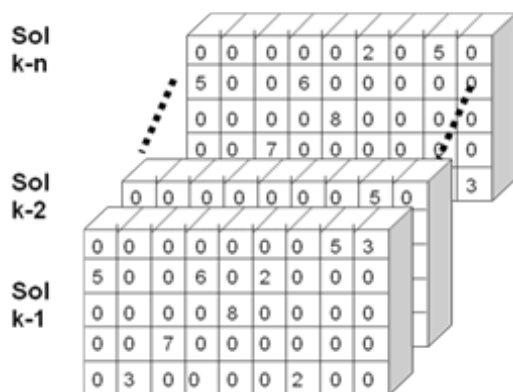


Figura N° 2: Representación de la lista tabú

### 3.4. Elaboración del software

Se elaboró un software con características únicas del problema del balance de línea de producción, este software fue elaborado en el lenguaje de computación visual C++ 2008.

El algoritmo se muestra en el cuadro N° 1.

Cuadro N° 1. Algoritmo computacional

	Qué hace	Contenidos
void Inicio()	Entrada de parámetros:	Determinar: Número máximo de iteraciones Tabú tenure Número de iteraciones de la memoria largo plazo(frecuencias) Variación de la FO
	Entrada de datos	Número actividades, Número de trabajadores Tiempos de las actividades
	Construcción de solución inicial	construir una solución con números aleatorios o construir manualmente
	Matriz de tiempos	Cambia la solución inicial por una matriz de tiempos.
void listatabu()	Traslado a la lista tabú	Se guardan la última solución en la lista tabú
void punto pivote()	Se divide en dos subrutinas para hallar el punto pivote	En la primera subrutina se selecciona al trabajador que tenga el mayor tiempo acumulado, pero que por lo menos tenga asignado 2 actividades.
		En la segunda subrutina se elige la actividad que tenga el menor tiempo.
Void evalua_solucion()	Se evalúa la matriz de tiempos	En esta subrutina se halla el promedio de los tiempos de los trabajadores en las actividades, luego se calcula la diferencia entre el tiempo acumulado de cada trabajador y el tiempo promedio en valor absoluto. La función objetivo se calcula con la suma de las diferencias entre la “suma de tiempo” y el promedio, esto da como resultado la eficiencia del balance.
Repetir hasta el máximo número de iteraciones	Determinar los vecinos posibles	Se elige el trabajador que tenga el mayor tiempo acumulado en las actividades que desempeña y una de las mismas se le asigna a otro trabajador.
	Hallar el mejor vecino, ver que no esté en la lista tabú	Se evalúa cada cambio de actividad en la función objetivo y se selecciona el que da el menor valor, siempre y cuando no esté en la lista tabú.
	Enviarla a la lista tabú	Una vez ubicada la mejor solución se registra en la lista tabú y queda penalizada durante n iteraciones.

A continuación se presenta el funcionamiento paso a paso del algoritmo de Búsqueda Tabú al problema de Balance de Línea de Producción

### 3.5. Aplicación del algoritmo

#### 3.5.1 Selección de la Solución inicial

En la temporada de invierno del 2011 se trabajó con la siguiente distribución de trabajadores:

Asignación de trabajadores (T) a actividades (A).

	A1	A2	A3	A4	A5
T1	1.72	0	0	0	0
T2	0	0	0	1.99	0
T3	0	0	4.51	0	0
T4	0	3.77	0	0	2.79

La función objetivo de cada solución se calcula de la siguiente manera:

Se procede a sumar todos los tiempos de las actividades de cada trabajador, para poder hallar los tiempos totales y así tener el promedio de los tiempos totales, para determinar la función objetivo.

	A1	A2	A3	A4	A5	Suma_tiempos	FO
T1	1.72	0	0	0	0	1.72	1.975
T2	0	0	0	1.99	0	1.99	1.705
T3	0	0	4.51	0	0	4.51	0.815
T4	0	3.77	0	0	2.79	6.56	2.865
						3.695	7.36

El promedio es de 3.70 horas, la función objetivo se halla con la suma de las diferencias entre la "suma de tiempo" y el promedio, esto da como resultado la eficiencia del balance, que es la función objetivo, en este caso la función objetivo es de 7.36, se calculó todo con cuatro decimales, solo se redondea a dos decimales para efectos de impresión.

Se itera para seleccionar la siguiente solución

Se halla el punto pivote para comenzar a iterar.

	A1	A2	A3	A4	A5	Suma_tiempos
T1	1.72	0	0	0	0	1.72
T2	0	0	0	1.99	0	1.99
T3	0	0	4.51	0	0	4.51
T4	0	3.77	0	0	2.79	6.56

En este caso el punto pivote es el punto (4,5), es decir el trabajador 4 en la actividad 5; se elige el punto pivote seleccionando el trabajador que mayor tiempo acumulado posee para luego elegir la actividad que en menor tiempo desempeña.

Seleccionado el punto pivote, comienza la iteración 1 (K=1) el vecindario está conformado por todas las posibles combinaciones que se pueden hacer asignando el tiempo de la actividad a otro trabajador, es decir, número de trabajadores - 1 que en este caso es 3.

Se evalúa las 3 posibles soluciones y se ordena de menor a mayor.

vecinos	celda	celda	FO
1	(4,5)	(1,5)	3.41
2	(4,5)	(2,5)	3.95
3	(4,5)	(3,5)	7.36

La anterior solución era 7.36, por lo tanto en la iteración 1 hay 2 resultados que reduce la carga de los trabajadores, como en este problema se trata de equilibrar las cargas se elige la de menor función objetivo, cuando hay empate se puede utilizar un mecanismo aleatorio para seleccionar el mejor movimiento.

Se escoge el movimiento (4,5); (1,5), es decir antes el trabajador 4 hacía la actividad 5, ahora el trabajador 1 hace la actividad 5.

	A1	A2	A3	A4	A5	Suma_tiempos	FO
T1	1.72	0	0	0	2.79	4.51	0.82
T2	0	0	0	1.99	0	1.99	1.71
T3	0	0	4.51	0	0	4.51	0.82
T4	0	3.77	0	0	0	3.77	0.08
						3.70	3.41

La eficiencia del balance (función objetivo) es de 3.41, la cual se obtiene al quitarle la actividad 5 al trabajador 4 y asignársela al trabajador 1.

#### 3.5.2 Se ingresa la solución la lista tabú.

El tamaño de la lista (tabú tenure) es tres. Es decir se puede registrar en la lista tabú los 3 últimos movimientos. Inicialmente las tres matrices contienen sólo ceros.

La solución entra a la lista tabú y permanece 3 periodos.

Tabú Tenure =3

		0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
1.72	0	0	0	2.79	0	0
0	0	0	1.99	0	0	0
0	0	4.51	0	0	0	0
0	3.77	0	0	0	0	0

A medida que se itere se va a desplazar hacia atrás hasta que llegue a la última matriz y luego queda liberada de la lista tabú.

#### 3.5.3 Iteraciones

Se sigue iterando para K=2, Se halla el punto pivote.

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_tiempos
T1	1.72	0	0	0	2.79	4.51
T2	0	0	0	1.99	0	1.99
T3	0	0	4.51	0	0	4.51
T4	0	3.77	0	0	0	3.77

La fila con mayor suma de tiempos es la fila 1; el trabajador 1 tiene asignado 2 actividades la actividad 1



y 5, se escoge la de menor duración que es la actividad 1, es decir, el punto pivote para esta solución es el (1,1).

Vecindario

vecinos	celda	celda	FO
1	(1,1)	(2,1)	1.81
2	(1,1)	(3,1)	5.22
3	(1,1)	(4,1)	5.22

La permutación de la actividad 1 del trabajador 1 al trabajador 2 es la mejor ya que produce un eficiencia del balance de 1.81, con esta solución se está mejorando el resultado anterior.

Se escoge el movimiento (1,1); (2,1), es decir antes el trabajador 1 realizaba la actividad 1, ahora el trabajador 2 realiza la actividad 1.

La matriz de tiempos queda de la siguiente manera:

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_tiempos	FO
T1	0	0	0	0	2.79	2.79	0.905
T2	1.72	0	0	1.99	0	3.71	0.015
T3	0	0	4.51	0	0	4.51	0.815
T4	0	3.77	0	0	0	3.77	0.075
						3.70	1.810

En este caso la eficiencia del balance es de 1.81, la cual se obtiene al desasignarle la actividad 1 al trabajador 1 y asignársela al trabajador 2.

Esta solución queda penalizada en la lista tabú.

		0	0	0	0	0	0
	1.72	0	0	0	2.79	0	
0	0	0	0	2.79	0	0	
1.72	0	0	1.99	0	0	0	
0	0	4.51	0	0	0	0	
0	3.77	0	0	0	0	0	

Iterando **K=3**,

Se halla el punto pivote.

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_tiempos
T1	0	0	0	0	2.79	2.79
T2	1.72	0	0	1.99	0	3.71
T3	0	0	4.51	0	0	4.51
T4	0	3.77	0	0	0	3.77

La fila con mayor suma de tiempos es la fila 2; el trabajador 2 tiene asignado 2 actividades la actividad 1 y 4, se escoge la de menor duración que es la actividad 1, es decir, el punto pivote para esta solución es el (2,1).

Vecindario

vecinos	celda	celda	FO
1	(2,1)	(1,1)	3.41 T
2	(2,1)	(3,1)	5.22
3	(2,1)	(4,1)	5.22

La permutación de la actividad 1 del trabajador 2 al trabajador 1 es la mejor en esta iteración, pero como es tabú no puede ser elegida, entonces la permutación de la actividad 1 del trabajadores 2 al trabajador 3 a pesar de que produce una eficiencia del balance de 5.22 y desmejora a la anterior función objetivo es la elegida para ser la solución en la siguiente iteración.

Se escoge el movimiento (2,1); (3,1), es decir antes el trabajador 2 realizaba la actividad 1, ahora el trabajador 3 realiza la actividad 1.

La matriz de tiempos queda de la siguiente manera:

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_tiempos	FO
T1	0	0	0	0	2.79	2.79	0.91
T2	0	0	0	1.99	0	1.99	1.71
T3	1.72	0	4.51	0	0	6.23	2.54
T4	0	3.77	0	0	0	3.77	0.08
						3.70	5.22

En este caso la eficiencia del balance es de 5.22, la cual se obtiene al desasignarle la actividad 1 al trabajador 2 y asignársela al trabajador 3.

Esta solución queda penalizada en la lista tabú.

		1.72	0	0	0	2.79	
	0	0	0	0	2.79	0	
0	1.72	0	0	2.79	0	0	
0	0	0	1.99	0	0	0	
1.72	0	4.51	0	0	0	0	
0	3.77	0	0	0	0	0	

Iterando **K=4**,

Se halla el punto pivote.

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_tiempos
T1	0	0	0	0	2.79	2.79
T2	0	0	0	1.99	0	1.99
T3	1.72	0	4.51	0	0	6.23
T4	0	3.77	0	0	0	3.77
						3.70

La fila con mayor suma de tiempos es la fila 3; el trabajador 3 tiene asignado 2 actividades, la actividad 1 y 3, se escoge la de menor duración que es la actividad 1, es decir, el punto pivote para esta solución es el (3,1).

Vecindario

vecinos	Trabajador	Trabajador	FO
2	(3,1)	(2,1)	1.81 T
1	(3,1)	(1,1)	3.41 T
3	(3,1)	(4,1)	5.22

La permutación de la actividad 1 del trabajador 3 al trabajador 2 ó del trabajador 3 al trabajador 1 son las mejores en esta iteración, pero como son tabú ninguna puede ser elegida, entonces la permutación de la acti-

vidad 1 del trabajador 3 al trabajador 4 a pesar de que produce una eficiencia del balance de 5.22 y permanece igual a la anterior función objetivo es la elegida para ser la solución en la siguiente iteración.

Se escoge el movimiento (3,1); (4,1), es decir antes el trabajador 3 hacía la actividad 1, ahora el trabajador 4 hace la actividad 1.

La matriz de tiempos queda de la siguiente manera:

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_ tiempos	FO
T1	0	0	0	0	2.79	2.79	0.91
T2	0	0	0	1.99	0	1.99	1.71
T3	0	0	4.51	0	0	4.51	0.82
T4	1.72	3.77	0	0	0	5.49	1.80
						3.70	5.22

En este caso la eficiencia del balance es de 5.22, la cual se obtiene al desasignarle la actividad 1 al trabajador 3 y asignársela al trabajador 4.

Esta solución queda penalizada en la lista tabú.

			0	0	0	0	2.79	
			0	0	0	0	2.79	0
			0	0	0	0	2.79	0
	0	0	0	0	1.99	0	0	0
	0	0	4.51	0	0	0	0	0
	1.72	3.77	0	0	0	0	0	0

Se observa que la solución inicial queda liberada por haber pasado 3 iteraciones de penalización.

Solución inicial

1.72	0	0	0	2.79
0	0	0	1.99	0
0	0	4.51	0	0
0	3.77	0	0	0

Ahora esta solución se puede volver a usar.

Iterando **K=5**,

Se halla el punto pivote.

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_ tiempos	FO
T1	0	0	0	0	2.79	2.79	0.91
T2	0	0	0	1.99	0	1.99	1.71
T3	0	0	4.51	0	0	4.51	0.82
T4	1.72	3.77	0	0	0	5.49	1.80
						3.70	5.22

La fila con mayor suma de tiempos es la fila 4; el trabajador 4 tiene asignado 2 actividades, la actividad 1 y 2, se escoge la de menor duración que es la actividad 1, es decir, el punto pivote para esta solución es el (4,1).

Vecindario

vecinos	Trabajador	Trabajador	FO
2	(4,1)	(2,1)	1.81 T
1	(4,1)	(1,1)	3.41
3	(4,1)	(3,1)	5.22

Se repite las iteraciones hasta completar el máximo número de iteraciones permitido.

### 3.5.4 Aplicación del criterio de aspiración

En la iteración K=2, la permutación de la actividad 1 entre los trabajadores 4 y 2 era la mejor, pero era tabú, sin embargo realizar esta permutación produce el mejor valor encontrado hasta el momento con el valor 1.81 de la función objetivo, es por eso que se puede recurrir al **criterio de aspiración**, que en este caso tiene una variación de 0 a 3 y el valor de 1.81, está dentro de dicho rango. Por la naturaleza del problema no hay otras soluciones mejores, pero el proceso continúa para tratar de encontrar otras soluciones.

Como el objetivo es encontrar una solución que minimice la función objetivo y que esté dentro del rango que hemos asignado (en el caso perfecto la solución sería de 0), el criterio de aspiración consiste en quitarle la restricción tabú a una solución que produce un resultado que este dentro del rango autorizado pre-establecido, cuando se procesa en un programa computacional, ocasiona que no se diversifique la búsqueda y no se encuentren más soluciones.

### 3.5.5 Aplicación de la memoria de largo plazo.

Como el tamaño de la lista tabú es un número finito, en algún momento un movimiento saldrá de la lista tabú y podrá ser elegido, se corre el riesgo de usar esa misma solución varias veces como un círculo vicioso, para diversificar la búsqueda se usa **la memoria de largo plazo**, en este caso, la estructura que registra la frecuencia de ocurrencia de los movimientos.

Por ejemplo, suponiendo que no se está considerando ningún criterio de aspiración y se han realizado ya 60 iteraciones

Iteración **K=60**,

Se halla el punto pivote.

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_ tiempos	FO
T1	0	0	0	0	2.79	2.79	0.91
T2	1.72	0	0	0	0	1.72	1.98
T3	0	0	4.51	0	0	4.51	0.82
T4	0	3.77	0	1.99	0	5.76	2.07
						3.70	5.76

El punto pivote para esta solución es el (4,4).

## Vecindario

vecinos	celda	celda	FO
1	(4,4)	(1,4)	3.95
2	(4,4)	(2,4)	3.41
3	(4,4)	(3,4)	7.36

Tabla de frecuencias o memoria de largo plazo.

	T2	T3	T4
T1	15	9	7
T2		11	10
T3			8

Una permutación entre el trabajador 1 y el trabajador 2 ha ocurrido 15 veces en 60 iteraciones.

Al evaluar los 3 mejores candidatos para pasar a siguiente iteración ( $K=61$ ) se observa que el elegido debería ser la permutación de la actividad 4 entre los trabajadores 4 y 2 pues da un valor para la función objetivo igual 3.41, pero, al revisar la tabla de frecuencias se observa que dicho movimiento ha ocurrido 10 veces en el pasado.

Por lo tanto el movimiento de la actividad 4 entre los trabajadores 4 y 2 debe ser penalizado para que no vuelva a ocurrir hasta que la frecuencia de los otros la supere, entonces el siguiente candidato será el movimiento de la actividad 4 entre los trabajadores 4 y 1, porque tiene una frecuencia menor (7) y la función objetivo es menor que la del movimiento de la actividad 4 entre los trabajadores 4 y 3.

En algún momento todas las permutaciones van a tener el mismo número de frecuencia en ese caso el algoritmo toma otro método de **diversificación** que se explica a continuación:

Tomando como referencia la iteración  $K=60$

Se halla el punto pivote para comenzar a iterar.

	A1	A2	A3	A4	A5	suma_ tiempos	FO
T1	0	0	0	0	2.79	2.79	0.91
T2	1.72	0	0	0	0	1.72	1.98
T3	0	0	4.51	0	0	4.51	0.82
T4	0	3.77	0	1.99	0	5.76	2.07
						3.70	5.76

En este caso el punto pivote es el punto (4,2); se eligió el punto pivote seleccionando el trabajador que mayor tiempo acumulado posee para luego elegir la actividad que en mayor tiempo desempeña, esto se hace para cambiar el espacio de soluciones a otro vecindario, como podemos apreciar es parecido a lo que se ha hecho antes con la única diferencia que en vez de elegir la actividad que menor tiempo desempeña se eligió la que mayor tiempo desempeña.

## Vecindario

vecinos	celda	celda	FO
1	(4,2)	(1,2)	7.36
2	(4,2)	(2,2)	5.22
3	(4,2)	(3,2)	9.17

Como se puede apreciar es un nuevo vecindario no explorado. Este movimiento llevará el proceso de búsqueda a regiones menos exploradas.

## 3.5.6 Finalización del Proceso

El procedimiento se repite hasta superar el máximo número de iteraciones permitidas.

## 4. Análisis de resultados

## 4.1. Estimación de tiempos estándar de cada subproceso

La cantidad de datos de cada subprocesos analizado es diferente, esto se debe a la habilidad de cada trabajador en su área, cada trabajador trabaja a su ritmo.

Se registró los tiempos de cada subprocesos y se construyó la siguiente tabla:

Tabla N° 3: Cantidad de datos de cada subproceso de producción

Subproceso	Cantidad de datos
Corte	810
Aparado	901
Armado	913
Ensuelado	789
Acabado	951

Se procesó los datos y se estimó los valores estándar:

Tabla N° 4: intervalos de confianza de los subprocesos de producción.

Actividad	Tiempo estimado en horas	Intervalo de confianza al 95%	
		Inferior	Superior
Corte	1.72	1,6907	1,7309
Aparado	3.77	3,7472	3,7944
Armado	4.51	4,4809	4,5391
Ensuelado	1.99	1,9800	2,0039
Acabado	2.79	2,7778	2,8046

## 4.2. Resultados de la aplicación del software

Se ejecutó el software con los tiempos de cada subproceso, introduciendo cuantas actividades tiene el proceso de producción y con cuantos ayudantes se cuenta para cada subproceso y también se ingresa una cota superior para delimitar la función objetivo, ya que solo en los balances perfectos la eficiencia del balance es cero.

Los parámetros ingresados al software fueron los siguientes:

- Número de iteración en que se comienza a usar el criterio de aspiración: **10**.
- Número de iteración en que se comienza a usar la memoria de largo plazo: **20**.
- El máximo número de iteraciones permitidas en el software: **100**.
- La cota superior de la solución deseada: **3**.
- Número de actividades del proceso de producción: **5**.
- Número de trabajadores del proceso de producción: **4**.
- El tiempo de cada una de las actividades del proceso de producción(en minutos):
  - El tiempo de la actividad 1: **1.72**.
  - El tiempo de la actividad 2: **3.77**.
  - El tiempo de la actividad 3: **4.51**.
  - El tiempo de la actividad 4: **1.99**.
  - El tiempo de la actividad 5: **2.79**.
- Se ingresó la matriz de asignación de los trabajadores (solución inicial):

	A1	A2	A3	A4	A5
T1	1	0	0	0	0
T2	0	0	0	1	0
T3	0	0	1	0	0
T4	0	1	0	0	1

- Se ingresó la matriz de tiempo de los trabajadores:

	A1	A2	A3	A4	A5
T1	1.72	0	0	0	0
T2	0	0	0	1.99	0
T3	0	0	4.51	0	0
T4	0	3.77	0	0	2.79

Eficiencia del balance de la solución inicial (función objetivo): **7.36**.

El software generó varias soluciones con la menor función objetivo (eficiencia del balance), las cuales se presentan a continuación:

En el proceso de producción del año 2011 la eficiencia del balance era de 7.36 horas, con el algoritmo se logró mejorar la eficiencia del balance a 1.81 horas, lo que quiere decir que se disminuyó el tiempo de ocio, porque ahora hay una mejor distribución del personal para los distintos subprocesos del sistema de producción.

Alternativas de solución encontradas:

De todas las alternativas óptimas que proporcionó el programa computacional se eligió la alternativa 1

como solución al problema y se implementó en la temporada de invierno del 2012.

Alternativa 1:

	A1	A2	A3	A4	A5
T1	0	0	0	0	1
T2	0	0	1	0	0
T3	1	0	0	1	0
T4	0	1	0	0	0

Interpretación:

Actividad 1: Se le asigna el trabajador 3.

Actividad 2: Se le asigna el trabajador 4.

Actividad 3: Se le asigna el trabajador 2.

Actividad 4: Se le asigna el trabajador 3.

Actividad 5: Se le asigna el trabajador 1.

## 5. Implementación de la solución

A partir del mes de abril de 2011 se implementó la alternativa N° 1, observándose que en la temporada de invierno (3 meses) del año 2012 el volumen de producción aumentó de 1656 pares a 3865 como se muestra en el cuadro N°2.

**Cuadro N° 2:** Cuadro comparativo de la producción de calzado para tres meses

Mes	Volumen de producción en la temporada 2011	Volumen de producción en la temporada 2012
Abril	482 pares	1395 pares
Mayo	526 pares	1244 pares
Junio	648 pares	1226 pares
<b>Total</b>	<b>1656 pares</b>	<b>3865 pares</b>

Se puede apreciar en el cuadro N° 2, luego de la implementación ha aumentado el volumen de producción en el mismo periodo de tiempo, lo que representa un aumento de casi el triple de producción, y con ello da la posibilidad de atender a más clientes y así aumentar la rentabilidad de la empresa.

A continuación se presenta el cuadro N° 3 donde se muestran los costos de los errores cometidos en los diferentes subprocesos del sistema de producción en la temporada de invierno 2011, causando reprocesos en el sistema.

**Cuadro N° 3:** Tipos de fallas en el proceso de producción antes de la implementación de la solución

Tipo	Descripción	Costo por reparación de falla por Pie
FALLA 1	Error en el subproceso de corte	S/. 6.50
FALLA 2	Error en el subproceso de aparado y armado	S/. 12.50
FALLA 3	Error en el producto terminado	S/. 10.00



**Cuadro N° 4:** Costo total por tipo de fallas en el proceso de producción en la temporada de invierno del 2011

Mes	Costo Tipo de Falla 1	Costo Tipo de Falla 2	Costo Tipo de Falla 3
Febrero	S/. 240.50	S/. 362.50	S/. 520.00
Marzo	S/. 357.50	S/. 387.50	S/. 310.00
Abril	S/. 286.00	S/. 325.00	S/. 310.00
Mayo	S/. 357.50	S/. 237.50	S/. 190.00
Junio	S/. 273.00	S/. 525.00	S/. 300.00
Julio	S/. 383.50	S/. 312.50	S/. 320.00
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 1,898.00</b>	<b>S/. 2,150.00</b>	<b>S/. 1,950.00</b>
% Tipo de Falla	32%	36%	33%

En el cuadro N° 5 se presenta el total de costos por fallas

**Cuadro N° 5:** Costos totales por tipo de fallas en el proceso de producción en la temporada de invierno del 2011

Mes	Costo Total	% Falla por Mes
Febrero	S/. 1,123.00	18.72%
Marzo	S/. 1,055.00	17.59%
Abril	S/. 921.00	15.36%
Mayo	S/. 785.00	13.09%
Junio	S/. 1,098.00	18.31%
Julio	S/. 1,016.00	16.94%
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 5,998.00</b>	<b>100.00%</b>

En el cuadro N° 6 se presenta la comparación de los % de fallas, observándose la disminución de las mismas y en el cuadro N° 7 los costos asociados respectivamente.

**Cuadro N° 6:** Comparación de % de fallas antes y después de la implementación de la solución

MES	Antes	Después
	% Pies fallados en el 2011	% Pies fallados en el 2012
Febrero	18.72%	8.73%
Marzo	17.59%	7.97%
Abril	15.36%	8.06%
Mayo	13.09%	8.54%
Junio	18.31%	8.37%
Julio	16.94%	9.10%

De los cuadros N° 5 y 6 se observa que el promedio mensual de pies fallados fue de 16.67% en la temporada de invierno del 2011 y en la temporada de invierno del 2012 el porcentaje promedio mensual de pies fallados se redujo a 8.46%, lo que da una reducción de 8.21% en promedio por mes.

**Cuadro N° 7:** Comparación de costos por fallas antes y después de la implementación de la solución

MES	Antes	Después
	Costo Total Pies fallados en el 2011	Costo Total Pies fallados en el 2012
Febrero	S/. 1,123.00	S/. 523.46
Marzo	S/. 1,055.00	S/. 478.16
Abril	S/. 921.00	S/. 483.22
Mayo	S/. 785.00	S/. 512.34
Junio	S/. 1,098.00	S/. 501.69
Julio	S/. 1,016.00	S/. 546.02
<b>Total</b>	<b>S/. 5,998.00</b>	<b>S/. 3,044.89</b>

Esto representa un beneficio para la empresa y solamente balanceando la línea de producción.

## 6. Conclusiones

- Con la solución propuesta se logró aumentar el nivel de producción en el 2012 en casi el triple de lo que se producía en la temporada 2011.
- Al definir la estructura de trabajo con apoyo del software se ha logrado reducir el reproceso del calzado y las unidades devueltas por el cliente, que antes de la implementación de la solución representaban en promedio 16.67% de la producción a un 8.46% en promedio, esto quiere decir una reducción del 8.21%.
- Se ha logrado implementar un nuevo sistema de trabajo en la producción dando un ahorro promedio, por disminución de fallas, de 2953.11 nuevos soles en la campaña del otoño – invierno 2012.
- Al implementar un nuevo sistema de trabajo y reducir los reprocesos del sistema de producción, se ha logrado reducir los cuellos de botella en el sistema, haciendo que el proceso sea más fluido.
- La eficiencia del balance que era de 7.36, el cual se logró mejorar a 1.81. Es decir, las diferencias en los tiempos que aportan los ayudantes por cada producto era de 7.36 horas en el 2011 y disminuyó a 1.81 horas en el 2012, mejorando considerablemente la eficiencia del Balance de línea en un 75%.

## 7. Referencias bibliográficas

- [1] Wu, Ch , Yushun, F, Deyun x.(2001). Computer integrated manufacturing. -Handbook of Industrial Engineering - Technology and Operations Mgmt-Wiley editado por Salvendy, G.
- [2] Bray, O. H. (1988), Computer Integrated Manufacturing: The Data Management Strategy, Digital . Press, Bedford, MA. USA.

- [3] Enkawa T, Schvaneveldt, S. (2001) Just-in-Time, Lean Production, and Complementary.
- [4] Tseng, M, Jiao, J (2001) Mass Customization, Handbook of Industrial Engineering - Technology and Operations Mgmt-Wiley editado por Salvendy.
- [5] Konz S. (2001) Methods Engineering, Kansas State University . Handbook of Industrial Engineering - Technology and Operations Mgmt-Wiley editado por Salvendy.
- [6] Stephens, M. Meyers,F. (2013) Manufacturing Facilities Design & Material Handling-Purdue University Press 5th edition Pearson.
- [7] Garey M. R. & Johnson D. S, (1979) Computers and Intractability: A guide to the theory of NP-completeness, W. H. Freeman and co., New York.
- [8] Toksari, M.D. et al (2008) Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect. Applied Mathematical Modelling 32 .pp2954–2961Elsevier. Recuperado de <http://www.elsevier.com/mathematics>.
- [9] Vélez M.C. & , Montoya J. (2007). Metaheurísticos: una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones. Revista .EIA. Esc.Ing.Antioq no.8 ISSN 1794-1237 Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372007000200009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200009)
- [10] Raymundo A. "Balance de sistemas de producción integrados, Producción-inventario", Investigación Operativa, UNMSM-Perú, 1995.
- [11] Mejía, H. "Minimización de los costos totales en el problema de Balanceo de Línea con ciclo variable y estaciones en paralelo", Tesis para optar el grado de maestro en ciencias en ingeniería industrial, Puerto Rico, 2005, recuperado de <http://www.giad.uprm.edu/tesis/mejiaavila.pdf>
- [12] Buffa, E. Y Toubert, W. "Sistemas de producción e inventario", edición 7, editorial LIMUSA, México, 1992.
- [13] Melián B, Perez, J. et al., "Metaheurísticas: una visión global". Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. N.19 pp. 7-28 ISSN: 1137-3601. © AEPIA(). Recuperado de <http://www.aepia.org/revista>
- [14] Martí, Rafael. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. Recuperado de <http://www.uv.es/rmarti/paper/docs/heur1.pdf>
- [15] Glover, F Y Melián, B. "Búsqueda tabú" Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. N.19 pp. 29-48. ISSN: 1137-3601. © AEPIA (2003). Recuperado de <http://www.aepia.org/revista>
- [16] Glover F. Y Kochenberger (editores), "Handbook of Metaheuristics". Boston, Kluwer Academic Publishers. 2003.
- [17] Riojas, A. "Búsqueda Tabu: conceptos, algoritmo y una aplicación al problema de las N-reinas", UNMSM Perú. Recuperado de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/Basic/riojas\\_ca/contenido.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/Basic/riojas_ca/contenido.htm)
- [18] Escobar Z, ; Galvis, J; et al;. Aplicación del algoritmo de Búsqueda Tabú al problema de despacho hidrotérmico. *Scientia Et Technica*, Diciembre-Sin mes, 25-30. recuperado de <http://www.redalyc.org/html/849/84911948004/>