

MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS TOTALES EN EL PROBLEMA DE BALANCEO
DE LÍNEA CON CICLO VARIABLE Y ESTACIONES EN PARALELO

Por

Heidy Patricia Mejía Ávila

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

En

Ingeniería Industrial
UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO DE MAYAGÜEZ

Julio, 2005

Aprobado por:

Maria Irizarry, Ph.D.

Presidente de Comité Graduado

Fecha

Mario Padrón, Ph.D.

Miembro Comité Graduado

Fecha

Pedro Resto, Ph.D.

Miembro Comité Graduado

Fecha

Baldomero Llorens, P.D.E.E.

Representante de Escuela Graduada

Fecha

Agustín Rullan, Ph.D.

Director de Departamento

Fecha

RESUMEN

El problema de balanceo de líneas de producción, enfocado en minimizar el costo total por unidad producida, permite una comunicación efectiva con los niveles gerenciales que motiva la implementación de los cambios requeridos. Esta investigación se basó en el desarrollo de tres modelos: el algoritmo de optimización, el algoritmo con restricciones y el método heurístico. Se realizó un diseño de experimento el cual tuvo como objetivo comparar los costos totales de las soluciones. Los análisis estadísticos revelan que las diferencias entre el algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones son significativamente menores a las diferencias entre el algoritmo de optimización y el método heurístico, y el algoritmo con restricciones modelo y el método heurístico. Pruebas estadísticas adicionales indican que no hay diferencia en costo entre el algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones. La metodología desarrollada sugiere los siguientes pasos: el algoritmo de optimización proporciona la solución óptima, pero está limitado por el tamaño del problema; el método heurístico provee las restricciones de zonificación al algoritmo con restricciones, es ágil para resolver problemas de cualquier tamaño y la respuesta es inmediata; el algoritmo con restricción provee una solución bien cercana a la óptima y resuelve problemas con mayor número de tareas con tiempo computacional razonable.

ABSTRACT

The production line balancing problem, focused on minimizing the total per-unit cost, allows effective communication with management which facilitates the implementation of required changes. This research was based on the development of three models: an optimization algorithm, a constrained algorithm, and a heuristic method. An experiment was designed and run to compare resulting total costs. Statistical analyses reveal that differences between the optimization algorithm and the constrained algorithm are significantly smaller than the differences between the optimization algorithm and the heuristic method, and the constrained algorithm and the heuristic method. Additional statistical tests indicate that there is no difference in cost between the optimization algorithm and the constrained algorithm. The methodology developed suggests the following steps: the optimization algorithm provides the optimal solution, but is limited by the problem size; the heuristic method provides the constraints for task initiation to the constrained algorithm, is agile in solving any problem size with immediate results; the constrained algorithm provides a solution very close to optimality and solves problems with a larger number of tasks with reasonable time requirements.

Esta tesis se la dedico especialmente a mi querido esposo Juan Carlos que desde la distancia me dio todo su apoyo y amor para luchar y salir adelante. A mis padres Eva y Adalberto y a mis hermanos Richard y Cristian.

A mis tres àngeles: Mario, Angie y Pedro que me guiaron y me enseñaron el verdadero valor del trabajo en equipo. ¡Lo logramos!

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco principalmente a Dios por todas las personas buenas que se cruzaron en mi camino y que me ayudaron a realizar esta tesis.

Le agradezco a mi consejera de tesis la Dra Maria Irizarry por darme la oportunidad de realizar esta investigación bajo su tutela; por su carisma y calidad de ser humano y su profesionalismo.

Estoy muy agradecida con el Dr Mario Padrón que fue mi guía, el cual es una mente brillante que no solo me transmitió sus conocimientos en programación si no que me enseñó que la perseverancia y el esfuerzo nos llevan al éxito; nunca olvidare nuestras charlas en el paraíso.

Mis profundos agradecimientos al Dr. Pedro Resto por todas sus buenas ideas, entusiasmo, optimismo, carisma y sabiduría me motivaban cada día a salir adelante para hacer este sueño una realidad. Al Dr. Baldomero Llorens por su profesionalismo y sensibilidad.

A todos los profesores que tuve en mis estudios de maestría en especial a Dra. Sonia Bartolomei, Dr. Nazario Ramírez, Dra. Viviana Cesani, Dra. Loida Rivera, Dr. David González y Dr. Agustín Rullan. Un agradecimiento especial a las

secretarias del departamento de Ingeniería Industrial Mayra Colon y Laura Gonzáles por su amabilidad y ayuda. Le agradezco a Edwin Morales por su buen trato.

A mí amiga Martha por su amistad y sus palabras de aliento y apoyo. A todos mis compañeros de la maestría que hicieron mas amena mi estadía, en especial a Omar, Mara, Valerie, Mauricio, Wilfredo, Verónica y Andrés.

@Copyright 2005, Heidy Patricia Mejía - Ávila

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xii
CAPITULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Clasificación de las Líneas de Ensamblaje por Tipo de Producto.....	4
1.2 Clasificación de las Líneas de Ensamblaje en Función del Flujo	8
1.2.1 <i>Línea de Ensamblaje con Despliegue Lineal</i>	<i>9</i>
1.2.2 <i>Línea de Ensamblaje con Estaciones en Forma de “U”</i>	<i>10</i>
1.2.3 <i>Línea de Ensamblaje con Estaciones en Paralelo</i>	<i>11</i>
CAPITULO 2	
REVISION DE LITERATURA.	14
2.1 El problema de balanceo de línea de ensamblaje	14
2.2 Modelos orientados a los costos	24
2.3 Estaciones y Tareas en Paralelo	31
CAPITULO 3	
JUSTIFICACION Y OBJETIVOS.....	41
3.1 Justificación.....	41
3.2 Objetivos.....	42
CAPITULO 4	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	45
4.1 Revisión de Literatura e Identificación del Problema	46
4.2 Identificación de componentes de costos	46
4.3 Desarrollo de Caso de Estudio.....	47
4.4 Desarrollo y programación de los modelos	47
4.5 Comparación de resultados.....	49
4.6 Diseño de experimento	50
4.7 Documentación de resultados.....	51
CAPITULO 5	
RESULTADOS	52
5.1 Modelo de Optimización	52
5.1.1 <i>Presunciones y Limitaciones.....</i>	<i>53</i>
5.1.1.1 Presunciones	53
5.1.1.2 Limitaciones.....	54

5.1.2	<i>Tipos de Modelos de Programación Lineal</i>	54
5.2	Modelo de Programación lineal.....	55
5.2.1	<i>Costos de Labor</i>	55
5.2.2	<i>Costos de Espacio y Facilidades.</i>	56
5.2.3	<i>Costo de Inversión de Capital.</i>	56
5.2.4	<i>Costo de Mesa de Trabajo.</i>	56
5.3	Formulación del Modelo Matemático	57
5.3.1	<i>Definición de las variables</i>	57
5.3.2	<i>Modelo Matemático</i>	58
5.4	Modelo Heurístico	61
5.4.1	<i>Pasos en el Desarrollo del Heurístico</i>	62
5.4.2	<i>Flujograma y Código del Primer Modelo Heurístico.</i>	63
5.4.3	<i>Segundo Heurístico - Algoritmo con Restricciones.</i>	65
5.5	Heurísticos vs. Modelo de Optimización	68
5.5.1	<i>Análisis Económico.</i>	70
5.5.1.1	Datos Requeridos.	71
5.5.1.2	Costos de Inversión de Capital.	72
5.5.1.3	Costos de Espacio y Planta Física.	78
5.5.1.4	Costo de Labor.....	79
5.5.1.5	Costo por mesa de Trabajo.	79
5.5.2	<i>Diseño del Experimento.</i>	80
5.5.2.1	Reconocimiento del problema.....	81
5.5.2.2	Selección de los Factores y Niveles.	81
5.5.2.3	Selección de la Variable Respuesta.....	82
5.5.2.4	Selección del Diseño del Experimento	83
5.5.2.5	Ejecución del Experimento	85
5.5.2.6	Análisis estadístico de los Resultados de la Experimentación	86
5.5.3	<i>Análisis Estadístico.</i>	87
CAPITULO 6		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		98
6.1	Conclusiones	98
6.2	Recomendaciones.....	100
BIBLIOGRAFIA		101
APÉNDICE A. Código del Heurístico #1		106
APÉNDICE B. Generación del Archivo lp.....		120
APÉNDICE C. Casos de Estudio para los Experimentos.....		140
APÉNDICE D. Tabla de Datos para el Análisis Estadístico del Experimento		150

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Líneas de Ensamblaje para uno o múltiples productos</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. Línea de Ensamblaje con Estaciones en Serie</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3. Línea de Ensamblaje con Estaciones en forma de “U”</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Ejemplo de Balanceo de línea en “U”</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5. Línea de Ensamblaje con Estaciones en Paralelo</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6. Estructura de las Operaciones en la Línea de Ensamblaje.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7. Configuración de una Línea de ensamblaje, extraído de [9]</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8. Metodología utilizada en la investigación.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 9. Hoja de Calculo de Parámetros del Modelo de Optimización.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 10. Metodología para la construcción del Heurístico</i>	<i>62</i>
<i>Figura 11. Flujograma del primer modelo heurístico</i>	<i>64</i>
<i>Figura 12. Hoja de Calculo de Tareas del Modelo de Zonificación</i>	<i>66</i>
<i>Figura 13. Diagrama de Precedencias del caso Estudio.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 14. Diagrama general de las Series Uniformes.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 15. Pasos en el diseño del experimento</i>	<i>80</i>
<i>Figura 16. Reporte de Análisis Estadístico de Minitab</i>	<i>90</i>
<i>Figura 17. Histograma de los Residuos</i>	<i>91</i>
<i>Figura 18. Grafica de Probabilidad Normal de los Residuales</i>	<i>91</i>
<i>Figura 19. Prueba de igualdad de varianza para residuales</i>	<i>92</i>
<i>Figura 20. Grafica de Efectos para las Diferencias.....</i>	<i>93</i>

<i>Figura 21. Prueba Tukey para Diferencia entre Diferencias A, B, y C.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 22. Prueba Tukey para Diferencias entre Tiempos de Ciclos.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 23. Análisis de varianza para igualdad entre modelo de optimización y.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 24 Grafica de Interacciones Para las Diferencias.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 25. Metodología para determinar el Balanceo de Líneas.....</i>	<i>98</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Características de los Tipos de Ensamblaje Según el Tipo de Producto</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2. Impacto del Balanceo y Despliegue en el Flujo y Utilización de los Recursos</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 3 Versiones de SALBP extraído de [24].....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4. Resumen de Metodologías de Balanceo de Líneas.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5. Comparación entre Algoritmos y el Heurístico</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 6. Datos del Caso de Estudio.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 7. Resumen de Costos de Inversión de las Tareas</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 8. Resumen de Costos por Estación</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 9. Resultados del experimento referente a Costo Totales / unidad.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 10. Diferencias entre de las combinaciones de las Metodologías</i>	<i>89</i>

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La instalación de una línea de ensamble es una decisión a largo plazo que usualmente requiere de una gran inversión de capital. Por lo tanto, es importante que tal sistema esté diseñado y balanceado lo más eficientemente posible. Además de balancear el nuevo sistema, mantener el sistema funcionando en forma óptima, desde el punto de vista de labor y flujo de producto, requiere rebalancear periódicamente la línea para incorporar cambios en la demanda o en el proceso de producción. Debido al efecto a largo plazo de las decisiones de balanceo, los objetivos usados deben ser cuidadosamente seleccionados considerando las metas estratégicas de la empresa. Desde el punto de vista económico, los costos y beneficios relacionados con los objetivos deben ser considerados. El proceso de estimación y predicción de los costos de correr una línea en meses o años y las ganancias esperadas de la venta de los productos ensamblados es muy complicado y hay tendencia a cometer errores [5] .

Usualmente el problema de balanceo de línea tiene como objetivo maximizar la utilización de la línea, la cual guarda correlación con la eficiencia del balanceo de la línea. La eficiencia se define como el uso racional de los recursos disponibles para la fabricación de los productos, es decir obtener más productos con menos recursos [20]. Por ejemplo, la eficiencia de labor es la relación entre la sumatoria

de los estándares de labor de todas las tareas en la línea y la multiplicación del número de estaciones por el tiempo de ciclo. La eficiencia teórica o esperada de un balanceo de línea se determina utilizando la ecuación 1.1:

$$\text{Eficiencia del Balanceo (E.B)} = \frac{\sum_{i=1}^m \text{tiempo de la tarea "i"}}{N \times TC} \quad 1.1$$

Donde;

m= número total de tareas en la línea

N= número de estaciones de trabajo, presumiendo un empleado por estación.

TC= Tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo es la carga de trabajo máxima que debe ser asignada a una estación de trabajo de tal forma que la línea pueda cumplir con los requisitos de la demanda del producto. Un balanceo de línea es factible solo si el tiempo de cualquier estación no excede el tiempo de ciclo. El tiempo de ciclo de una línea de producción se determina utilizando la ecuación 1.2

$$TC = \frac{\text{Minutos / turno} * \text{Turnos / día}}{\text{Demanda Esperada por día}} \quad 1.2$$

El porcentaje de ociosidad en la línea se determina utilizando la ecuación 1.3

$$\% \text{ Ociosidad} = 1 - \% E.B \quad 1.3$$

Mientras mayor sea la eficiencia del balanceo, menor es el porcentaje de ociosidad y mayor la utilización de los empleados y máquinas.

Una vez implantado el balanceo de la línea, la eficiencia de labor (E.L) se mide utilizando la ecuación 1.4.

$$\% E.L = \frac{\text{Horas Ganadas}}{\text{Horas Pagadas}} = \frac{\text{Unidades Producidas} \times \text{Estándar de Labor / unidad}}{\text{Horas Pagadas}} \quad 1.4$$

donde;

%E.L= Porcentaje de eficiencia en la labor

$$\text{Estándar de Labor/unidad} = \sum_{i=1}^m \text{tiempo de la Tarea } i$$

El número mínimo de estaciones de trabajo requeridas para cumplir con una demanda en particular se determinar utilizando la ecuación 1.5.

$$N = \frac{\sum_{i=1}^m \text{tiempo de la tarea "i"}}{TC} \quad 1.5$$

Una línea de ensamblaje o producción consiste en un grupo de estaciones de trabajo organizadas de forma tal que el producto se mueve de una estación a otra siguiendo una ruta usualmente lineal. Una estación de trabajo consiste en uno o

más operadores o máquinas donde todos realizan las mismas tareas. La carga de trabajo de cada estación debe ser de forma tal que:

$$\frac{CT_i}{NE_i} \leq TC \quad 1.1$$

donde;

CA_i= carga de trabajo de la estación i.

TC= Tiempo de ciclo de la línea de producción

NE_T= Número de empleados trabajando en paralelo en la estación i.

Las líneas de ensamble se pueden clasificar según el tipo de producto o el flujo del producto. A continuación se describen las principales características de cada una de ellas.

1.1 Clasificación de las Líneas de Ensamblaje por Tipo de Producto

Las líneas de ensamble típicamente se clasifican de acuerdo a la variedad de productos que se fabrican en la línea. Los diferentes tipos de líneas se muestran en la Figura 1.

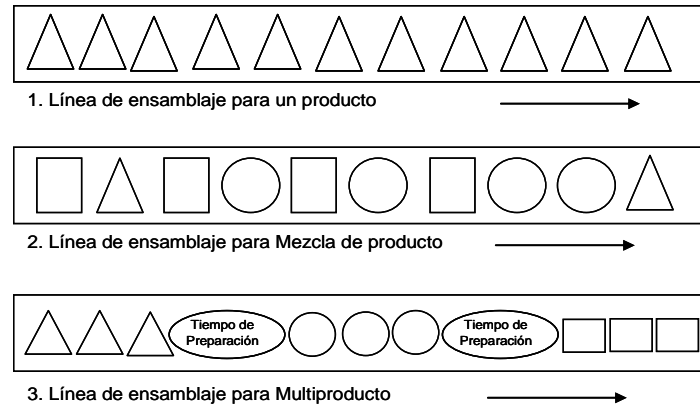


Figura 1. Líneas de Ensamblaje para uno o múltiples productos

El caso 1 presentado en la Figura 1, se caracteriza por la producción en masa de un solo producto o una familia de productos con diferencias mínimas entre los modelos de la familia. Los volúmenes de producción justifican la alta inversión en maquinaria y resultan en bajos costos de producción por unidad. Debido a que la línea es dedicada a un solo producto, los operadores desarrollan un alto grado de especialidad resultando en productos de calidad constante. Los tiempos de preparación para correr la línea son mínimos o insignificantes y la secuenciación de productos no es un aspecto relevante. El flujo del producto es lineal y el balanceo de línea se altera solo para ajustarse a cambios en la demanda de los productos.

El caso 2 representa aquella línea de producción utilizada para la manufactura o ensamblaje de una variedad de productos, generalmente procesados en lotes pequeños. Los tiempos de preparación pueden ser significativos y la secuenciación puede jugar un papel importante en la optimización del uso de recursos en la línea. Debido a la variedad de productos que se corren en la línea, la calidad de los productos puede ser variable y los operarios son multifuncionales. Es decir deben de estar capacitados para realizar diferentes tipos de tareas en la estación de acuerdo al tipo de producto. El despliegue de la línea debe poseer flexibilidad para acomodar la variedad de rutas que siguen los productos asignados a la línea o área de producción.

El caso 3 describe las áreas de producción utilizadas para la manufactura de una serie de productos los cuales son significativamente diferentes entre sí. Debido a las diferencias entre productos, los tiempos de preparación y la secuenciación de productos juegan un papel de suma importancia en la optimización del uso de los recursos. Las características de cada uno de los escenarios descritos anteriormente se resumen en la Tabla 1.

CARACTERÍSTICAS	UN SOLO PRODUCTO	MEZCLA DE PRODUCTO	MULTI-PRODUCTO
Producción	En Masa o Continua	En lotes	Lotes Pequeños de Múltiples Productos
Variedad de Producto	Poca	Alta	Muy Alta
Tipo de Máquina	Específica	Uso General	Uso General
Tipo de Tarea	Repetitiva	No Rutinaria	No Rutinaria
Mano de Obra	Especializada	multifuncionales	multifuncionales
Inversión	Alta	Media	Baja
Calidad	Constante	Variable	Variable
Costo de Operación ó por Unidad	Bajo	Medio	Alto
Flexibilidad	Baja	Media	Alta

Tabla 1. Características de los Tipos de Ensamblaje Según el Tipo de Producto

1.2 Clasificación de las Líneas de Ensamblaje en Función del Flujo del Producto

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, según se muestra en la Tabla 2.

	BALANCEO DE LÍNEA	DESPLIEGUE DE PLANTA FÍSICA
Flujo del Producto	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad del Trabajo • Continuidad del flujo en función de: <ul style="list-style-type: none"> - Balance entre cargas de trabajo. - Presencia de cuellos de botella. 	<ul style="list-style-type: none"> • Continuidad del flujo en función de las distancias entre estaciones. • Velocidad del flujo en función del tipo de acarreo de materiales.
Utilización de los Recursos	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de espera debido a desbalances en cargas de trabajo 	<ul style="list-style-type: none"> • Tareas que no añaden valor al producto: <ul style="list-style-type: none"> - Doble manejo del producto. - Tiempo consumido en transportar las unidades. • Tiempos de espera debido a distancias entre estaciones.

Tabla 2. Impacto del Balanceo y Despliegue en el Flujo y Utilización de los Recursos

La agrupación óptima de las tareas en las estaciones y la selección apropiada del diseño de la planta física proporcionan un alto rendimiento en la utilización de la labor y equipo y como consecuencia la reducción en el tiempo de ocio.

El flujo del producto depende del despliegue de la planta física según se describe a continuación.

1.2.1 Línea de Ensamblaje con Despliegue Lineal

Estas son líneas en las cuales el flujo del producto es lineal debido a que todas las estaciones de trabajo han sido colocadas en serie según muestra en la Figura 2. Con frecuencia las estaciones de trabajo son alineadas a lo largo de una correa transportadora y cada estación de trabajo contiene el equipo y los trabajadores necesarios para el funcionamiento óptimo de la línea.

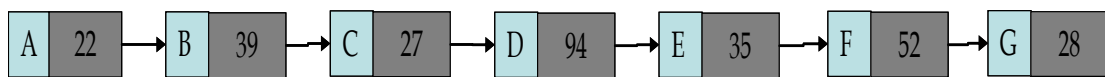


Figura 2. Línea de Ensamblaje con Estaciones en Serie

Las líneas de ensamblaje con estaciones de trabajo en serie tienen la desventaja de ser inflexibles cuando se requiere aumentar o disminuir la capacidad de producción de la línea para ajustarse a cambios en demanda y cuando se desea correr una variedad de productos. Líneas de ensamblaje con estaciones en serie diseñadas para trabajar sincronizadamente y moviendo las unidades entre estaciones en lotes pequeños, requieren de un rígido plan de mantenimiento

preventivo debido a que cuando se presentan fallas en una estación se detiene toda la línea de producción. Esto trae como consecuencia una baja utilización de los recursos y altos costos de operación.

1.2.2 Línea de Ensamblaje con Estaciones en Forma de “U”

Este tipo de línea tiene la característica de que el comienzo y el final están cerca formando una “U” según se muestra en la Figura 3. Este tipo de despliegue facilita la comunicación entre los empleados de la línea y la retroalimentación cuando ocurren problemas de calidad. Otra ventaja significativa es que permite rebalancear las cargas de trabajo sin requerir cambios en el despliegue de la planta física.

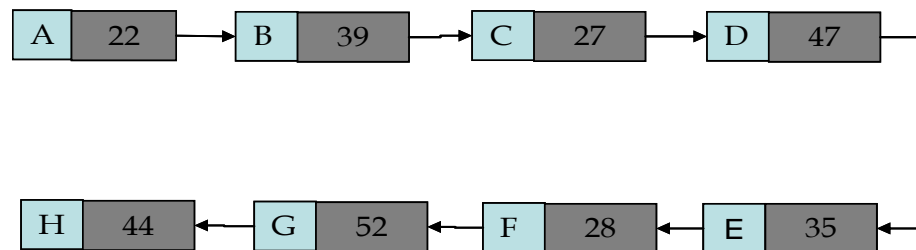


Figura 3. Línea de Ensamblaje con Estaciones en forma de “U”

Un posible arreglo de balanceo para una línea de ensamblaje en “U” se muestra en la Figura 4. Los empleados pueden atender tareas que se encuentren localizadas a su izquierda o derecha, así como tareas que se encuentren localizadas a su espalda.

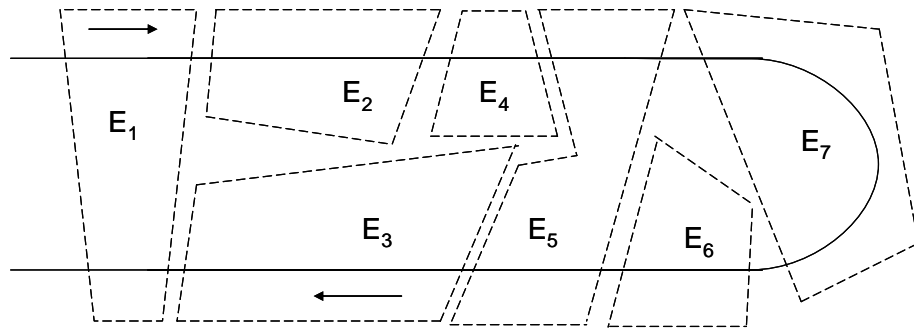


Figura 4. Ejemplo de Balanceo de línea en “U”

Las ventajas de la línea en forma de “U” se materializan mediante empleados multifuncionales. Este tipo de despliegue resulta muy eficiente en aquellos casos donde se requiere la producción de una mezcla de productos con demanda relativamente pequeña de cada uno de ellos.

1.2.3 Línea de Ensamblaje con Estaciones en Paralelo

Las líneas con estaciones en paralelo son requeridas en aquellos casos donde hay tareas indivisibles cuya duración total excede el tiempo de ciclo deseado en la línea de ensamblaje. Esto ocurre frecuentemente en operaciones que requieren maquinaria. El número requerido de estaciones de trabajo en paralelo se determina del siguiente modo:

$$N_p = \text{Entero Mayor} \left[\frac{DTI}{TC} \right] \quad 1.2$$

donde;

N_p = Número de estaciones en paralelo.

DTI= Duración de la tarea indivisible.

En la Figura 2 se presentó un ejemplo de una línea en serie. En ese caso el tiempo de una tarea indivisible es de 94 segundos. Si el tiempo de ciclo deseado es de 52, entonces es necesario colocar dos estaciones en paralelo según se muestra en la Figura 5.

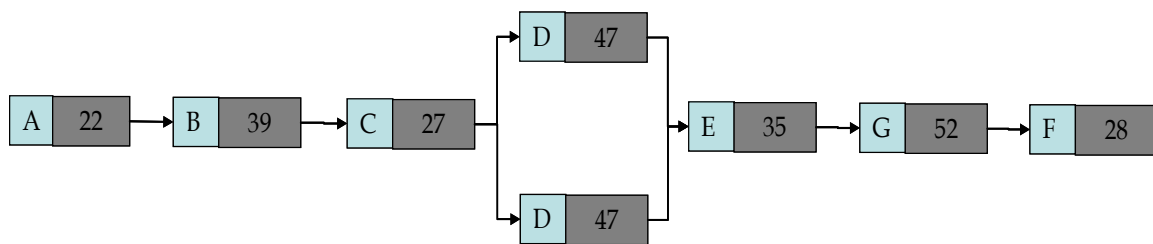


Figura 5. Línea de Ensamblaje con Estaciones en Paralelo

De la ecuación 1.2 se deriva que el ciclo de trabajo resultante de las dos estaciones en paralelo es de 47 segundos. Las estaciones en paralelo son necesarias siempre que el tiempo de alguna tarea en la línea excede el ciclo de línea deseado.

Este documento ha sido dividido en cinco capítulos. En el capítulo 2 se presenta

la revisión de la literatura, la cual es la base teórica de la tesis. En esta sección se resume la bibliografía de las diferentes metodologías utilizadas para resolver el problema de balanceo de línea. En el capítulo 3 se presenta la justificación de la investigación y se desarrollan los objetivos de la investigación y se describe la contribución académica del trabajo. En el capítulo 4 se presenta la metodología a seguir en esta investigación. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos y en el capítulo 6 las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPITULO 2

REVISION DE LITERATURA.

La revisión de literatura ha sido dividida en tres áreas:

1. Problema de balanceo de línea de ensamblaje.
2. Modelos Orientados a costos.
3. Modelos con estaciones y tareas en paralelo.

2.1 El problema de balanceo de línea de ensamblaje

Una línea de ensamblaje es una secuencia de estaciones de trabajo, que están frecuentemente conectadas por un sistema de manejo de materiales, la cual existe con el propósito de ensamblar un producto final. El proceso consiste en una serie de operaciones, cada una compuesta por diversas tareas. Una tarea consiste en un conjunto de elementos básicos e indivisibles en forma lógica. En la Figura 6 se describe la estructura de las operaciones en una línea de ensamblaje.

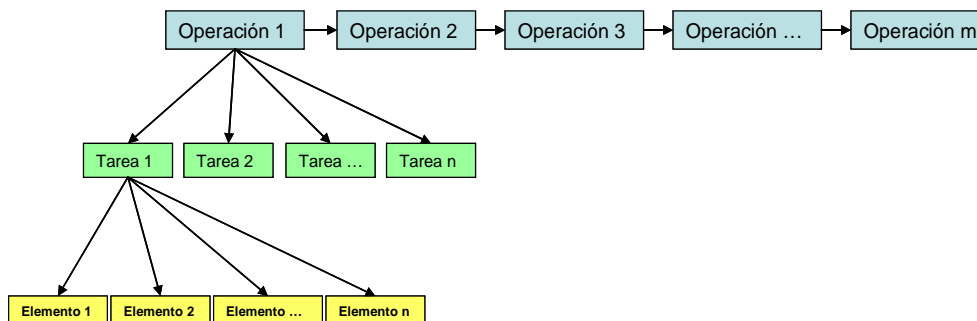


Figura 6. Estructura de las Operaciones en la Línea de Ensamblaje.

Por ejemplo, al trabajar con una máquina se consideran elementos de carga, tiempo de máquina y tiempo de descarga como el conjunto indivisible que compone la tarea de procesar la pieza en la máquina. Otras tareas relacionadas con esta operación pueden ser la preparación de la pieza antes de colocarla en la máquina y la inspección de la pieza luego de ser procesada.

El orden en el cual se llevan a cabo las diferentes tareas es en función de restricciones de precedencia debido a las características del producto. Uno de los retos en el proceso de balanceo de línea es la definición de las tareas y sus precedencias. Tareas con larga duración resultan con menor flexibilidad durante el proceso de balancear las cargas de trabajo y de reducir la ociosidad en las estaciones de trabajo.

El proceso de definir las precedencias de las tareas requiere del conocimiento vasto de las características de los procesos de manufactura y de las operaciones en la línea. Con frecuencia se establecen restricciones de precedencia impuestas solo por el modo acostumbrado de llevar a cabo las tareas. El resultado final es una reducción en la flexibilidad del proceso de balanceo de cargas de trabajo.

El problema de balanceo de línea tradicional consiste en la asignación oportuna de las tareas a las estaciones de trabajo de manera que se optimicen los recursos disponibles. Cada tarea tiene una duración requerida para ser completada y asociada a ellas tiene unas restricciones de precedencia. Las restricciones de

precedencia se refieren a que cada tarea puede ser asignada solo después de que todas sus tareas predecesoras han sido asignadas a estaciones previas. El conjunto de tareas asignadas a una estación constituye la carga de trabajo de la estación. El tiempo acumulado de las tareas es llamado tiempo de estación. Un balanceo de línea es factible solo si el tiempo de las estaciones no excede el tiempo de ciclo de la línea. En aquellos casos donde el tiempo de la estación resulte ser más pequeño que el tiempo de ciclo, la estación tiene un tiempo de ocio. Este es el resultado de la diferencia entre el tiempo de ciclo y el tiempo de la estación, como se puede observar en la siguiente ecuación.

$$TO_k = TC - T(S_k), \quad \forall k \quad 2.1$$

donde;

K = Número de la estación

TO_k = Tiempo de ocio de la estación k

TC = Tiempo de ciclo de la línea

$T(S_k)$ = Carga de trabajo (unidades de tiempo) asignada a la estación k

S_k = Conjunto de tareas asignadas a la estación k

$T(S_k) \leq TC$ Restricción en la carga de trabajo

Diversas versiones del problema han surgido de la variación de los objetivos como se muestra en la Tabla 3.

Versión	Tiempo de Ciclo	Número de Estaciones
SALBP-F	Fijo	Fijo
SALBP-1	Fijo	Mínimo
SALBP-2	Mínimo	Fijo
SALBP-E	Mínimo	Mínimo

Tabla 3 Versiones de SALBP extraído de [24]

El problema de balanceo de línea simple tipo F (SALBP-F) tiene como objetivo obtener una solución factible para una combinación determinada de número de estaciones y tiempo de ciclo. Las versiones SALBP-1 y SALBP-2 tienen una dual interrelación debido a que la primera versión se esfuerza por minimizar el número de estaciones con el tiempo de ciclo fijo, mientras la segunda versión minimiza el tiempo de ciclo para un determinado número de estaciones de trabajo. Esta segunda versión busca maximizar el nivel de producción de la línea. La versión SALBP-E es el problema más general donde se maximiza la eficiencia de la línea mientras que simultáneamente se minimizan el tiempo de ciclo y el número de estaciones de trabajo.

En las últimas tres décadas, nuevas metodologías han sido desarrolladas con el

propósito de obtener mejores soluciones del problema de balanceo de línea. Algunas de estas metodologías se describen a continuación.

Klein y Scholl [13] desarrollan el procedimiento de ramificar y acotar ("branch and bound") para el problema de balanceo de línea simple tipo 2 (SALBP-2). Este problema es NP-complejo ("Non-deterministic Polynomial time"). Es decir que el uso de algoritmos para este tipo de problemas requiere un tiempo computacional excesivo. Por lo tanto, se opta por una técnica heurístico que no garantiza la obtención del óptimo, pero si genera una buena solución en un tiempo de computación más razonable. Esta investigación tiene como objetivo asignar las tareas a un número determinado de estaciones de trabajo con el fin de maximizar la tasa de producción. Para obtener una solución factible se requiere computar el límite inferior y superior del tiempo de ciclo, y de esta manera el modelo por medio de iteraciones comprueba si la asignación de tareas es factible de acuerdo al tiempo de ciclo definido dentro de dicho rango. La técnica utilizada para determinar el rango del tiempo de ciclo, es el método de Limite Inferior Local, para el cual se definen reglas de dominio y la regla de la máxima carga. Los investigadores realizaron una evaluación comparativa del método del Límite Inferior o "Lower Bound Method" (LBM), Búsqueda Binaria o Binary Search (BS), Fibonacci and Binary Search (FBS) y Búsqueda Binaria con predeterminado punto de entrada o Binary Search with Prespecified Entry Point (EBS). Los resultados computacionales demostraron que el método BS alcanzó soluciones

aceptables para todo los problemas. Los métodos LBM y FBS, si bien para muchos ejemplos funcionaron bien, fallaron en mejorar soluciones iniciales factibles para problemas complejos. Por ultimo, para el método de EBS, no es ventajosa la selección inicial de un tiempo de ciclo debido a que este puede no ser apropiado. El método EBS no logra mejorar el tiempo de ciclo inicial determinado en aquellos casos donde este es demasiado pequeño o toma mucho tiempo en encontrar la solución.

Goldberg et al. [10] utiliza la metodología de algoritmos genéticos (GA) para obtener soluciones optimas de problemas complejos. Es basado en la manipulación de una población de soluciones por los operadores genéticos tales como selección, recombinación y mutación. Presenta la adaptación del problema general de balanceo de línea o SALBP. Los operadores genéticos, están codificados en forma de cromosomas y estos a su vez consisten en una secuencia de genes. Esta metodología es más relevante para los problemas de balanceo de línea tipo 2 o tipo E. Se desarrolla la metodología para resolver el problema de balanceo de línea SALBP-2. Los resultados obtenidos demuestran ser competitivos en comparación con los resultados obtenido con otras metodologías como Búsqueda Tabú o TS. Los autores recomiendan como trabajo futuro, resolver el problema tipo E utilizando algoritmos genéticos.

Scholl y Voß [27] desarrollan y examinan a fondo una búsqueda tabú o “Tabú Search” (por sus siglas en ingles TS), para el problema de balanceo de línea simple tipo 2 (SALBP-2). La solución inicial se puede determinar por cualquier procedimiento o aleatoriamente. Se ejecuta una estrategia local de búsqueda, donde la mejor estrategia apta se aplica en cada iteración. Cuando ocurre conflicto y no es posible la asignación de tareas a estaciones, recomiendan una estrategia para mover sistemáticamente las tareas predecesoras y sucesoras lejos de las tareas críticas. Los experimentos computacionales demuestran que el procedimiento de los TS consigue resultados mucho mejores que procedimientos constructivos. Una extensión del procedimiento de TS para el problema de balanceo tipo 2 con mezcla de productos es dado por Pastor et al. [28]. Esta investigación tiene como objetivos maximizar la tasa de producción, hallar el tiempo de ciclo igual para todos los modelos, distribuir equitativamente la carga de trabajo en todas las estaciones, y finalmente minimizar la dispersión entre las tareas asignadas del trabajador en cada uno de los diferentes modelos. Es decir las tareas comunes de los diferentes modelos son asignados a la misma estación.

Karabati y Saym [12] consideran el problema de balanceo para una línea con mezcla de productos la cual opera dentro de una secuencia cíclica. El conjunto mínimo de modelos o “Minimal part set” (por sus siglas en ingles MPS) es la colección de los diferentes modelos que son ensamblados con mas frecuencia. Los MPS se producen repetitivamente usando la misma secuencia, la cual es

llamada secuencia cíclica. El problema consiste en una línea de ensamble con ambiente de transferencia sincronizada de los componentes entre las estaciones. El objetivo del balanceo de línea es minimizar el tiempo de ciclo total incorporando la secuencia de producto. El tiempo de ciclo total se refiere a la suma del tiempo de subciclo de cada modelo. Los investigadores describen la solución mediante un modelo matemático que combina múltiples modelos. Como solución aproximada al problema original proponen una formulación alterna que sugiera la minimización del tiempo máximo del subciclo. Los resultados computacionales indicaron que esta aproximación puede ser mejor para encontrar buenas soluciones a costa de un costo computacional más alto.

McMullen y Tarasewich [18] se basan en la técnica de las hormigas con el fin de tratar efectivamente el problema de balanceo de la línea de ensamble tipo 1 o SALBP-1. Los factores que se tienen en cuenta son: estaciones en paralelo, tiempo de duración de tareas estocásticos y mezcla de productos. Esta nueva metodología es inspirada en el comportamiento social de las hormigas, con el fin de distribuir las tareas entre trabajadores y de esta manera las medidas de desempeño son optimizadas. Los resultados obtenidos son usados para simular la corrida de producción con el fin de obtener la medida de desempeño (Tiempo de ciclo). La técnica de las hormigas es comparada con los resultados de otros heurísticos como Simulación Recocida o "Simulated Annealing". La comparación

demuestra que la técnica de las hormigas es competitiva en relación a los otros métodos heurísticos, en términos al tiempo de ciclo.

Merengo, Nava y Pozzetti [17] estudian y analizan el problema SALBP-1 para líneas de ensamblaje manuales con mezcla de productos. Presentan una nueva metodología de balanceo y secuenciación la cual tiene como objetivo minimizar el número de estaciones de trabajo. La metodología indirectamente minimiza la tasa de trabajos incompletos y reduce el trabajo en proceso (WIP ó work-in-process). Se desarrollaron cuatro versiones de un heurístico de balanceo donde cada versión corresponde a diferentes combinaciones de restricciones y de funciones de balanceo horizontal con el fin de comparar los resultados obtenidos y seleccionar el mejor. Esta necesidad se ha traducido en lograr una mejor integración entre el diseño y la administración de la línea de ensamblaje de tal manera que facilita la planificación y manejo, con especial énfasis en los problemas relacionados con la generación de unidades incompletas.

Con respecto al problema de secuenciación, debido al nivel de importancia semejante entre la necesidad de minimizar las unidades incompletas y la necesidad de distribuir uniformemente los componentes, estos son una parte importante en esta investigación. La investigación demuestra que una sola técnica de secuenciación puede resolver ambos objetivos de una manera satisfactoria. Las metodologías sugeridas se han diseñado especialmente para

líneas de flujo continuo, es decir aquellas líneas de ensamblaje que tienen un sistema de transporte donde las unidades se mueven a una velocidad constante a lo largo de la línea. Esta metodología también se puede adaptar a otro tipo de líneas de ensamblaje.

Carnahan, Norman y Redfern [9] incorporan en el problema de balanceo de línea tipo 2 o SALBP-2 la carga física impuesta en el operador por la demanda del producto. La Figura 7 se presenta un balanceo de una línea, donde el flujo de materiales se dirige en una sola dirección. Las tareas están representadas por números. Estas pueden ser asignadas solo a una estación de trabajo. Las tareas predecesoras son asignadas a una estación o a las estaciones anteriores a esa.

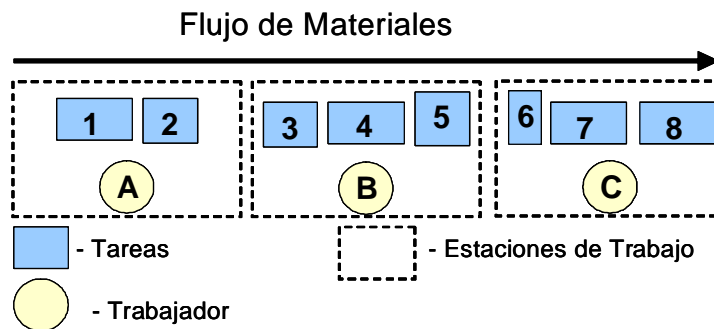


Figura 7. Configuración de una Línea de ensamblaje, extraído de [9]

Una consecuencia importante de establecer el balanceo en una línea de ensamblaje basado solamente en el tiempo de operación de las tareas es que los trabajadores podrán estar sobrecargados físicamente lo cual puede conducir a desórdenes músculo-esquelétales[11]. Este término es usado para describir enfermedades y desórdenes que afectan los músculos, tendones, ligamentos,

cartílagos, nervios y vasos sanguíneos del cuello y extremidades superiores. Con respecto al balanceo de una línea, la asignación de las tareas en las estaciones de trabajo puede resultar en la presencia de riesgo al sistema músculo-esquelético.

Con el fin de encontrar una solución óptima al problema de balanceo de línea utilizan tres heurísticos: (i) Rango Heurístico, (ii) Algoritmo genético combinatorio, y (iii) Algoritmo genético para el problema del espacio. Los resultados sugieren que es posible crear líneas de ensamble que incorporen la producción y riesgos físicos impuestos por la demanda. El Algoritmo genético para el problema del espacio arrojó mejores resultados en el balanceo debido a que minimiza el tiempo de ciclo y carga física de trabajo asignada a los trabajadores.

2.2 Modelos orientados a los costos

Frecuentemente el objetivo en una línea de ensamble, es minimizar el número de estaciones de trabajo para un tiempo de ciclo determinado. Esto es llamado balanceo de una línea de ensamble orientado al tiempo o “Time-Oriented Assembly Line Balancing”. Hoy en día, debido a la competitividad en el mercado mundial, el costo de la producción se ha convertido en un factor de suma relevancia. Aun en líneas de ensamble con una alta tasa de eficiencia, se busca la manera de reducir el costo de producción. Bajo esta perspectiva económica el objetivo de un diseño y balanceo de una línea de ensamble es el de

minimizar el costo total por unidad procesada. Por lo tanto, es necesario asignar las tareas a las estaciones de forma tal que se minimicen los costos de instalación y operación de la línea. A continuación se describen algunas metodologías utilizadas para solucionar problemas de balanceo de líneas orientados a los costos.

Amen [1] desarrolla el método exacto de ir hacia atrás o “Backtraking” con el fin de resolver el problema de balanceo de línea orientado a los costos. El método propuesto tiene las siguientes presunciones:

- ❖ La línea de ensamblaje produce un solo producto.
- ❖ Las unidades del producto se transportan con una velocidad constante a través de la línea (líneas de flujo continuo).
- ❖ La tasa de la producción es determinada por el tiempo de ciclo de la línea.
- ❖ El tiempo de ciclo limita la duración del trabajo para una sola unidad del producto en una estación de la línea de ensamblaje.

El método para el balanceo de línea consiste en aplicar la regla de la estación máximamente cargada. Esta regla dice que una estación tiene su carga máxima, si no tiene mas tareas asignables a ella. Una tarea es asignable a una estación si todas las tareas predecesoras han sido asignadas y cuando el tiempo de operación no excede al tiempo disponible de la estación que está en

consideración.

El objetivo de esta investigación es minimizar el costo total por unidad. Amen considera que la tasa de pago efectiva de una estación es determinada por la tarea mas difícil que se realiza en dicha estación. El costo total de labor por unidad de producto consiste en la suma de las tasas de pago de las estaciones multiplicado por el tiempo de ciclo. Por otro lado presume que el costo de capital depende del largo de la línea de ensamblaje (i.e. número de estaciones en serie) y que todas las estaciones tienen las mismas dimensiones. Además, presume que los demás costos, como por ejemplo el costo de material, son independientes de la labor y del largo de la línea de ensamblaje.

Los resultados de esta investigación experimental demuestran que el nuevo método encuentra las soluciones óptimas para problemas pequeños y medianos con tiempo computacional aceptable.

Amen [2] en el artículo "un método exacto para el balanceo de línea orientado a los costos" del mismo autor, presenta una metodología que logra mejorar los resultados obtenidos en Amen [1] desde el punto de vista de calidad y tiempo computacional. El resultado de una investigación experimental muestra que la nueva regla, "best change of the idle cost", logra mejorar significativamente la solución anterior. Presenta además un nuevo método, "exact solution of sliding

problem windows”, al cual consideran como el mejor método heurístico conocido hasta ahora para solucionar este tipo de problema.

Scholl y Becker [25] proponen una corrección al método exacto propuesto por Matthias Amen [1]. Amen considera el problema de balanceo de línea orientado a los costos, incluyendo costos de capital (CALBP-W). Scholl y Becker tienen como objetivo minimizar el costo total por unidad, el cual se obtiene mediante la suma de las tasa de pago de las estaciones multiplicado por el tiempo de ciclo. Los autores demuestran que la regla de la carga máxima es incorrecta y utilizan la regla de dominio de Jackson, la cual es modificada y adaptada para solucionar este problema. La regla de dominio de Jackson dice que una estación con carga asignada, puede ser modificada. Una tarea asignada puede ser reemplazada por una tarea disponible que no está asignada a dicha estación siempre y cuando no incremente la tasa de pago de la estación ni el tiempo de ciclo. Entonces se dice que la tarea es dominante. En resumen el efecto positivo o negativo de la regla de la carga perfecta y de la regla de Jackson modificada no es confirmado en esta investigación.

Malakooti [14] formula el problema de balanceo de línea con múltiples criterios. La función objetiva tiene como objetivo el minimizar el número de estaciones, tiempo de ciclo y costo de las operaciones. Malakooti calcula el costo de operaciones de la siguiente manera.

Costo de operación= [Costo de operación por unidad de producto x (Tiempo de Operación/Tiempo de Ciclo)]+ [Costo por periodo de operar los equipos de cada estación x Número de estaciones]

Malakooti desarrolla un algoritmo interactivo usando una función utilidad no lineal llamada “cuasi-cóncavo o cuasi-convexo”. Para una mejor ilustración considere dos puntos extremos y un punto medio el cual es el promedio. La función de utilidad cuasi-cóncavo tiende a preferir un punto medio entre los dos puntos extremos. Por otra parte, la función de utilidad cuasi-convexo tiende a preferir las alternativas de los extremos y puede preferir uno de los puntos extremos en vez del punto medio. En esta investigación se recomienda utilizar el algoritmo cuasi-cóncavo para encontrar la mejor alternativa y luego utilizar el cuasi-convexo para seleccionar la mejor alternativa. Ambos algoritmos generan un conjunto de alternativas eficientes de las cuales se selecciona la mejor. Una característica que no posee este modelo es estaciones en paralelo.

Malakooti [15], Malakooti y Kumar [16] consideran el problema de balanceo de línea con filas internas o “buffer” tanto para un criterio de decisión como para múltiples criterios de optimización. Las fallas en las estaciones de trabajo y otras circunstancias pueden tener como resultado un tiempo de ocio innecesario en la línea de producción. Con el propósito de mejorar la tasa de producción del sistema se colocan entre cada par de estaciones una fila con capacidad limitada.

Estas filas internas o “Buffer” son unidades de almacenamiento entre cada par de estaciones. Estas amortiguan el impacto de problemas en la línea y como consecuencia aumentan la capacidad de la línea de ensamble. En esta investigación se tienen en cuenta múltiples criterios tales como; número de estaciones, tiempo de ciclo, tamaño de las filas y el costo de operación incluyendo las filas. El costo total se obtiene de la suma del costo de operación y el costo de las filas. El costo de operación se calcula de igual forma que en Malakooti [14]. El costo de las filas es igual al número de estaciones multiplicado por el tamaño de las filas y por el costo de mantenimiento y operación de una unidad en la fila. El tamaño de las filas es obtenido por la eficiencia de la línea y C_k que es una constante dada para un determinado número de estaciones. Se desarrolla un heurístico para resolver el problema, presumiendo que todas las estaciones tienen un buffer con la misma capacidad. Los resultados obtenidos arrojan un conjunto de alternativas y demuestran que la mejor alternativa resultó del método de criterios múltiples. Malakooti y kumar desarrollan un sistema experto multi-objetivo para el problema de balanceo de línea. Estos seleccionaron el método de inteligencia artificial para lograr el objetivo. Esta investigación considera los mismos parámetros y presunciones que Malakooti [15]. El sistema es una herramienta muy valiosa que fue construida con una diversidad de métodos para el balanceo de línea. Este es usado para la formulación, validación de la formulación, generación de alternativas y selección de la mejor alternativa.

Le permite al usuario manejar el sistema fácilmente, de forma tal que el usuario ingresa los datos del problema en forma sencilla y obtiene los resultados.

Rosenberg y Ziegler et al. [22] desarrollan dos nuevos algoritmos heurísticos para solucionar el problema de balanceo de línea orientado a los costos. Presentan el método de la tasa de pago o “Wage-Rate” y el método de suavización de la tasa de pago o “Wage-Rate-Smoothing”. Se presume que las tareas asignadas a una estación causan una tasa de pago. Esta tasa de pago representa el costo de la tarea por unidad de tiempo. La tasa de pago máxima de todas las tareas asignadas a la estación se escoge como la tasa de pago representativa de la estación. Los autores comparan los resultados obtenidos bajo ambos heurísticos. El objetivo de los modelos es reducir al mínimo el costo agregado sobre todas las estaciones. El número de estaciones es variable. Se presume que la operación de una estación k causa un costo por unidad de tiempo o w_k “wage rate”. Este es igual al costo máximo de todas las tareas que se asignen a la estación. El trasfondo de esta presunción es que la tarea más exigente asignada a una estación define el nivel de calificación de los operadores. Los heurísticos son estudiados con respecto a la calidad de su solución para generar soluciones aleatorias de problemas de balanceo de línea.

2.3 Estaciones y Tareas en Paralelo

La actividad del balanceo de línea conlleva la asignación de tareas a estaciones de forma tal que todas las estaciones en la línea tengan aproximadamente la misma carga de trabajo. Tareas indivisibles y de larga duración dificultan el proceso de balanceo. Cuando la duración de una tarea excede el tiempo de ciclo deseado, se utilizan estaciones en paralelo para resolver el conflicto. Paralelizar una estación significa el utilizar estaciones adicionales idénticas de forma tal que en conjunto puedan lograr la capacidad de producción o tiempo de ciclo deseado. El tiempo de ciclo resultante del conjunto de paralelas se determina del siguiente modo:

$$TCp = \frac{\sum_{i=1}^m ti}{N} \quad 2.2$$

Donde;

TCp = Tiempo de ciclo resultante del conjunto de paralelas.

ti = Tiempo de la tarea “i” asignada a la estación con paralelas.

m = Número total de tareas en la estación con paralelas.

N = Número total de estaciones incluyendo paralelas.

La carga máxima asignable a estaciones en paralelo debe cumplir con la siguiente restricción:

$$\sum_{i=1}^m ti \leq TC \times N \quad 2.3$$

donde;

TC = Tiempo de ciclo de la línea

En ocasiones se llegan a duplicar estaciones generando líneas enteras corriendo en paralelo. Esto suele utilizarse cuando se pretende aumentar la flexibilidad del sistema. De esta forma se puede reaccionar mejor a cambios en la demanda y se disminuye el riesgo de parar la producción por averías en las máquinas. Por otra parte, se pueden conseguir mejores balanceos, porque se pueden dar más combinaciones de tareas [19]. Sin embargo, el costo en que se incurre al paralelizar una línea de ensamblaje y las limitaciones de espacio son factores muy importantes que se deben tener en cuenta al momento de tomar la decisión.

Las ventajas de colocar estaciones en paralelo son múltiples. En ocasiones el propósito es lograr cumplir con el tiempo de ciclo de la línea. Por otra parte, también se utilizan con el propósito de disminuir el tiempo de ciclo global de la línea de ensamblaje. La instalación de estaciones en paralelo envuelve costos fijos adicionales que son necesarios evaluar durante el proceso de diseño y balanceo

de la línea.

Pinto et al. [29] presentan un estudio con estaciones en paralelo cuyo objetivo es minimizar los costos de labor, los cuales consisten en los costos fijos por duplicar una estación, los costos de salario regulares y los costos de horas extras. Estos últimos se presentan si el tiempo de ciclo observado excede el tiempo de ciclo deseado. Un procedimiento de ramificar y acotar se desarrolla para asignar tareas a las estaciones y decidir si una estación debe ser duplicada.

Pinto et al. [30] consideran el concepto de tareas paralelas y presumen que las tareas de larga duración pueden ser descompuestas en tareas más cortas que tienen las mismas relaciones de precedencia que la tarea original. Las tareas paralelas se asignan a diversas estaciones con el propósito de conseguir un balanceo factible (i.e. cumple con el tiempo de ciclo deseado) y/o para mejorar la eficiencia de la línea. El objetivo es minimizar los costos totales los cuales consisten en los costos de las facilidades y los costos de trabajo de la estaciones en paralelo. El problema se soluciona por el procedimiento de ramificar y acotar. En este algoritmo las tareas paralelas deben ser asignadas a más de dos estaciones y el tiempo de la tarea se subdivide igualmente entre las dos partes.

Bard [4] considera las tareas y estaciones paralelas así como el tiempo muerto necesario para transportar las piezas de trabajo de una estación a otra. En líneas en serie con correas de transporte de tiempo estacionario (paced-line) el

tiempo al cual se balancea la línea de ensamble debe considerar el tiempo muerto requerido para mover las unidades de una estación a otra. La relación debe ser del siguiente modo:

$$\sum_{i=1}^m ti + TT_{j-1,j} \leq TC \quad \forall j \quad 2.4$$

donde;

$TT_{j-1,j}$ = Tiempo de transporte desde la estación j-1 hasta la estación j.

TC= Tiempo de ciclo de la línea.

Por lo tanto, en estos casos la carga total de trabajo asignada a una estación se ve limitada por el tiempo que se consume transportando las unidades de una estación a otra. En este tipo de línea las estaciones en paralelo reducen el tiempo muerto por un factor de 1/N. Los autores desarrollan una metodología de programación dinámica o DP, con el fin de solucionar el problema tipo 1 o SALBP-1.

Buxey et al. [8] presenta un modelo que considera adicionar estaciones en paralelo con el fin de reducir el tiempo de ocio total. El objetivo del modelo es minimizar los costos fijos por equipo adicional. La paralelización de las estaciones consiste en la combinación de estaciones a unidades más grandes

(estaciones agregadas) las cuales funcionan con equipos de operadores. Las estaciones agregadas tienen un múltiplo del tiempo de ciclo original disponible y los operadores pueden rotar y de esta manera aumenta la satisfacción profesional. Los autores desarrollaron los métodos “Positional Weight” y “Random Generation” para resolver el problema de balanceo de línea teniendo las estaciones en paralelo. Estos métodos se aplicaron a dos casos de la industria.

Bukchin y Rubinovitz [7] estudian el problema de balanceo de línea de ensamblaje, teniendo en cuenta las estaciones en paralelo y selección del equipo. Los autores proponen un modelo para minimizar el costo total. Los autores de la investigación utilizan diseño de experimento para demostrar la influencia de la combinación de los parámetros del sistema, tales como la flexibilidad de la secuencia de ensamblaje y el tiempo de ciclo en el mejoramiento del balanceo, y la adición de estaciones en paralelo. Los resultados del estudio demuestran que la flexibilidad en el orden de las operaciones de ensamblaje y el tiempo de ciclo tiene efectos significativos en el mejoramiento del balanceo de la línea. También indican que las estaciones en paralelo son especialmente necesarias cuando un balanceo eficiente es difícil de obtener debido al ciclo de línea de corta duración o baja flexibilidad en el proceso de ensamblaje.

Scholl y Klein [26] se concentran en el problema de balanceo para células de manufactura con despliegue en forma de “U”. El diseño de la celda tiene como

objetivo maximizar la eficiencia de la línea. El arreglo de las estaciones en una línea-U tiene varias ventajas sobre la configuración tradicional especialmente en aquellos ambientes de manufacturas con poco volumen de producción de una diversidad de producto. Para solucionar diversas versiones del problema de línea de ensamble en “U” se utiliza el procedimiento de ramificar y acotar o “U-line assembly line balancing problem” (ULINO). Los resultados experimentales indican que con la configuración de línea-U se puede obtener mejor eficiencia en la línea comparada con las líneas tradicionales.

Askin y Zhou [3] proponen un modelo de programación entera no lineal para resolver el problema de balanceo de líneas de producción o “production line balancing problem” (PLBP). Este problema conlleva la asignación de tareas en una línea de producción en serie. El modelo permite trabajar con una mezcla de productos y el uso de estaciones de trabajo idénticas en paralelo. Esto para cada etapa del sistema de producción en serie. El objetivo es encontrar la factible asignación de tareas con el fin de minimizar el costo total. Se desarrolla un heurístico para crear las estaciones de trabajo en paralelo y para la asignación de las tareas a las estaciones. La utilización de las estaciones es considerada explícitamente debido a una variable en el modelo que establece niveles aceptables. El heurístico permite que una estación sea paralelizada un número “x” de veces y establece un límite aceptable en la utilización de las estaciones. Las decisiones sobre adicionar estaciones de trabajo se toman basadas no

solamente en los tiempos de la tarea sino también en la comparación del costo incremental de equipo/herramientas con el costo de no utilizar la capacidad de las estaciones de trabajo. Los resultados del heurístico responden bien a las implicaciones económicas del costo de equipo/herramientas y del tiempo ocioso del trabajador. El heurístico es capaz de encontrar buenas soluciones rápidamente a problemas grandes.

Vilarinho y Simaria [31] presentan un nuevo modelo de programación matemática para el problema de balanceo de línea de con mezcla de productos, estaciones de trabajo en paralelo y restricciones de zonificación. Las restricciones de zonificación establecen la necesidad de tener tareas cerca o distantes de otras tareas. El modelo permite que el usuario controle el proceso de crear estaciones de trabajo en paralelo. El procedimiento tiene dos etapas las cuales utilizan una aproximación de simulación de recocido (“simulated annealing”) desarrollada para lidiar con la complejidad del problema. La primera etapa del procedimiento busca una solución sub-óptima, con el objetivo de minimizar el número de estaciones de trabajo a lo largo de la línea cumpliendo con un tiempo de ciclo determinado. En la segunda etapa el objetivo es balancear las cargas de trabajo dentro y entre de las estaciones de trabajo. La contribución de esta investigación es el uso de un conjunto de restricciones para controlar el proceso de duplicación de las estaciones de trabajo y del uso de una función multi objetivo. El heurístico propuesto, combinado con un estudio de simulación, se aplicó para balancear

una línea de ensamble de mezcla de productos de la cámara fotográfica PC con muy buenos fueron obtenidos.

Scholl y Becker [24] estudian las metodologías aplicadas a cada tipo de problema de balanceo de línea. Para el caso del problema de balanceo de línea tipo-E (“Simple assembly line balancing problem-Efficiency”) SALBP-E, el cual es el problema más general, el objetivo es maximizar la eficiencia de la línea de ensamble mientras simultáneamente minimiza el tiempo de ciclo y el número de estaciones y su interrelación. Una solución obvia para el SALBP-E consiste en definir los intervalos del tiempo de ciclo y/o del número de estaciones. Es decir se define el mínimo y el máximo de cada parámetro con el fin de encontrar una combinación factible entre ellos. Los autores después de una búsqueda intensa concluyeron que no encontraron metodologías disponibles que solucionen directamente SALBP-E. Esto se puede deber a la dificultad de dirigir la búsqueda en las regiones prometedoras del espacio de la solución cuando el número de estaciones y el tiempo de ciclo no son fijos.

En la Tabla 4 se resume la búsqueda literaria realizada en esta investigación. No se encontraron metodologías para la solución del problema SALBP-E con estaciones en paralelo, cuyo objetivo es minimizar el tiempo de ciclo y número de estaciones. No se encontraron investigaciones que correlacionen los costos de agregar posiciones en serie y estaciones en paralelo con el objetivo de reducir el

tiempo perdido debido a la falta de balance. Además, se pretende asociar el costo de las tareas asignadas a las estaciones paralelas y su correspondiente posición.

Referencia	Tipo de SALPB	Método	Estaciones y tareas en paralelo	Costo en función objetivo	Observaciones
Klein y Scholl et al. 1996.	2	Ramificar y Acotar	-	-	
Goldberg et al.	2	Algoritmos genéticos	-	-	
Scholl y Voß et al. 1996	2	Búsqueda Tabú	-	-	
McMullen y Tarasewich et al. 2003	1	Técnica de Hormigas	-	-	
Pastor, R., Andres, C., et al. 2002	2	Búsqueda Tabú	-	-	El problema de balanceo de una mezcla de producto con adicionales objetivos
Karabati y Saym et al. 2003	2	Heurístico	-	-	El heurístico minimiza el tiempo máximo subciclo
Carnahan, B., Norman, B., y Redfern, M., et al.	2	Heurístico	-	-	Consideran los criterios físicos de la demanda
Merengo, Nava y Pozzetti et al. 1999	1	Heurístico	-	-	Líneas de ensamblaje manuales con mezclas de producto
Amen et al.2000	1	Método exacto	--	Costo por unidad de producto	Incluye costo de capital por estación
Amen et al.2001	1	Heurístico	-	Costo por unidad de producto	Incluye costo de capital por estación
Malakooti et al. 1991	1	Heurístico	-	Costos de operaciones	Modelo de múltiples criterios de decisión
Malakooti et al. 1994 y Malakooti y Kumar et al. 1996	1	Heurístico	-	Costos de Buffer	Modelo de múltiples criterios de decisión
Rosenberg y Ziegler et al. 1992	1	Heurístico	-	Costos agregados de las estaciones	El método de la tasa de pago o "Wage-Rate"
Pinto et al. 1975	1	Ramificar y Acotar	Si	Costos de salarios regulares y horas extras	
Pinto et al. 1981	1	Ramificar y Acotar	Si	Costos de facilidades y costos de estaciones de trabajo	
Bard et al. 1989	1	Programación Dinámica	Si	Costos de las estaciones en paralelo	Tiene en cuenta el tiempo muerto de o tiempo necesario para transportar la pieza entre estaciones
Buchan and Rubin Ovitz et al. 2002	1	Ramificar y Acotar	Si	Costo Total	Los costos incluyen costo de equipo y de estaciones en paralelo
Vilarinho and Simaria et al. 1997	1	simulación de recocido	Si	Costos de Estaciones en Paralelo	Restricciones de Zonificación
Askin and Zhou et al. 2002	1	Heurístico	Si	Costo de equipo/herramientas	Línea de ensamblaje para mezcla de productos

Tabla 4. Resumen de Metodologías de Balanceo de Líneas

CAPITULO 3

JUSTIFICACION Y OBJETIVOS

3.1 Justificación

El propósito de toda compañía es lograr maximizar los beneficios con un número mínimo de recursos. La adición de recursos representa una inversión que debe ser compensada con un aumento en beneficios. Desde el punto de vista del balanceo de línea, esto se logra cumpliendo con la capacidad de producción deseada, con un número mínimo de recursos. Se interesa determinar aquel balanceo de línea con un costo total mínimo de operación e inversión de capital y con un número mínimo de estaciones en serie y en paralelo.

La adición de estaciones de trabajo en paralelo permite reducir el desbalance entre estaciones y aumenta la utilización de los recursos en sistemas de producción donde es difícil encontrar el balanceo de la línea sin tiempo ocioso significativo [3]. Las estaciones de trabajo en paralelo proporcionan flexibilidad y capacidad a la línea de ensamble, cuando es necesario. La indivisibilidad de tareas, especialmente de larga duración, dificulta el proceso de minimizar el tiempo de ciclo de la línea. El uso de estaciones de trabajo idénticas trabajando en paralelo puede resolver esta divergencia. La duplicación de estaciones de trabajo (i.e. estaciones idénticas en paralelo) permite aumentar la carga de trabajo en las estaciones, resultando en un ciclo efectivo menor [22]. Esto debido a que el

ciclo efectivo de la estación se determina de la suma de los tiempos de las tareas asignadas a la estación entre el número de estaciones en paralelo.

A través de la revisión de literatura no se encontró un modelo de optimización para resolver el problema de balanceo de línea cuyo objetivo es minimizar los costos totales, de operación e inversión de capital, y el número total de estaciones. Esto, contemplando el uso de estaciones en paralelo y asociando costos tanto a tareas específicas como a estaciones de trabajo.

3.2 Objetivos

Los objetivos originales de esta investigación fueron el desarrollo y programación de un modelo de optimización y un modelo heurístico para obtener soluciones al problema de balanceo de línea donde se desea minimizar los costos totales de la línea, considerando estaciones en paralelo y con la flexibilidad de asociar costos a tareas y estaciones de trabajo. El modelo heurístico se desarrolla con el propósito de obtener soluciones a problemas grandes los cuales requieren tiempo computacional excesivo mediante el modelo de optimización. El objetivo de los modelos es el de minimizar los costos totales por unidad producida, de inversión y operacionales, y el número total de estaciones en serie y en paralelo.

Los modelos debían poseer las siguientes características:

1. Tiempo de ciclo de la línea variable y limitado por un valor máximo permisible establecido por el usuario.
2. Número de estaciones en serie variable. El número de estaciones óptimo es estimado por el modelo partiendo de un valor máximo establecido por el usuario.
3. Uso de estaciones idénticas en paralelo con el propósito de disminuir el desbalance de cargas entre estaciones. El número de estaciones en paralelo puede ser limitado por un valor máximo permisible establecido por el usuario.
4. Costos de inversión asociados a tareas con requerimientos específicos de equipo y/o herramientas. Uno de los beneficios de esta investigación es el hecho de que los costos de inversión de capital se relacionan con las tareas y no las estaciones. Hay que reconocer que, contrario a muchas investigaciones previas: (1) los requisitos de maquinaria están asociados a las características de las tareas, y (2) no se conoce de antemano en cuál estación o posición en serie va a ser asignada la tarea. Por lo tanto, un modelo que adjudica costos de inversión de capital a tareas y no a estaciones de trabajo es una mejor representación de la realidad en las industrias.

Los modelos desarrollados en esta investigación son aplicables a líneas:

- ❖ Manuales.
- ❖ De flujo continuo o tiempo estacionario fijo.
- ❖ Con un operador por estación de trabajo en serie o en paralelo.
- ❖ De un solo producto.

CAPITULO 4

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología utilizada en esta investigación aparece en la Figura 8. Una breve descripción de cada paso se presenta en secciones subsiguientes.

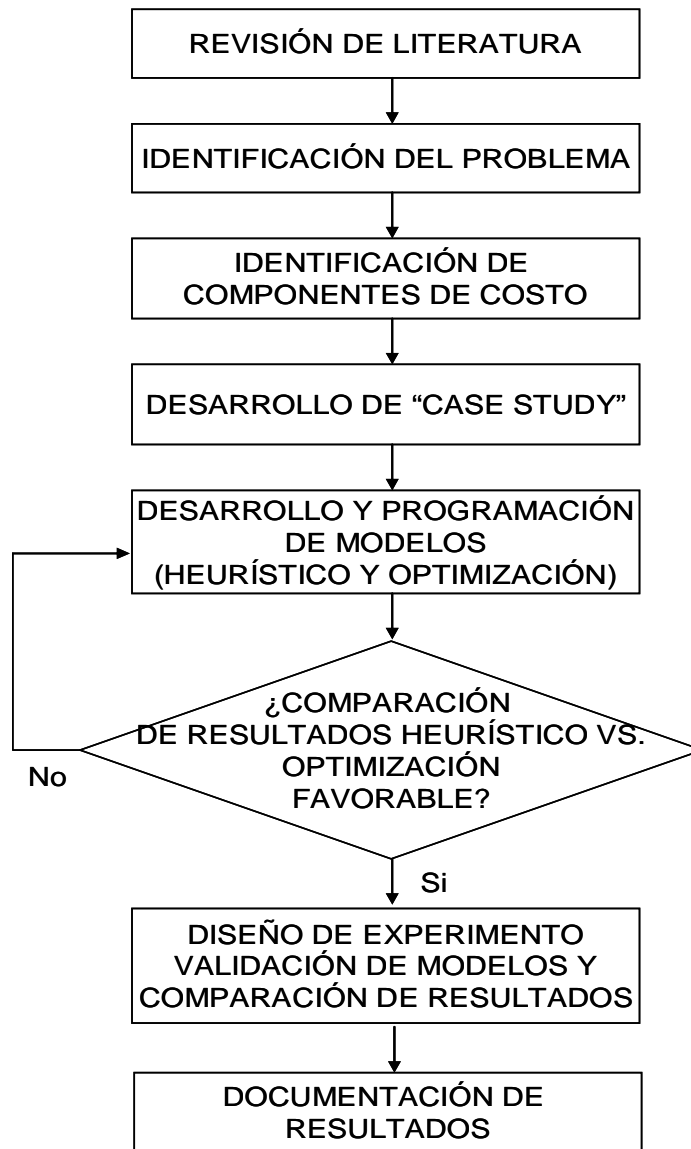


Figura 8. Metodología utilizada en la investigación.

4.1 Revisión de Literatura e Identificación del Problema

El primer paso en el desarrollo de esta investigación fue una revisión de literatura en el área de balanceo de líneas. Como mencionado anteriormente, en la revisión de literatura no se encontró un modelo de optimización para resolver el problema de balanceo de línea cuyo objetivo minimizar los costos totales, de operaciones e inversión de capital, y el número total de estaciones, en serie y en paralelo. Otra característica del modelo de interés es el asociar costos tanto a tareas específicas como a estaciones de trabajo. Por lo tanto, el enfoque de esta tesis es el desarrollo de un modelo de optimización para obtener soluciones a este tipo de problema. Se desarrollan además dos modelos heurísticos para obtener soluciones a problemas grandes los cuales requieren tiempo computacional excesivo mediante el modelo de optimización. Una característica distintiva del modelo de optimización y de los heurísticos es que el ciclo de la línea es variable, con un máximo permisible definido por el usuario del modelo. El modelo permite además que el usuario defina un valor máximo permisible de estaciones tanto en serie como en paralelo.

4.2 Identificación de componentes de costos

El objetivo del modelo de optimización tanto como los modelos heurísticos es la minimización de los costos totales por unidad. Esto se logra maximizando la capacidad de producción y la utilización de los recursos. La capacidad de

producción aumenta a medida que se reduce el tiempo de ciclo de la línea y la utilización de los recursos aumenta a medida que se reduce el tiempo ocioso de las estaciones de trabajo.

Reducciones en el tiempo de ciclo de la línea o en el tiempo de ocio de las estaciones de trabajo requieren la adición de estaciones en serie y/o en paralelo con costos asociados de labor, espacio, utilidades, y en algunos casos inversión de capital. La minimización de los costos totales ocurre cuando el costo por unidad producida es el mínimo posible. Los costos a ser considerados en el modelo son: (1) labor, (2) espacio y utilidades, e (3) inversión de capital.

4.3 Desarrollo de Caso de Estudio

Los datos utilizados para el desarrollo de los modelos corresponden a una línea de ensamblaje de productos médicos. Para el proceso de validación y comparación de resultados se utilizó el diseño de experimento donde se compararon los resultados obtenidos para 10 casos desarrollados de los proyectos del curso ININ 4009 dictado por la Dra. María Irizarry en la Universidad de Puerto Rico.

4.4 Desarrollo y programación de los modelos

Una vez identificado el objetivo del modelo y los componentes de costo de interés, se procede a desarrollar y programar el modelo de optimización y los

modelos heurísticos.

El modelo de optimización se desarrolla mediante la técnica de programación lineal mixta. El programa de optimización LP-Optimizer creado por Markus Weidenaver, se utiliza para realizar la búsqueda de la solución óptima del problema. Los datos de modelo son definidos en Excel y mediante el uso de macros se crean las ecuaciones en un archivo cuya extensión es “lp”. En la Figura 9 se muestra una impresión de la pantalla de la hoja de cálculo en Excel utilizada para definir los parámetros de insumo del problema. La hoja de cálculo contiene además un macro diseñada con el propósito de generar el archivo de lp. Un ejemplo de la generación de las ecuaciones en un archivo lp se muestra en el Apéndice B. Otro macro es utilizado para extraer los resultados del LP-Optimizer y presentarlos en Excel.

Las variables y ecuaciones en el modelo de optimización se presentan en la sección 5.3.1 y 5.3.2.

El modelo heurístico se programa en Microsoft Excel Visual Basic utilizando un conjunto de reglas que tratan de encontrar una o más soluciones específicas del problema determinado. El flujograma del modelo heurístico se presenta en la sección 5.4.2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Nombre de Archivo								
2	c:\Documents and Settings\Mario\My Documents\laTesisHeidy\lbttesis.lp								
3	maxcar								
4	250								
5	Archivo Ip de Resultados								
6	c:\Documents and Settings\Mario\My Documents\laTesisHeidy\lbttesis.int								
7	Tiempo de Ciclo Maximo								
8	78								
9	Numero Maximo de Estaciones								
10	7								
11	Costo por unidad de tiempo perdido por empleado requerido por estacion								
12	0.26								
13	Tiempo de Ciclo Estimado								
14	78								
15									
16									
17	Correr Generador de la Matriz								
18									
19	Extraer los Resultados de LP Integer Solution								
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									

Figura 9. Hoja de Calculo de Parámetros del Modelo de Optimización

4.5 Comparación de resultados

La comparación entre los resultados del primer modelo heurístico propuesto en esta investigación y los resultados del modelo de optimización se llevó a cabo con el propósito de evaluar la efectividad del modelo heurístico. Esta comparación es en términos del porcentaje de diferencia entre la respuesta de los modelos. La comparación permite detectar errores de lógica y áreas de oportunidad para mejorar la inteligencia del heurístico.

Mediante este proceso de comparación de resultados surge la alternativa de

desarrollar un segundo heurístico compuesto por el algoritmo de optimización con restricciones en la asignación de tareas a estaciones de trabajo. Este fue desarrollado para obtener soluciones cercanas a la solución óptima en problemas grandes para los cuales el tiempo de computación con el algoritmo es excesivamente grande.

4.6 Diseño de experimento

Se diseñó un experimento con el propósito de evaluar la calidad de los resultados obtenidos de los modelos heurísticos en comparación con la solución del modelo de optimización. Entre los escenarios de interés estaba el evaluar la calidad de los resultados bajo diferentes valores de ciclo de línea. Específicamente aquellos casos en los que el ciclo de la línea excedía la tarea de mayor duración en la línea de producción y el caso en el que el ciclo de la línea era menor que la tarea de mayor duración. En este último caso era imperativo el uso de estaciones en paralelo para lograr cumplir con los requisitos de producción.

Se interesaba además comparar el tiempo computacional requerido para obtener una solución al problema. Por lo tanto, las respuestas de la experimentación fueron: (1) porcentaje de diferencia en el costo total de operaciones bajo los tres modelos propuestos, y (2) el tiempo computacional requerido para obtener una respuesta con cada uno de los modelos.

Los detalles del diseño de experimento se presentan en la sección 5.5.2.

4.7 Documentación de resultados

El último paso en la metodología es la documentación de resultados. Estos se presentan en el capítulo 5.

CAPITULO 5

RESULTADOS

Los modelos de optimización o algoritmos son un conjunto de operaciones lógicas y matemáticas ejecutadas en una secuencia específica. Los algoritmos tienen la característica de buscar minuciosamente una solución óptima de forma tal que cada solución sucesiva tiene que ser mejor que la anterior. Debido a esto, los algoritmos se utilizan para solucionar problemas relativamente pequeños, cuyo tiempo computacional sea factible. Las técnicas más utilizadas para alcanzar una solución óptima son la programación lineal, y ramificar y acotar. En esta investigación se utiliza el método de programación lineal para desarrollar el modelo de optimización.

5.1 Modelo de Optimización

La programación lineal es una técnica matemática cuyo objetivo es la determinación de soluciones óptimas a los problemas en los que intervienen recursos limitados entre actividades competitivas. Es un método matemático que permite asignar una cantidad fija de recursos con el fin de satisfacer las restricciones, de tal forma que mientras se optimiza algún objetivo, se satisfacen otras condiciones definidas [21].

5.1.1 Presunciones y Limitaciones

La programación lineal tiene ciertas suposiciones y limitaciones implícitas las cuales son importantes tener en cuenta a la hora de desarrollar un modelo de programación lineal. Una descripción breve de las presunciones y limitaciones más importantes se presenta a continuación.

5.1.1.1 Presunciones

- ❖ **Proporcionalidad.** La proporcionalidad implica que si el valor de una variable se duplica, también se duplicarán en la misma proporción sus contribuciones, tanto en la función objetiva como en las restricciones.
- ❖ **Aditividad.** Esta presunción garantiza que la contribución total, tanto en la función objetiva como en las restricciones, es igual a la suma de las contribuciones individuales.
- ❖ **Divisibilidad.** La presunción de divisibilidad indica que las variables de decisión pueden ser divididas a cualquier nivel fraccionario, de tal manera que puedan tomar valores no-enteros. Cuando las presunciones de proporcionalidad y aditividad son combinadas se alcanza la linealidad. Por lo tanto, puede decirse que la linealidad y la divisibilidad son las presunciones más importantes en el desarrollo de un modelo de programación lineal.

5.1.1.2 Limitaciones

- ❖ **Modelo Determinístico.** El modelo de programación lineal involucra el uso de parámetros. Sin embargo, el valor de dichos parámetros debe ser conocido y constante.
- ❖ **Modelo que no Suboptimiza.** Debido a la formulación del modelo de programación lineal, la solución obtenida es óptima. De lo contrario, se declara que el problema no tiene una solución factible.

5.1.2 Tipos de Modelos de Programación Lineal

Los modelos de programación lineal se clasifican en tres grupos de acuerdo al tipo de variables que utiliza:

- ❖ Programación Lineal Entera
- ❖ Programación Lineal Entera Mixta
- ❖ Programación Lineal Dinámica

En esta investigación se utiliza la técnica de programación lineal entera mixta. Es decir que el modelo esta compuesto por algunas variables enteras y otras variables binarias.

5.2 Modelo de Programación lineal

A continuación se presentan los componentes de costo incluidos en la función objetiva, la definición de variables y el desarrollo del modelo matemático.

En la función objetiva se consideraron costos asociados con las tareas y costos asociados con las estaciones de trabajo. Los costos asociados con las tareas incluyen inversiones de capital en herramientas, aditamentos y maquinarias. Se presume que cada estación de trabajo tiene un operador. Por lo tanto, los costos asociados con las estaciones de trabajo incluyen mano de obra, espacio y planta física.

5.2.1 Costos de Labor

El costo de labor tiene tres componentes, los cuales se muestran a continuación.

- ❖ Costo de Mano de Obra Directa. Se refiere a los costos de labor directa en \$/unidad de tiempo. Se presume que se requiere un empleado por estación de trabajo. Se presume además que el costo de labor es igual para todos los empleados en la línea.
- ❖ Costos Indirectos. Se refiere a los costos de suministros, y la mano de obra indirecta como por ejemplo: secretaria, gerente, etc. Estos costos representan un renglón significativo de los costos de operación, por lo cual es de suma relevancia considerarlos.

- ❖ **Beneficios Marginales.** Son los costos debido a beneficios ofrecidos a los empleados tales como vacaciones, bonos de navidad, planes médicos, etc.

5.2.2 Costos de Espacio y Facilidades.

Las estaciones de trabajo requieren recursos de espacio, electricidad, agua y otros los cuales resultan en costos operacionales. Se presume que todas las estaciones tienen el mismo tamaño y que requieren los recursos de espacio y facilidades.

5.2.3 Costo de Inversión de Capital.

Estos incluyen la inversión de capital requerida para obtener los equipos y maquinarias necesarias para llevar a cabo las tareas. Los costos de inversión están atados a las tareas debido a que son ellas las que determinan el tipo de maquinaria y equipos que se requiere. Los costos de inversión de cada estación son la suma de los equipos y maquinarias requeridos por cada una de las tareas asignadas a la estación, multiplicados por el número de paralelas asignadas.

5.2.4 Costo de Mesa de Trabajo.

Se presume que cada estación de trabajo requiere de una mesa de trabajo para ejecutar las tareas.

5.3 Formulación del Modelo Matemático

En este paso se tienen en cuenta las presunciones y limitaciones de la programación lineal. Con el fin de entender mejor el modelo matemático, a continuación se definen las variables del problema.

5.3.1 Definición de las variables

La definición de las variables consiste en representar simbólicamente todos los parámetros que forman parte del modelo de programación lineal mixta. Las variables utilizadas en el modelo se describen a continuación.

E = Número máximo de posiciones en serie $e = 1, 2, \dots, E$.

T = Número total de tareas; $t = 1, 2, 3, \dots, T$.

P = Número permisible de estaciones en paralelo $p=1,2,\dots, P$

L_e = Carga de trabajo por estación. Es la duración de las tareas asignadas a la estación “e” dividido por el número de paralelas.

C = Tiempo de Ciclo.

O_e = Desbalance, por cuanto C excede a L_e

e_t = Número que expresa la estación a la cual es asignada t .

e_τ = Número de la estación de los precedentes

d_t = Tiempo que consume la tarea t .

NP_e = Número de Paralelas en la estación e

$$\chi_{te} = \begin{cases} 1 & \text{si la tarea } t \text{ es asignada a la estación } e \\ 0 & \text{si no es asignada.} \end{cases}$$

$$\chi_{tep} = \begin{cases} 1 & \text{si la tarea } t \text{ es asignada a la estación } e \text{ con } p \text{ paralelas,} \\ 0 & \text{si no es asignada.} \end{cases}$$

A_t = Precedentes. Conjunto de tareas que tienen que ocurrir antes de t .

$$\partial_{ep} = \begin{cases} 1 & \text{si la estación } e \text{ tiene } p \text{ paralelas} \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$$

$$Y_e = \begin{cases} 1 & \text{si la posición en serie es asignada} \\ 0 & \text{si no es escogida.} \end{cases}$$

5.3.2 Modelo Matemático

El objetivo que se desea es el de minimizar los costos totales. Desde el punto de vista del balanceo de línea, esto se logra cumpliendo con la capacidad de producción deseada, con un número mínimo de recursos. Se interesa determinar aquel balanceo de línea con un costo total mínimo de operación e inversión de capital y con un número mínimo de estaciones en serie y en paralelo. La función objetiva del modelo matemático es:

Minimizar:

$$\left[\sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P X_{tep} * p * Costo_{Inversion} + \sum_{e=1}^E Costo_{(Labor + Espacio + Mesa)} * NP_e \right] * C \quad 5.1$$

Según se explicará en la sección de costos, los costos operacionales y de inversión de capital han sido expresados en términos de dólares por unidad de tiempo.

Las restricciones del modelo matemático son:

$$\sum_{e=1}^E \sum_{p=1}^P \chi_{tep} = 1 \quad t = 1, 2, 3, \dots, T. \quad 5.2$$

$$\chi_{te} = \sum_{p=1}^P \chi_{tep} \quad t = 1, 2, \dots, T, \text{ y } e = 1, 2, 3, \dots, E. \quad 5.3$$

$$e_t = \sum_{e=1}^E e \chi_{te} \quad t = 1, 2, 3, \dots, T. \quad 5.4$$

$$e_t \geq e_{\tau} \quad \text{para cada tarea } t, \text{ y cada } \tau \text{ en } A_t. \quad 5.5$$

$$L_{ep} = \sum_{t=1}^T (d_t / p) \chi_{tep} \quad e = 1, 2, 3, \dots, E, \text{ y } p = 1, 2, \dots, P. \quad 5.6$$

$$L_e = \sum_{p=1}^P L_{ep} \quad e = 1, 2, 3, \dots, E. \quad 5.7$$

$$L_e \leq C \quad e = 1, 2, 3, \dots, E. \quad 5.8$$

$$O_e = C - L_e \quad \text{para } e = 1, 2, 3, \dots, E. \quad 5.9$$

$$M^* \partial_{ep} \geq \sum_{t=1}^T \chi_{tep} \quad \text{para } e = 1, 2, 3, \dots, E, \text{ y } p = 1, 2, \dots, P. \quad 5.10$$

$$\sum_{p=1}^P \partial_{ep} \leq 1 \quad \text{Para } e = 1, 2, 3, \dots, E. \quad 5.11$$

$$NP_e = \sum_{p=1}^P \partial_{ep} * p \quad \text{Para } e = 1, 2, 3, \dots, E. \quad 5.12$$

$$Ye = \sum_{p=1}^P \partial_{ep} \quad \text{Para } e = 1, 2, 3, \dots, E. \quad 5.13$$

La función objetiva minimiza el costo total por unidad. Esta tiene dos componentes de costo, el costo por inversión de cada tarea asignada a la estación y el costo por estación que incluye costo de espacio, mesas, y labor.

La restricción (5.2) expresa que cada tarea debe estar asignada a solo una estación con p paralelas. La restricción (5.3) determina las tareas de la estación e , es igual a la sumatoria de las tareas asignadas a la estación e con p paralelas. La restricción (5.4) expresa la estación a la cual la tarea ha sido asignada. La restricción (5.5) refleja que una tarea puede estar asignada en la misma estación que sus precedentes o después que estos hayan sido asignados. Las restricciones (5.6) y (5.7) evalúan la carga de trabajo de cada estación teniendo en cuenta las paralelas añadidas a la estación. La restricción (5.8) verifica que la carga de cada estación sea menor que el tiempo de ciclo. La restricción (5.9) verifica la falta de balance entre cada estación. Las restricciones (5.10) y (5.11) confirman que todas las tareas asignadas a la estación tengan el mismo número de paralelas. La restricción (5.12) calcula el numero de estaciones en paralelo que posee la

estación e. La restricción (5.13) se asegura que se asigne una estación en serie cuando se asignan estaciones en paralelo en una estación.

Debido al requisito de linealidad del modelo de programación lineal, no era posible una función objetiva con el número de estaciones y el tiempo de ciclo variable. Por lo tanto, se desarrolló una herramienta en EXCEL con el propósito de facilitar el evaluar el modelo bajo diversos tiempos de ciclo. El usuario selecciona la mejor solución de todas.

5.4 Modelo Heurístico

La palabra heurístico proviene de la palabra griega “Heuriskein” que significa descubrir. Los heurísticos son un conjunto de reglas que tratan de descubrir una o más soluciones específicas de un problema determinado. Estas reglas están basadas en razonamientos deductivos de personas, debido a su intuición, conocimiento y experiencia. Por lo general los heurísticos se construyen para darle apoyo al algoritmo en los problemas que tienen dimensiones grandes. En la siguiente tabla se muestra una comparación entre los heurísticos y los algoritmos.

	Algoritmo	Heurístico
Modelo del Problema	Operaciones Lógicas	Reglas Intuitivas
Tiempo Computacional	No factible	Factible
Calidad de la Solución	Optima	Cercana a la Optima
Tipo de Restricciones	Precedencia y Capacidad	Precedencia y Capacidad
Presunciones del Modelo	Linealidad	Ninguna
Límites del Modelo	Modelo Determinístico	Ninguno
Requerimientos de Programación	Baja	Alta

Tabla 5. Comparación entre Algoritmos y el Heurístico

5.4.1 Pasos en el Desarrollo del Heurístico

Los pasos seguidos en el desarrollo del modelo heurístico se presenta en la Figura 10.

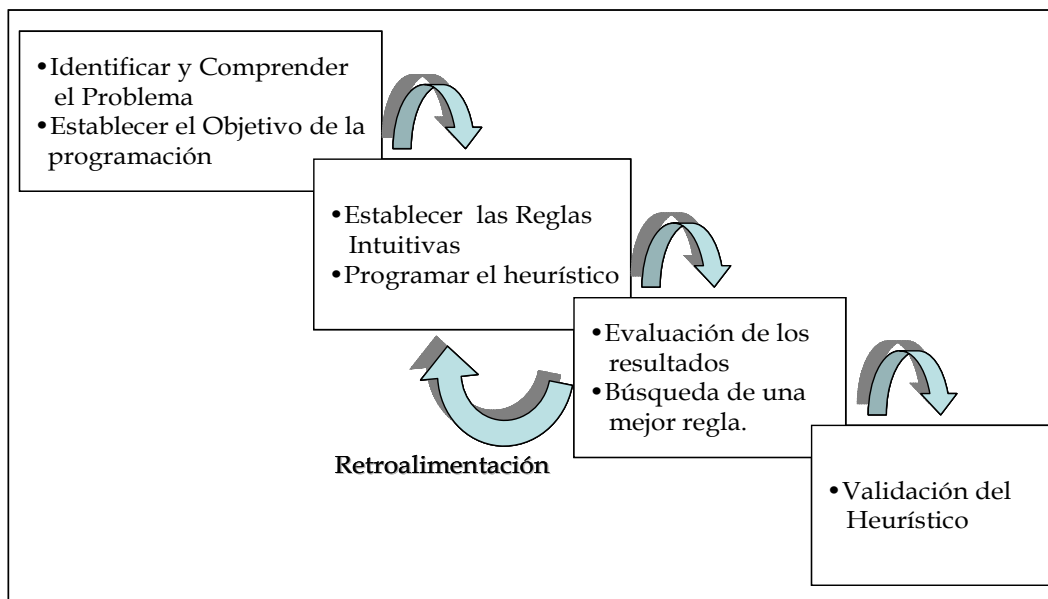


Figura 10. Metodología para la construcción del Heurístico

El primer paso, consiste en entender completamente el problema e identificar claramente su objetivo. El segundo paso es establecer las reglas que inicialmente se presume puedan alcanzar el objetivo del problema y luego programarlas. Este paso es el más importante en el cual se materializan las ideas, lo que hace que este paso sea complejo. Una vez esté programado el heurístico se evalúan los resultados con respecto al algoritmo y de acuerdo a estos se retroalimenta el proceso. El último paso es validar el heurístico con el algoritmo.

5.4.2 Flujograma y Código del Primer Modelo Heurístico

El flujograma del primer modelo heurístico propuesto en esta investigación se presenta en la Figura 11. El código del modelo heurístico se encuentra en el Apéndice A.

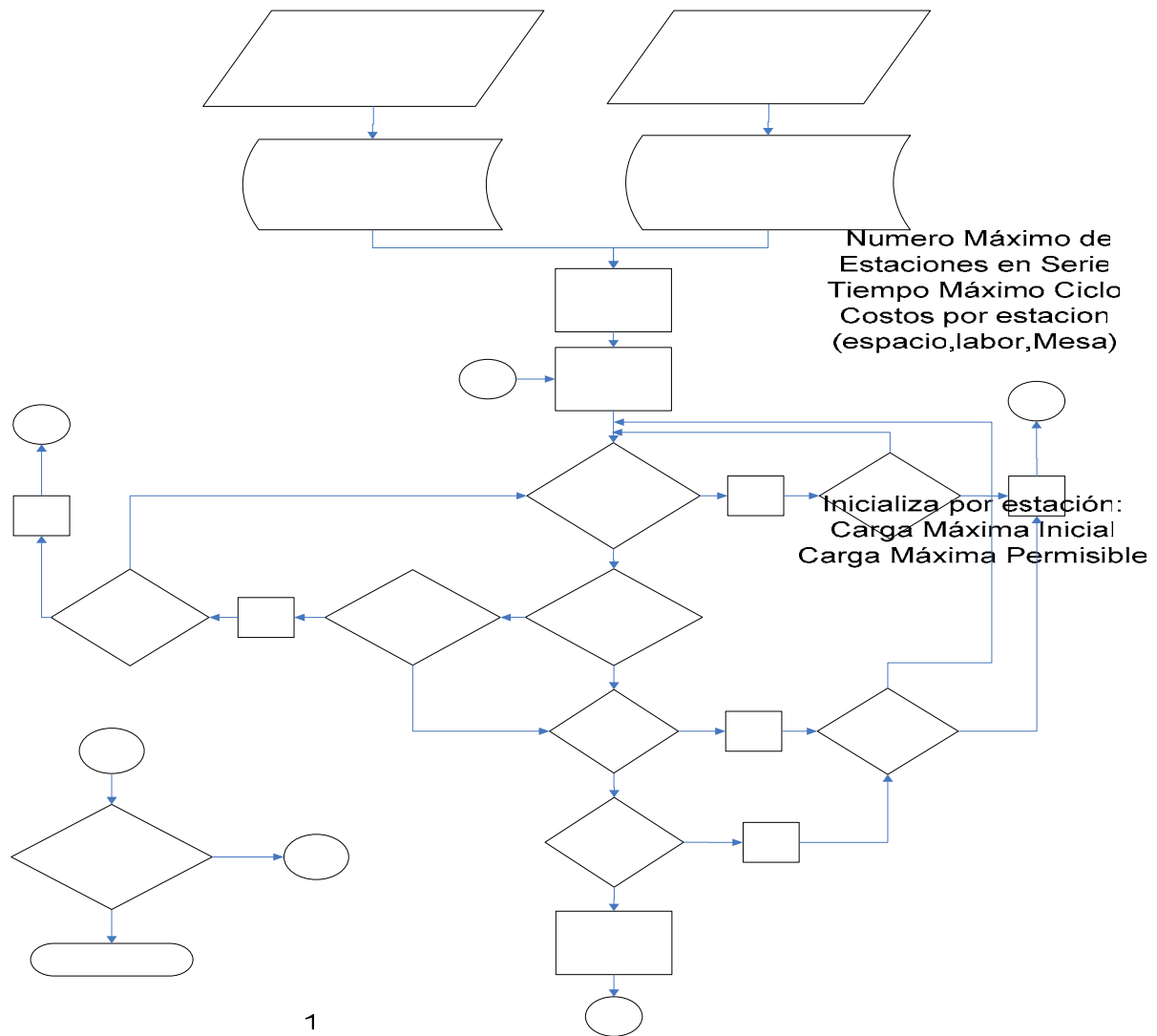


Figura 11. Flujograma del primer modelo heurístico

Durante el proceso de asignación de tareas a las estaciones de trabajo, el modelo

heurístico evalúa el impacto en el desbalance entre estaciones y costo total

asociado con el desbalance que tendría la asignación de la tarea a la estación en

cuestión. En el momento de toma de decisión, el heurístico evalúa escenarios con

y sin la asignación de la tarea a la estación considerando las estaciones en

paralelo. La asignación ocurre solo si se reduce el costo total del desbalance.

El producto de esta etapa del esfuerzo de investigación es una herramienta la cual provee todas las posibles soluciones dentro de un rango de valores permisibles de tiempo de ciclo definido por el usuario. La herramienta selecciona la mejor solución dentro del rango de posibles valores, y provee los resultados para todos los valores de ciclo sometidos por el usuario.

5.4.3 Segundo Heurístico - Algoritmo con Restricciones

El segundo modelo heurístico consiste en correr el algoritmo de optimización con restricciones de zona, que limitan el número de estaciones donde puede ser asignada una tarea. El algoritmo con restricciones de zona es también un modelo de programación lineal. Este modelo se diferencia del algoritmo sin restricciones en que a cada tarea se le define un rango de estaciones en serie, desde l_i hasta l_s , dentro de las cuales esta puede ser asignada.

El modo en que se someten los datos muestra en la Figura 12.

Se observa que cada tarea tiene un límite inferior y superior de estaciones en serie donde puede ser asignada. Es vital enfatizar el hecho de que las restricciones de zona provienen de los resultados arrojados por el método heurístico descrito en la sección 5.4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Tareas	Duración	Mínimo Número de Paralelas	Máximo Número de Paralelas	Costo por Inversion	li	ls	Tareas	Predecesores
1	t1	13.21	2	3	0.00000000	1	2	t3	t1
2	t2	7.47	1	2	0.00000000	1	2	t3	t2
3	t3	8.76	1	2	0.00000000	1	2	t4	t3
4	t4	6.48	1	2	0.00000000	1	3	t6	t5
5	t5	7.4	1	2	0.00000000	1	3	t7	t5
6	t6	5.47	1	2	0.00000000	1	3	t8	t6
7	t7	2.86	1	2	0.00000000	2	4	t9	t7
8	t8	3.98	1	2	0.00000000	2	4	t9	t8
9	t9	10.17	1	2	0.00000000	3	5	t10	t9
10	t10	4.9	1	2	0.00000000	3	5	t12	t11
11	t11	20.48	2	3	0.00000000	3	5	t13	t10
12	t12	3.75	1	2	0.00000000	4	6	t13	t12
13	t13	22.88	2	3	0.00015181	4	6	t14	t13
14	t14	20.54	2	3	0.00054217	5	7	t16	t14
15	t15	5.12	1	2	0.00000000	5	7	t16	t15
16	t16	8.88	1	2	0.00000000	5	7		

Figura 12. Hoja de Calculo de Tareas del Modelo de Zonificación

El rango se define como una estación por encima y por debajo de la estación asignada por el método heurístico. Por ejemplo, si la tarea 1 es asignada por el heurístico a la estación 2, el rango considerado es entre la estación uno y la tres. El algoritmo de optimización con restricciones de zona es considerado en esta investigación como un segundo modelo heurístico debido a que las restricciones de zonificación son determinadas basadas en un modelo heurístico. El propósito de las restricciones es el reducir en forma significativa el tiempo computacional requerido para obtener soluciones a problemas grandes.

Recordemos que el objetivo del segundo heurístico es el lograr soluciones cercanas a la solución óptima. A continuación se muestra el modelo matemático

del algoritmo con restricciones de zonificación.

Las variables del modelo fueron definidas en la sección 5.3.1. A continuación se muestran solo aquellas añadidas al modelo:

Li_t =Limite inferior de la tarea t

Ls_t =Limite superior de la tarea t

Minimizar:

$$\left[\sum_{e=Li_t}^{Ls_t} \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P X_{tep} * p * Costo_{Inversion} + \right. \\ \left. + \sum_{e=1}^E Costo_{(Labor + Espacio + Mesa)} * NP_e \right] * C \quad 5.14$$

Según se explicará en la sección de costos, los costos operacionales y de inversión de capital han sido expresados en términos de dólares por unidad de tiempo.

Las restricciones del modelo matemático son:

$$\sum_{e=Li_t}^{Ls_t} \sum_{p=1}^P \chi_{tep} = 1 \quad t = 1, 2, 3, \dots, T. \quad 5.15$$

$$\chi_{te} = \sum_{p=1}^P \chi_{tep} \quad t = 1, 2, \dots, T, \text{ y } e = Li_t, \dots, Ls_t. \quad 5.16$$

$$e_t = \sum_{e=Li_t}^{Ls_t} e \chi_{te} \quad \text{Para } t = 1, 2, 3, \dots, T. \quad 5.17$$

$$e_t \geq e_\tau \quad \text{Para cada tarea } t, \text{ y cada } \tau \text{ en } A_t. \quad 5.18$$

$$L_{ep} = \sum_{t=1}^T (d_t / p) \chi_{tep} \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t \text{ y } p = 1, 2, \dots, P. \quad 5.19$$

$$L_e = \sum_{p=1}^P L_{ep} \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t. \quad 5.20$$

$$L_e \leq C \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t. \quad 5.21$$

$$O_e = C - L_e \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t. \quad 5.22$$

$$M^* \partial_{ep} \geq \sum_{t=1}^T \chi_{tep} \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t \text{ y } p = 1, 2, \dots, P. \quad 5.23$$

$$\sum_{p=1}^P \partial_{ep} \leq 1 \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t. \quad 5.24$$

$$NP_e = \sum_{p=1}^P \partial_{ep} * p \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t. \quad 5.25$$

$$Ye = \sum_{p=1}^P \partial_{ep} \quad \text{Para } e = Li_t, \dots, Ls_t. \quad 5.26$$

La única diferencia entre el modelo matemático del algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones de zonificación es que solo trata de asignar la tarea entre el rango de estaciones determinado, lo que conlleva a una considerable disminución del tiempo computacional y una respuesta cercana a la optima. Las restricciones del modelo son expuestas en la sección 5.3.2.

5.5 Heurísticos vs. Modelo de Optimización

En el desarrollo y validación de los modelos heurísticos y el algoritmo de optimización se utilizaron datos correspondientes a una línea de ensamblaje de

equipos médicos. La línea es altamente manual con equipos especializados y costosos en algunos puntos del proceso. El diagrama de precedencias de las tareas se muestra en la Figura 13.

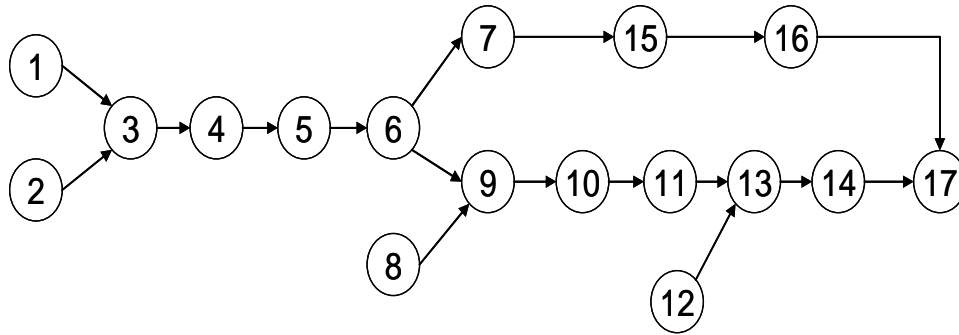


Figura 13. Diagrama de Precedencias del caso Estudio.

Según especificado anteriormente, las tareas y no las estaciones definen el tipo de equipo y maquinaria requerida. La duración de las tareas y el costo de las máquinas y equipos requeridos se presentan en la Tabla 6.

Tarea	Duración (Segundos)	Costos de Maquinaria
t1	62.05	\$6,000
t2	5.09	-
t3	42.01	-
t4	6.64	-
t5	53.84	-
t6	59.61	\$8,000
t7	21.76	-
t8	2.43	-
t9	39.91	-
t10	55.01	-
t11	8.27	-
t12	1.50	-
t13	50.93	\$200
t14	66.91	\$8,000
t15	93.81	\$200
t16	20.22	\$3,500
t17	145.73	\$200

Tabla 6. Datos del Caso de Estudio

5.5.1 Análisis Económico

El objetivo de los modelos es lograr el balanceo de línea que cumple con los requisitos de producción minimizando los costos totales por unidad producida. Los costos de inversión de capital se convirtieron en una serie mensual equivalente. Dicha serie se convirtió en costos por segundo de operación al dividir la serie mensual equivalente entre los segundos de operación de la línea por mes.

El razonamiento detrás de este procedimiento es que las máquinas incurren en costos por segundo, minuto u hora de operación de la planta, estén estas o no activas produciendo unidades. Por lo tanto, mientras menor sea el ciclo de la línea (i.e. mayor razón de producción) y menor sea el número de estaciones requeridas para cumplir con la producción deseada, menores serán los costos totales por unidad producida, y mayor será el retorno de inversión.

5.5.1.1 Datos Requeridos.

- ❖ **Horizonte de Planificación.** El horizonte de planificación depende del tipo de proyecto debido a que la compañía debe definir el tiempo en el cual se debe recuperar la inversión. En este caso se presume que el horizonte de planificación es igual a la vida útil del equipo.
- ❖ **Vida Útil.** Se presume que la vida útil de los equipos en la línea de producción es de 5 años, lo cual es equivalente a 60 periodos mensuales.
- ❖ **Valor de Salvamento.** Se presume que el valor de salvamento o valor residual es de cero al final del horizonte de planificación. Es decir, que el equipo o maquinaria es totalmente depreciado durante el período de 5 años.
- ❖ **MARR.** Mínima tasa de retorno atractiva. De acuerdo con algunas agencias de investigación el MARR va desde un 10% hasta un 60%. Para el caso utilizado en esta investigación se escogió un MARR de 30%. Es

necesario convertir esta tasa anual en una tasa mensual. La tasa efectiva mensual se calcula del siguiente modo:

$$i_e = \left(1 + \frac{r}{m}\right)^n - 1 \quad 5.27$$

donde,

i_e = Tasa efectiva

r = Tasa Nominal por periodo de interés

m = Numero de periodos compuestos en el periodo de interés

n = Numero de periodos en la tasa efectiva

$$i_e = \left(1 + \frac{30\%}{12}\right)^1 - 1 = 2.5\%$$

Tasa efectiva mensual

Los valores seleccionados para el análisis económico son los siguientes:

MARR	2.5%
Vida Útil	60 meses
Valor de Salvamento	\$0

5.5.1.2 Costos de Inversión de Capital.

En la Tabla 6, se listaron los costos de inversión de capital para cada una de las

tareas en el caso. A continuación se presenta el procedimiento seguido para determinar la serie mensual equivalente de las inversiones de capital requeridas para cada una de las tareas en la línea de ensamblaje.

❖ Tarea 1

Los datos necesarios para el análisis económico de la tarea 1 se resumen en la tabla a continuación.

Inversión	\$6000
Tasa Efectiva Mensual	2.5%
Horizonte de Planificación	60 Meses

La Figura 14 representa gráficamente la serie mensual equivalente de los costos de inversión de capital.

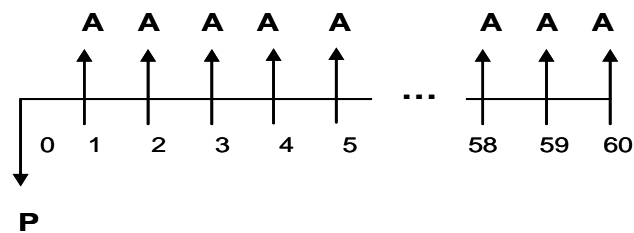


Figura 14. Diagrama general de las Series Uniformes

Para obtener el valor de las series mensuales se utiliza la siguiente ecuación.

$$A = P(A/P, i, n) \quad 5.28$$

donde,

$$(A/P, i, n) = \left[\frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

A= El valor de las series uniformes

P= El valor presente de la inversión

i= La tasa efectiva por periodos

n= Numero de Periodos

Para la tarea 1 se calcula la mensualidad de la siguiente manera.

$$A = P(A/P, 2.5\%, 60)$$

$$A = \$6000 * 0.0324 = \$220.32 \text{ mensuales}$$

Es necesario llevar esta mensualidad a dólares por unidad de tiempo de operación. Se presume que la compañía trabaja 249 días por año, dos turnos de trabajo, con 8 horas por turnos. El procedimiento se describe en los pasos a continuación:

1. Se determina el número de segundos que se trabajan por día. En este caso se llevó a cabo el cómputo en segundos debido a que el tiempo de las tareas está en segundos.

$$8horas / turnos * \frac{3600seg}{hora} * 2turnos / dia = 57600seg / dia$$

2. Se determinan los segundos que se trabajan por mes en la línea de producción del siguiente modo:

$$249dias / año * 57600seg / dia * \frac{1 \text{ año}}{12meses} = 1195200seg / mes$$

3. Se calcula el costo por segundo para la máquina que se utiliza en la tarea 1.

$$\text{Costo } t_1 / segundo = \frac{\text{Costo de Inversion}}{\text{segundos /mes}}$$

$$\text{Costo } t_1 / segundo = \frac{\$220.32 / mes}{1195200 \text{ segundos/mes}} = \$0.00016 / segundos$$

❖ Tarea 6

Costo de inversión =\$8000

A= \$8000 * 0.0324= \$259.20 mensuales

$$\text{Costo } t_6 / segundo = \frac{\$259.20 / mes}{1195200 \text{ segundos/mes}} = \$0.0002169 / segundos$$

❖ Tarea 13

Costo de inversión =\$200

A= \$200 * 0.0324= \$6.48 mensuales

$$\text{Costo } t_{13} / \text{segundo} = \frac{\$6.48 / \text{mes}}{1195200 \text{ segundos/m es}} = \$0.0000054 / \text{segundos}$$

❖ Tarea 14

Costo de inversión =\$8000

A= \$8000 * 0.0324= \$259.20 mensuales

$$\text{Costo } t_{14} / \text{segundo} = \frac{\$259.20 / \text{mes}}{1195200 \text{ segundos/m es}} = \$0.0002169 / \text{segundos}$$

❖ Tarea 15

Costo de inversión =\$200

A= \$200 * 0.0324= \$6.48 mensuales

$$\text{Costo } t_{15} / \text{segundo} = \frac{\$6.48 / \text{mes}}{1195200 \text{ segundos/m es}} = \$0.0000054 / \text{segundos}$$

❖ Tarea 16

Costo de inversión =\$3500

$$A = \$3500 * 0.0324 = \$113.40 \text{ mensuales}$$

$$\text{Costo } t_6 / \text{segundo} = \frac{\$113.40 / \text{mes}}{1195200 \text{ segundos/mes}} = \$0.000095 / \text{segundos}$$

❖ Tarea 17

$$\text{Costo de inversión} = \$200$$

$$A = \$200 * 0.0324 = \$6.48 \text{ mensuales}$$

$$\text{Costo } t_{17} / \text{segundo} = \frac{\$6.48 / \text{mes}}{1195200 \text{ segundos/mes}} = \$0.0000054 / \text{segundos}$$

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los costos de inversión por segundo para cada una de las tareas que requieren máquinas y equipos.

Tarea	Costos de Inversión \$/seg.
t1	0.0001627
t2	-
t3	-
t4	-
t5	-
t6	0.0002169
t7	-
t8	-
t9	-
t10	-
t11	-
t12	-
t13	0.0000054
t14	0.0002169
t15	0.0000054
t16	0.0000949
t17	0.0000054

Tabla 7. Resumen de Costos de Inversión de las Tareas

5.5.1.3 Costos de Espacio y Planta Física.

El costo de espacio se calcula presumiendo que todas las estaciones tienen las mismas dimensiones. Para efectos de este ejemplo determinamos que todas las estaciones tienen 36 pies². Se presume además un costo de \$35 dólares por pie², por concepto de espacio, agua, electricidad, etc.

$$\text{Costo de Espacio} = \frac{\text{Costo de Espacio / mes} \cdot \text{pie}^2 * \text{Dimensiones en pie}^2}{\text{Tiempo trabajado en seg/mes}}$$

$$\text{Costo de Espacio} = \frac{\$35 / \text{mes} \cdot \text{pie}^2 * 36 \text{ pie}^2}{1195200 \text{ seg/mes}} = \$0.001054/\text{seg}$$

5.5.1.4 Costo de Labor.

El costo de labor incluye costo de mano de obra directa, costo de mano de obra indirecta y beneficios marginales. En este caso el costo de mano de obra directa es de \$7.5/hora con beneficios marginales de 40% y costos indirectos de 50% de cada dólar de labor directa. El costo de labor se calcula de la siguiente manera.

$$\text{Costo de Labor} = \text{Costo labor directa} * \% \text{Beneficios Marginales} * \% \text{Labor Indirecta}$$

$$\text{Costo de Labor} = \$7.5/\text{hora} * 1.4 * 1.5 = \$15.75/\text{hora}$$

$$\text{Costo de Labor } \$15.75/\text{hora} * \frac{1\text{hora}}{3600\text{seg}} = \$0.004375/\text{seg}.$$

5.5.1.5 Costo por mesa de Trabajo.

El costo por mesa de trabajo se considera como un costo de inversión asociado con las estaciones de trabajo. Cada mesa tiene un costo aproximado de \$300 dólares. El costo de inversión en las mesas se convierte en una serie mensual equivalente. Este costo se distribuye entre el número de segundos que se opera la línea por mes.

$$\text{Costo de inversión} = \$300$$

$$A = \$300 * 0.0324 = \$9.72 \text{ mensuales}$$

$$\text{Costo Mesa de Trabajo} = \frac{\$9.72 / \text{mes}}{1195200 \text{ segundos/m es}} = \$0.00000813 \text{ 3/segundos}$$

En la Tabla 8 se resumen los costos relacionados con las estaciones de trabajo (i.e. costos de espacio, mesa y labor).

	Costos \$/seg.
Espacio	1.0542E-03
Mesa	8.1325E-06
Labor	4.3750E-03
Total	5.4373E-03

Tabla 8. Resumen de Costos por Estación

5.5.2 Diseño del Experimento

El experimento de esta investigación se diseñó siguiendo los pasos que se muestran en la Figura 15.



Figura 15. Pasos en el diseño del experimento

5.5.2.1 Reconocimiento del problema.

El primer paso en el diseño del experimento es la definición del problema. El problema que se atiende en esta investigación es el de balanceo de línea con el objetivo de minimizar los costos totales de la línea de producción, con un tiempo de ciclo variable y número de estaciones variable. Una descripción abarcadora del problema se presenta en la Sección 4.1.

5.5.2.2 Selección de los Factores y Niveles.

Una investigación previa en la cual se comparó la ejecutoria de métodos heurísticos demostró que las características de la red de precedencias (número de actividades y densidad de precedencias) no tenía un impacto significativo en la ejecutoria de los modelos heurísticos [6]. Sin embargo, quedó demostrado que el tiempo de ciclo tenía un impacto significativo en la ejecutoria de estos. En función de dichos resultados se decidió comparar la ejecutoria de las tres metodologías propuestas bajo tres escenarios de tiempos de ciclo. Por lo tanto, los factores de la experimentación pasaron a ser: (1) tiempo de ciclo a tres niveles, y (2) metodología a tres niveles.

La experimentación se llevó a cabo con 10 redes representando casos reales. Algunos de los casos seleccionados fueron alterados para añadir complejidad de forma tal que retaran mejor la ejecutoria de las metodologías propuestas.

En el proceso de análisis de resultados las redes fueron consideradas como bloques reconociendo a estas como fuentes de variabilidad significativa en los resultados de la experimentación. Nuestro interés era el de poder evaluar el efecto en los resultados debido a los modelos propuestos y los tiempos de ciclo, y no debido a las diferencias entre los casos evaluados.

Los tiempos de ciclo seleccionados para la experimentación fueron en función de la tarea más larga en la línea de producción. Los ciclos seleccionados fueron los siguientes: (1) duración de la tarea más larga, (2) 50% de la duración de la tarea más larga, y (3) 150% la duración de la tarea más larga. Al seleccionar el tiempo de ciclo igual al 50% de la tarea más larga se interesa evaluar la ejecutoria de los modelos propuestos bajo aquellos escenarios en los cuales es requerido el uso de estaciones en paralelo. La selección de un tiempo de ciclo igual a 1.5 veces la tarea más larga permite evaluar escenarios en los cuales no es necesario el uso de estaciones en paralelo.

Los modelos bajo evaluación son tres: (1) el algoritmo de optimización, (2) el algoritmo de optimización con restricciones de zonificación descrito en la sección 5.4.3 y (3) el modelo heurístico descrito en la sección 5.4.1.

5.5.2.3 Selección de la Variable Respuesta.

Los modelos siendo evaluados tienen el objetivo de minimizar el costo total por

unidad producida. La respuesta del modelo es el balanceo de línea que resulta en el menor costo total por unidad producida. Cada red utilizada en este experimento pertenece a una línea de producción totalmente distinta. Por lo tanto, el costo por unidad producida no puede ser utilizado directamente en la comparación entre metodologías. La variable respuesta seleccionada fue el porcentaje de diferencia entre la respuesta de los heurísticos y la respuesta del algoritmo de optimización, reconociendo que la solución óptima la genera solo el modelo de optimización. Mientras mejor sea la calidad de los resultados de los heurísticos, menor será el porcentaje de diferencia.

Por ejemplo, si el algoritmo sin restricciones obtuvo una respuesta de \$12/unidad y el heurístico de \$18/unidad, la diferencia en porcentaje se calcula del siguiente modo:

$$\% \text{ De Diferencia} = \frac{\$18/\text{unidad} - \$12/\text{unidad}}{\$12/\text{unidad}} * 100 = 50\%$$

Los resultados reflejarían que el costo total de la solución obtenida mediante el heurístico es 50% mayor que el costo total de la solución obtenida mediante el algoritmo.

5.5.2.4 Selección del Diseño del Experimento

Se diseñó un experimento con el propósito de evaluar la calidad de los resultados

obtenidos de los modelos heurísticos en comparación con la solución del modelo de optimización. El experimento seleccionado fue un factorial completo 3^2 con bloques completamente aleatorios (randomized complete block - full factorial design). Los dos factores del experimento fueron el modelo utilizado y el tiempo de ciclo, ambos factores a tres niveles. Las redes o casos fueron considerados como bloques.

Según señalado anteriormente, los casos utilizados para la experimentación provienen de proyectos de estudiantes del curso ININ 4009 dictado por la Dra. María Irizarry en la Universidad de Puerto Rico. Los casos escogidos representan líneas de producción donde el número de tareas fluctúa entre 10 y 20. El propósito de utilizar redes relativamente pequeñas era poder obtener soluciones en un tiempo computacional razonable contra los cuales poder comparar los modelos heurísticos. Debido a que investigaciones previas han demostrado que el número de operaciones y densidad de precedencias no tiene efecto significativo en la calidad de las respuestas, estos no fueron factores decisivos en la selección de los casos. En el Apéndice C se muestran los datos de los casos utilizados en el experimento.

En conclusión se utilizaron diez redes con cada uno de los tres modelos bajo evaluación, con tres tiempos de ciclo diferentes para cada una de las redes. Se llevaron a cabo un total de 90 corridas.

5.5.2.5 Ejecución del Experimento

Los tres modelos fueron corridos bajo las mismas condiciones con el propósito de controlar fuentes de variabilidad. Con cada uno de los modelos bajo evaluación el usuario tiene la opción de establecer un rango de posibles valores para el tiempo de ciclo. Sin embargo, para efectos de experimentación se igualaron el tiempo de ciclo máximo y el tiempo de ciclo mínimo. Esto con el propósito de simplificar el proceso de evaluación.

En la hoja de cálculo de Excel los tres modelos le brindan al usuario la opción de establecer un número mínimo y máximo de estaciones en paralelo para cada una de las tareas. El añadir estaciones en paralelo tiene unos costos asociados. Es importante recalcar en el hecho de que uno de los beneficios de esta investigación es que los costos de inversión de capital en maquinaria se relacionan con las tareas y no las estaciones. Hay que reconocer que, contrario a muchas investigaciones previas: (1) los requisitos de maquinaria están asociados a las características de las tareas, y (2) no se conoce de antemano en cuál estación o posición en serie va a ser asignada la tarea. Por lo tanto, un modelo que adjudica costos de inversión de capital a tareas y no a estaciones de trabajo es una mejor representación de la realidad en las industrias.

El número máximo y mínimo de estaciones en paralelo se determina para cada una de las tareas en la línea. Para propósitos de experimentación el número

máximo permisible para cada tarea se seleccionó como el número mínimo requerido más uno. El número mínimo requerido se calcula en función de la duración de la tarea y el tiempo de ciclo deseado del siguiente modo:

$$\text{Número Mínimo} = \left[\frac{\text{Duración de la Tarea}}{\text{Tiempo de Ciclo}} \right]^+$$

Donde $[]^+$ representa el entero mayor.

Además de definir el número mínimo y máximo de estaciones en paralelo, es necesario definir el número máximo de estaciones en serie. El número mínimo de estaciones en serie, presumiendo inicialmente que no se utilizan paralelas, se estima utilizando la ecuación 1.4. Por ejemplo, si la suma de todas las tareas de la línea de producción es de 123 seg/unidad con un tiempo de ciclo deseado de 45 seg/unidad, el número mínimo de estaciones en serie es de:

$$\text{No. Mínimo} = \frac{123 \text{ seg / unidad}}{45 \text{ seg / unidad}} = 2.73$$

El número máximo de estaciones en serie se define como el número mínimo requerido más dos. En este caso sería de 4.73 por lo cual se redondea a 5.

5.5.2.6 Análisis estadístico de los Resultados de la Experimentación

El análisis de los resultados de la experimentación se llevó a cabo con la ayuda del programa de análisis estadístico Minitab. Para el análisis se utilizó la opción de General Linear Model, la cual facilita la generación del modelo necesario

para representar el “Randomized Complete Block – Full Factorial Design”. Los resultados del análisis se presentan en la sección 5.5.3.

5.5.3 Análisis Estadístico

Una vez diseñado el experimento se evaluaron las 90 condiciones experimentales de interés, resultado de combinar cada una de las tres metodologías con cada uno de los tres tiempos de ciclo. Para cada una de las 90 condiciones experimentales se capturaron dos respuestas de interés: (1) costo total por unidad, y (2) tiempo de computación.

Los resultados obtenidos para el costo total por unidad se resumen en la Tabla 9. La variable C representa el tiempo de ciclo y la variable M el tipo de modelo. En todos los casos C1 representa el 50% de la tarea más larga, C2 representa la tarea más larga, y C3 representa el 150% de la tarea más larga. Además, M1 representa al algoritmo de optimización, M2 el algoritmo de optimización con restricciones, y M3 el modelo heurístico. La B representa a los bloques, los cuales van del 1 al 10 representando cada uno de los casos seleccionados.

	C1M1	C1M2	C1M3	C2M1	C2M2	C2M3	C3M1	C3M2	C3M3
B1	4.49	4.52	4.86	4.37	4.37	4.96	4.75	4.75	4.75
B2	1.02	1.11	1.11	0.93	0.93	1.05	0.92	0.92	1.11
B3	6.47	6.47	6.48	6.07	6.07	6.17	6.56	6.56	6.93
B4	1.5	1.6	1.6	1.44	1.45	1.79	1.45	1.48	1.64
B5	7.23	7.23	7.29	7.07	7.07	8.24	7.07	7.07	8.27
B6	3.69	3.69	4.12	4.06	4.06	4.39	3.66	3.66	3.89
B7	2.39	2.55	2.55	2.34	2.46	2.58	2.3	2.3	2.56
B8	0.63	0.63	0.73	0.58	0.58	0.63	0.57	0.57	0.59
B9	1.7	1.7	1.79	1.66	1.66	1.86	1.58	1.63	2.01
B10	2.8	2.8	2.8	2.64	2.64	2.81	2.61	2.61	2.73

Tabla 9. Resultados del experimento referente a Costo Totales / unidad

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el porcentaje de diferencia observado entre el resultado del algoritmo y los modelos heurísticos. Se evaluaron tres diferencias categorizadas como A, B, y C representando lo siguiente:

A = Porcentaje de diferencia entre el algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones.

B = Porcentaje de diferencia entre el algoritmo de optimización y el modelo heurístico.

C = Porcentaje de diferencia entre el algoritmo con restricciones y el modelo heurístico.

En la Tabla 10 se resumen los porcentajes de diferencia entre los modelos para cada uno de los bloques o casos estudiados.

	AC1	BC1	CC1	AC2	BC2	CC2	AC3	BC3	CC3
B1	0.006682	0.082405	0.075221	0	0.135011	0.135011	0	0	0
B2	0.088235	0.088235	0	0	0.129032	0.129032	0	0.206522	0.206522
B3	0	0.001546	0.001546	0	0.016474	0.016474	0	0.056402	0.056402
B4	0.066667	0.066667	0	0.006944	0.243056	0.234483	0.02069	0.131034	0.108108
B5	0	0.008299	0.008299	0	0.165488	0.165488	0	0.169731	0.169731
B6	0	0.116531	0.116531	0	0.081281	0.081281	0	0.062842	0.062842
B7	0.066946	0.066946	0	0.051282	0.102564	0.04878	0	0.113043	0.113043
B8	0	0.15873	0.15873	0	0.086207	0.086207	0	0.035088	0.035088
B9	0	0.052941	0.052941	0	0.120482	0.120482	0.031646	0.272152	0.233129
B10	0	0	0	0	0.064394	0.064394	0	0.045977	0.045977
PROMEDIO	2.3	6.4	4.1	0.6	11.4	10.8	0.5	10.9	10.3

Tabla 10. Diferencias entre de las combinaciones de las Metodologías

Una vez recolectados los datos de los experimentos, se diseña una tabla en Minitab para realizar el análisis de varianza. El Apéndice D contiene la tabla de datos utilizada en minitab. En la Figura 16 se presenta el reporte del análisis de varianza arrojado por Minitab, donde el tipo de diferencia resultó significativo, mientras que el tiempo de ciclo es marginal y la interacción entre factores resultó ser no significativa.

General Linear Model: Diferencia versus Tipo de Dife, Tiempo de Ci, ...

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de Diferencia	fixed	3	A, B, C
Tiempo de Ciclo	fixed	3	C1, C2, C3
Bloques	fixed	10	B1, B10, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9

Analysis of Variance for Diferencia, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Tipo de Diferencia	2	0.126198	0.126198	0.063099	23.58
Tiempo de Ciclo	2	0.020073	0.020073	0.010037	3.75
Tipo de Diferencia*Tiempo de Ciclo	4	0.024861	0.024861	0.006215	2.32
Bloques	9	0.067104	0.067104	0.007456	2.79
Error	72	0.192631	0.192631	0.002675	
Total	89	0.430868			

Source	P
Tipo de Diferencia	0.000
Tiempo de Ciclo	0.028
Tipo de Diferencia*Tiempo de Ciclo	0.065
Bloques	0.007
Error	
Total	

Figura 16. Reporte de Análisis Estadístico de Minitab

En las Figura 17 - 19 se presentan el histograma de los residuos, los residuos en la escala de probabilidad normal, y los resultados de la prueba de igualdad de varianza para los residuos, respectivamente. Los resultados demuestran que los residuos se comportan de acuerdo a la distribución normal con una media de cero y varianza constante.

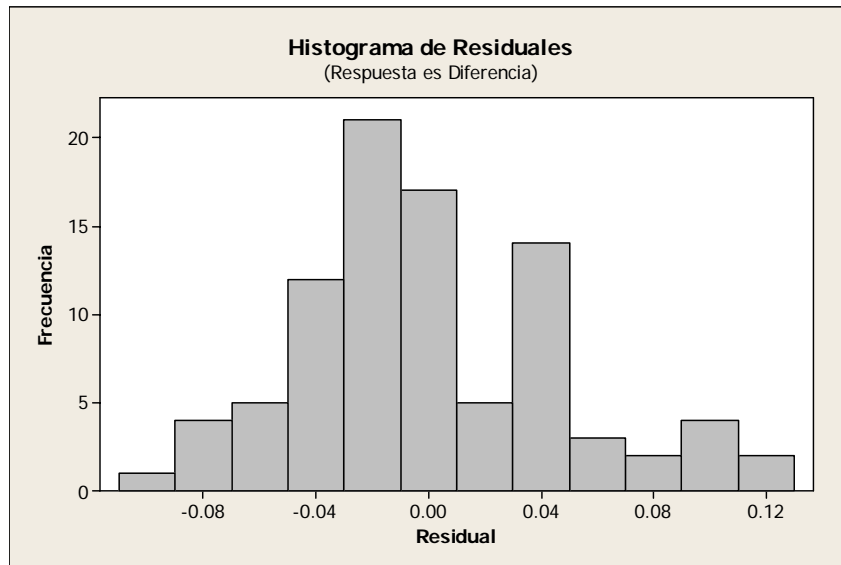


Figura 17. Histograma de los Residuos

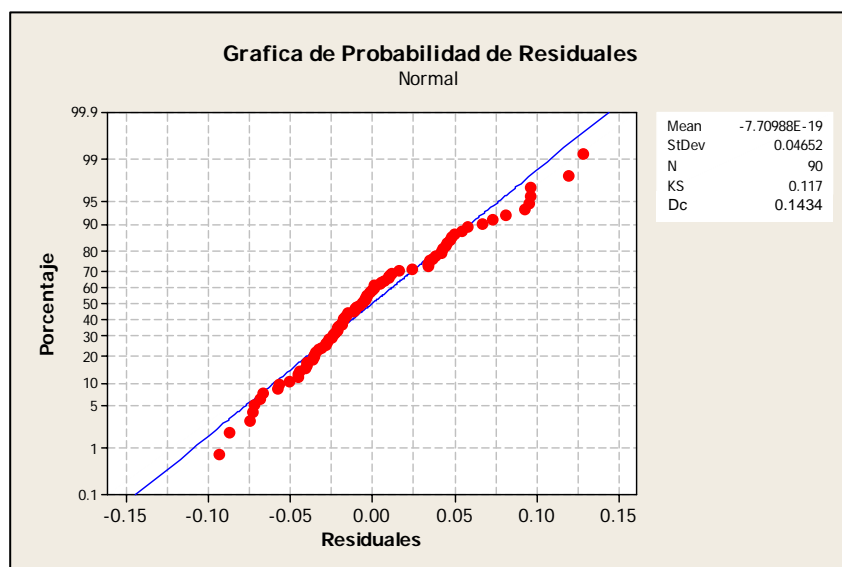


Figura 18. Grafica de Probabilidad Normal de los Residuales

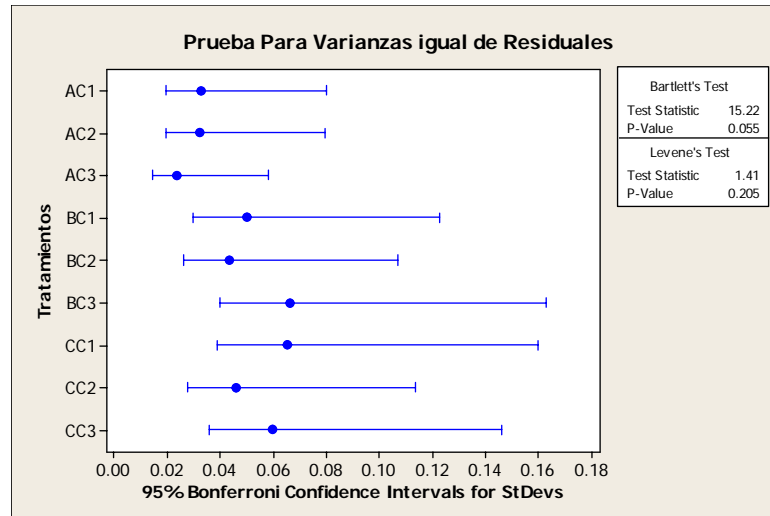


Figura 19. Prueba de igualdad de varianza para residuos

En la Figura 20 se presenta una gráfica de efectos para la respuesta de diferencia entre modelos. En la gráfica para tipo de diferencia se puede observar que la diferencia menor ocurrió entre el algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones (A). La diferencia entre la solución del heurístico y el algoritmo de optimización (B) parece ser similar a la diferencia entre la solución del heurístico y el algoritmo con restricciones (C). Del mismo modo, al analizar la gráfica para el tiempo de ciclo, se puede observar que las diferencias menores entre los resultados de los modelos ocurrieron para el tiempo de ciclo C1 ($0.5 \times$ duración de la tarea más larga). En el tiempo de ciclo C2 (ciclo igual a la duración de la tarea más larga) y el ciclo C3 ($1.5 \times$ duración de la tarea mas larga) se observa que las diferencias están muy cercanas entre si.

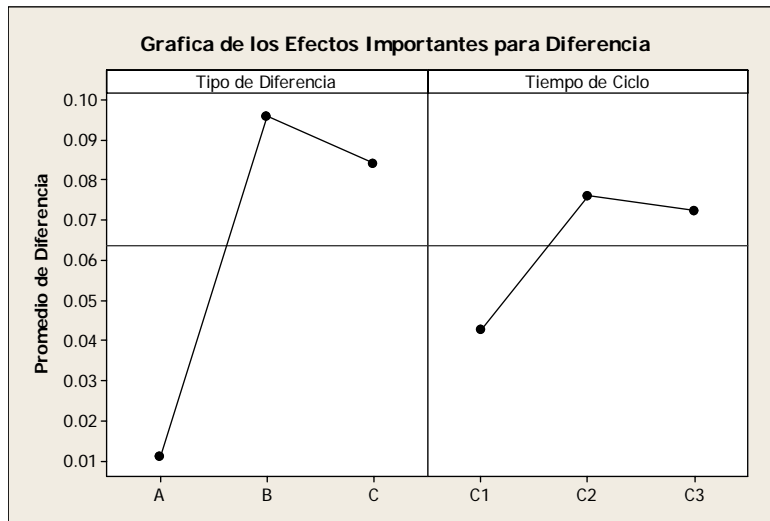


Figura 20. Grafica de Efectos para las Diferencias

Dado que el análisis de varianza demostró diferencias significativas entre el comportamiento de los modelos lo cual se pudo observar a su vez en la Figura 20, se procedió a llevar a cabo una prueba Tukey para identificar diferencias significativas entre los niveles del tipo de modelo y diferencias en el tiempo de ciclo aun cuando los resultados fueron marginales. Los resultados se presentan en las Figura 21 y la Figura 22.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Diferencia				
All Pairwise Comparisons among Levels of Tipo de Diferencia				
Tipo de Diferencia = A subtracted from:				
Tipo de Diferencia	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
B	0.08467	0.01336	6.340	0.0000
C	0.07289	0.01336	5.458	0.0000
Tipo de Diferencia = B subtracted from:				
Tipo de Diferencia	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
C	-0.01178	0.01336	-0.8819	0.6534

Figura 21. Prueba Tukey para Diferencia entre Diferencias A, B, y C

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Diferencia				
All Pairwise Comparisons among Levels of Tiempo de Ciclo				
Tiempo de Ciclo = C1 subtracted from:				
Tiempo de Ciclo	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
C2	0.03333	0.01336	2.495	0.0391
C3	0.02973	0.01336	2.226	0.0736
Tiempo de Ciclo = C2 subtracted from:				
Tiempo de Ciclo	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
C3	-0.003596	0.01336	-0.2693	0.9608

Figura 22. Prueba Tukey para Diferencias entre Tiempos de Ciclos

En la Figura 21 se puede observar que los resultados de A son significativamente diferentes a los resultados de B y C. Sin embargo, los resultados de C no difieren significativamente de los resultados de B. Lo que esto significa es que el

porcentaje de diferencia entre los resultados del algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones (A) se comporta muy diferente a los demás porcentajes de diferencia. Esta diferencia asume un valor promedio de 2.3% en C1 y 0.6% en C2 y 0.5% en C3. El modelo heurístico arroja diferencias de 6.4%, 11.4%, y 10.9%, con respecto al algoritmo de optimización, para C1, C2 y C3, respectivamente.

En la Figura 22 se puede observar que el comportamiento de los porcentajes de diferencia entre modelos no es estadísticamente diferente para el ciclo C1 en comparación con el ciclo C2 y C3 e igualmente no existe diferencia significativa en comportamiento entre los ciclos C2 y C3.

Amerita en este punto del análisis de resultados recordar que las restricciones de zona utilizadas como insumo al algoritmo de optimización con restricciones provienen de los resultados obtenidos del modelo heurístico. Por lo tanto, una conclusión en este punto del proceso es que, aún cuando los resultados del heurístico no son favorables en comparación con el algoritmo de optimización, el verdadero valor del modelo heurístico está en proveer los insumos necesarios para lograr resultados cercanos al óptimo (mediante el algoritmo con restricciones) en un tiempo computacional razonable.

Luego de haber demostrado que el punto A (diferencias entre el algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones) es significativamente diferente a

los puntos B y C, se procedió a llevar a cabo un análisis de varianza para evaluar la igualdad entre los resultados del algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la Figura 23. Estos demuestran igualdad de resultados para cualquier tiempo de ciclo. Por lo tanto, el balanceo de línea y el estimado de costo total por unidad obtenido mediante el algoritmo con restricciones son confiables y estadísticamente iguales a los obtenidos con el modelo de optimización.

General Linear Model: Diferencia (Rest-Opt) versus Tiempo de Ciclo, Bloques						
Factor	Type	Levels	Values			
Tiempo de Ciclo	fixed	3	C1, C2, C3			
Bloques	fixed	10	B1, B10, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9			
Analysis of Variance for Diferencia, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Tiempo de Ciclo	2	0.0020027	0.0020027	0.0010014	2.17	0.143
Bloques	9	0.0067346	0.0067346	0.0007483	1.62	0.182
Error	18	0.0082938	0.0082938	0.0004608		
Total	29	0.0170311				

Figura 23. Análisis de varianza para igualdad entre modelo de optimización y algoritmo con restricciones.

En la Figura 24 se puede observar que la diferencia entre los resultados del algoritmo de optimización y el algoritmo con restricciones (A) es menor en C2 y C3 con respecto a C1. Esto tiende a señalar que la capacidad del algoritmo con restricciones para generar soluciones cercanas a la óptima se ve afectada cuando el tiempo de ciclo es pequeño con respecto a la duración de las tareas, específicamente a la duración de la tarea más larga. Por el contrario, el porcentaje

de diferencia menor del heurístico, con respecto al algoritmo de optimización, se logró con el menor tiempo de ciclo. Cabe recordar que el heurístico posee instrucciones o reglas específicas para balancear las cargas de las estaciones de trabajo con el uso de paralelas. Por esta razón es más eficiente con tiempos de ciclo pequeños bajo los cuales se requiere el uso de estaciones en paralelo.

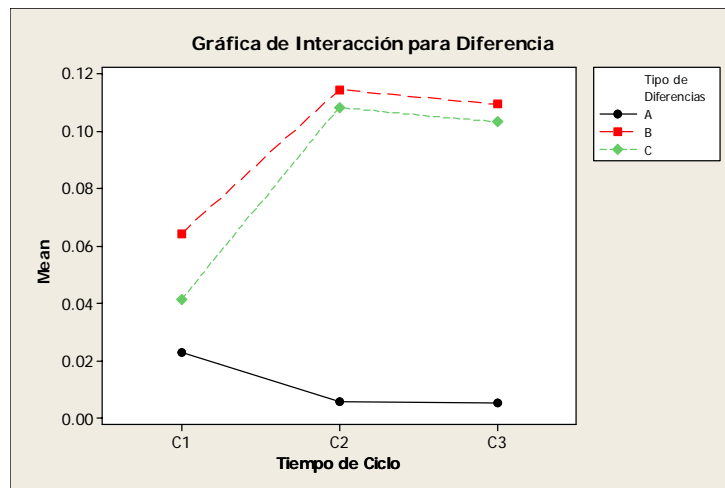


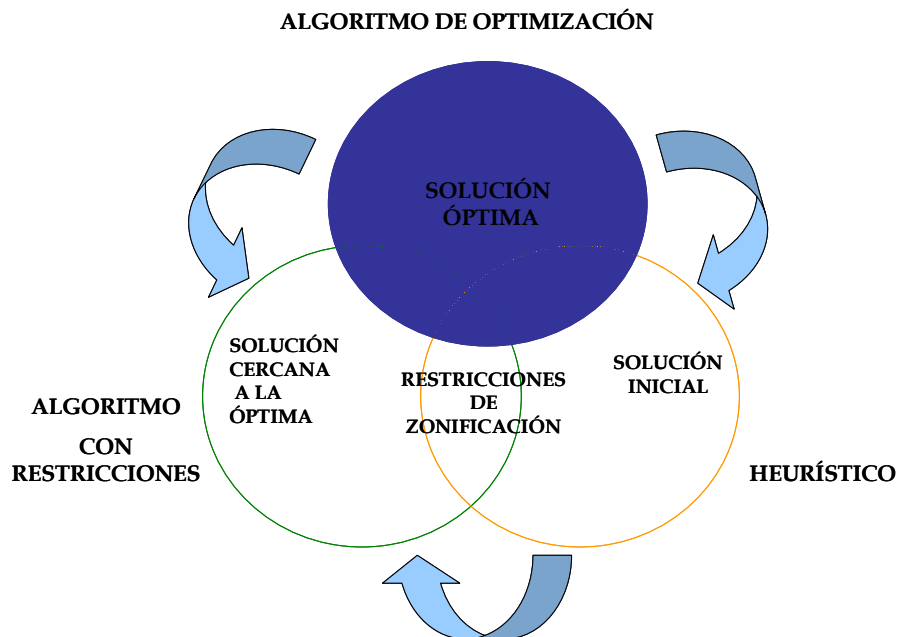
Figura 24 Grafica de Interacciones Para las Diferencias

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El propósito original de esta investigación era el desarrollo un modelo de optimización y un modelo heurístico para obtener soluciones al problema de balanceo de línea donde el interés era minimizar los costos totales por unidad producida, con estaciones en paralelo y ciclo variable. El resultado final de la investigación fue el desarrollo de una metodología la cual integra tres modelos: (1) algoritmo de optimización en programación lineal mixta, (2) algoritmo de optimización con restricciones, y (3) modelo heurístico. La interacción entre los modelos que integran la metodología se presenta en la Figura 23.



El análisis estadístico de resultados demostró que el algoritmo con restricciones provee soluciones cercanas a la solución óptima. Las soluciones provistas por el heurístico no comparan favorablemente con las soluciones obtenidas mediante el modelo de optimización. Sin embargo, calidad de la respuesta y el tiempo computacional del algoritmo con restricciones depende de la solución inicial del modelo heurístico. Por lo tanto, se concluyó que el enfoque más apropiado era el de combinar los modelos en una sola metodología. El objetivo de cada modelo dentro de la metodología es el siguiente:

- El algoritmo de optimización se puede utilizar para resolver problemas para los cuales el tiempo computacional sea razonable. Se utiliza además para vigilar la calidad de las soluciones provistas por el algoritmo con restricciones y el modelo heurístico.
- En aquellos casos donde se interesa obtener balanceos para problemas grandes, se utiliza el modelo heurístico para obtener una solución inicial. De dicha solución se generan las restricciones de zonificación para el modelo con restricciones.

En conclusión se lograron los objetivos de esta investigación.

6.2 Recomendaciones

De esta investigación se recomiendan dos actividades para investigaciones futuras:

- a. El desarrollo de la lógica como parte del método heurístico que sea mas efectivo manejando tareas comparables o mas cortas que el tiempo de ciclo requerido.
- b. El uso de herramientas de optimización no tradicionales para considerar la función objetivo del método matemático que incluya al tiempo de ciclo (C) como una variable (C_e). Esto implica que la función objetivo considera el producto de variable decisionales, lo cual viola las presunciones de los modelos de programación lineal.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Amen, M., An exact method for cost-oriented assembly line balancing. International Journal of Production Economics. Vol 64. P. 187-195. 2000.
- [2] Amen, M., Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. International Journal of Production Economics. Vol 69. P. 255-264. 2001.
- [3] Askin R., Zhou, M., A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. International Journal of Production Research. Vol 35 (11). P. 3095-3105. 1997.
- [4] Bard, J. F., Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. International Journal of Production Research. Vol 27. P. 1005-1018. 1989.
- [5] Becker, C., Scholl, A., A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. Jenaer Schriften Zur Wirtschaftswissenschaft 21/03, FSU Jena. 2003.
- [6] Talbot, F. B., Patterson, J.H., Gehrlein W.V., A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. Management Science. Vol 32 (4). P. 430-453. 1986,
- [7] Bukchin, J., Rubinovitz, J., A weighted approach for assembly line desing

with station paralleling and equipment selection. IIE Transactions. Vol 35. P. 01-13. 2002.

[8] Buxey, G. M., Assembly line balancing with multiple stations. Management Science. Vol 20. P. 1010-1021. 1974.

[9] Carnahan, B., Norman, B., y Redfern, M., Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. IIE Transactions. Vol 33. P. 875-887. 2001.

[10] Goldberg, D. E., Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison Wesley, Reading.

[11] Hagberg, M., Silverstein, B., Well, R., Smith, M. J., Hendrick, H., Carayon, P. y Perusse, M., Work related Musculoskeletal Disorders. Libro de Referencia para la prevención, Taylor and Francis. 1995

[12] Karabati, S., Sayin, S., Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. European Journal of Operational Research. Vol 149. P. 417-429. 2003.

[13] Klein, R., Scholl, A., Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - A branch and bound procedure. European Journal Operational Research. Vol 91. P. 367-385. 1996.

- [14] Malakooti, B., A multiple criteria decision making approach for the assembly line balancing problem. International Journal of Production Research. Vol 29. P. 1979-2001. 1991.
- [15] Malakooti, B., Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization. International Journal of Production Research. Vol 32. P. 2159-2178. 1994.
- [16] Malakooti, B., Kumar, A., An expert system for solving multi-objective assembly line balancing problems. International Journal of Production Research. Vol 34. P. 2533-2552. 1996.
- [17] Merengo, C., Nava, F., and Pozzettis, A., Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. International Journal of Production Research. Vol 37 (12). P. 2835-2860. 1999.
- [18] McMullen, P., y Tarasewich, P., Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. IIE Transactions. Vol 35. P. 605-617. 2003.
- [19] Miralles, C., Capó, J., García J.P., Andrés, C., Equilibrado de líneas de montaje considerando variables los tiempos de operación y las habilidades de los operarios. Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. 2003.

- [20] Monks, J., Operations Management, McGraw-Hill, 1987
- [21] León, A., Manual Práctico de Investigación de Operaciones. Ediciones Uninorte, 1998.
- [22] Rosenberg, O., Ziegler, H., A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. Zeitschrift Fur Operations Research. Vol 36. P. 477- 495. 1992.
- [23] Sawik, T., Balancing and scheduling of surface mount technology lines. International Journal of Production Research. Vol 40 (9). P. 1973-1991. 2002.
- [24] Scholl, A., Becker, C., State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. Jenaer Schriften Zur Wirtschaftswissenschaft 20/03, FSU Jena. 2003a.
- [25] Scholl, A., Becker, C., A note on “An exact method for cost-oriented assembly line balancing. Jenaer Schriften Zur Wirtschaftswissenschaft 22/03, FSU Jena. 2003b.
- [26] Scholl, A., Klein R., ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. International Journal of Production Research. Vol 37 (4). P. 721-736. 1998.
- [27] Scholl, A., Voß., Simple assembly line balancing- Heuristic approaches.

- Journal of Heuristic. Vol 2. P. 217-244. 1996.
- [28] Pastor, R., Andres, C., Duran, A., y Perez, M., v. Journal of the Operational Research Society. Vol 53. P. 1317-1323.2002
- [29] Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling. International Journal of Production Research. Vol 13. P. 183-196. 1975.
- [30] Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with parallel of stations. International Journal of Production Research. Vol 19. P. 565-576. 1981.
- [31] Vilarinho, P., Simaria, S., A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. International Journal of Production Research. Vol 40 (6). P. 1405-1420. 2002.

APÉNDICE A. Código del Heurístico #1

Dim TotalTareas, TotalEstaciones As Integer

Dim MinimoParalelaT() As Integer

Dim MaximoParalelaT() As Integer

Dim MinimoParalelaEst(), NP As Integer

Dim MaximoParalelaEst() As Integer

Dim MAX(), EstCT_YN As Variant

Dim cTareasEnEstacion() As New Collection

Dim cPrecedentes() As New Collection

Dim cIdx As New Collection

Dim CargadeEstacion() As Double

Dim CostoPorParalela() As Double

Dim MaxTiempoCiclo, LaborCost, TiempoCicloEst As Double

Dim Duracion() As Double

Dim EstacionAsignadaA() As Long

Dim Tareas() As String

Dim NumeroDeParalelasEnE() As Integer

Dim NumTareasEnEstacion() As Long

Dim TotalLackofbalance, CostoLB As Double

Const FuncionObjetivaMejor = 1

Const FuncionObjetivaPeor = 0

Const TareaAsignada = 0

Const NoAsignada = 1

Const NoTodosPrecedentesAsig = 0


```

maxmin = 0

For Each s In cTareasEnEstacion(e)
    If MinimoParalelaT(s) > maxmin Then
        maxmin = MinimoParalelaT(s)
    End If
Next

If MinimoParalelaT(t) > maxmin Then
    maxmin = MinimoParalelaT(t)
End If

If NumeroDeParalelasEnE(e) > maxmin Then
    maxmin = NumeroDeParalelasEnE(e)
End If

'-----

minmax = 1000000

For Each s In cTareasEnEstacion(e)
    If MaximoParalelaT(s) < minmax Then
        minmax = MaximoParalelaT(s)
    End If
Next

If MaximoParalelaT(t) < minmax Then
    minmax = MaximoParalelaT(t)
End If

'-----

CheckCapacidad = NotieneCapacidad

For NP = maxmin To minmax
    If ((MaxTiempoCiclo * (NP + 1)) - CargadeEstacion(e)) >= Duracion(t) Then

```



```

    MaximaCargadeEstaciones = TiempoCicloEst

    Exit Function

End If

lim = e

ElseIf aod = "d" Then

    If EstCT_YN = "y" Then

        MaximaCargadeEstaciones = TiempoCicloEst

        Exit Function

    End If

    lim = e - 1

ElseIf aod = "r" Then

    lim = TotalEstaciones

Else

    MsgBox "problemas en max carga est"

End If

For s = 1 To lim

    If MaximaCargadeEstaciones < (CargadeEstacion(s) / (NumeroDeParalelasEnE(s) + 1)) Then

        MaximaCargadeEstaciones = (CargadeEstacion(s) / (NumeroDeParalelasEnE(s) + 1))

    End If

Next

If aod = "d" Then

    If MaximaCargadeEstaciones < ((CargadeEstacion(e) + Duracion(t)) / (NumeroDeParalelasEnE(e) + 1)) Then

        MaximaCargadeEstaciones = ((CargadeEstacion(e) + Duracion(t)) / (NumeroDeParalelasEnE(e) + 1))

    End If

```



```

Do Until Cells(TotalTareas + 1, 4) = ""

    ReDim Preserve Tareas(TotalTareas)

    ReDim Preserve MaximoParalelaT(TotalTareas)

    ReDim Preserve MAX(TotalTareas)

    ReDim Preserve MinimoParalelaT(TotalTareas)

    ReDim Preserve Duracion(TotalTareas)

    ReDim Preserve CostoPorParalela(TotalTareas)

    Tareas(TotalTareas) = Cells(TotalTareas + 1, 4)

    cIdx.Add Item:=TotalTareas, key:=Tareas(TotalTareas)

    MAX(TotalTareas) = Cells(TotalTareas + 1, 7)

    If IsNumeric(MAX(TotalTareas)) = False Then

        MaximoParalelaT(TotalTareas) = 1000

    Else

        MaximoParalelaT(TotalTareas) = CInt(MAX(TotalTareas))

    End If

    MinimoParalelaT(TotalTareas) = Cells(TotalTareas + 1, 6)

    Duracion(TotalTareas) = Cells(TotalTareas + 1, 5)

    CostoPorParalela(TotalTareas) = Cells(TotalTareas + 1, 10)

    TotalTareas = TotalTareas + 1

Loop

TotalTareas = TotalTareas - 1


ReDim cPrecedentes(TotalTareas + 1)

ReDim cTareasEnEstacion(TotalTareas + 1)


Row = 2

```



```

If NumTareasEnEstacion(e) > MaxNumTareasEnEstacion Then

    MaxNumTareasEnEstacion = NumTareasEnEstacion(e)

End If

Next

For e = 1 To TotalEstaciones

    If CargadeEstacion(e) > 0 Then

        Cells(e + 1, MaxNumTareasEnEstacion + 2) = FormatNumber(CargadeEstacion(e), 2)

        Cells(e + 1, MaxNumTareasEnEstacion + 3) = NumeroDeParalelasEnE(e) + 1

        CargaporParalela = CargadeEstacion(e) / (NumeroDeParalelasEnE(e) + 1)

        Cells(e + 1, MaxNumTareasEnEstacion + 4) = FormatNumber(CargaporParalela, 2)

        Cells(e + 1, MaxNumTareasEnEstacion + 5) = FormatNumber(MaximaCargadeEstaciones(t,
e, aod) - CargaporParalela, 2)

        TotalLackofbalance = TotalLackofbalance + (MaximaCargadeEstaciones(t, e, aod) -
CargaporParalela)

        Cells(1, 1) = "Estacion"

        Cells(1, 2) = "Tareas"

        Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 2) = "Carga por Estacion"

        Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 3) = "Numero de Paralelas"

        Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 4) = "Carga por Paralela"

        Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 5) = "Falta de Balanceo"

        Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 6) = "Falta de Balanceo Total"

        Cells(3, MaxNumTareasEnEstacion + 6) = "Funcion Objetiva Final"

        'Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 2) = "Carga por " & Chr(10) & "Estacion"

        'Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 3) = "Numero de " & Chr(10) & "Paralelas"

        'Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 4) = "Carga por " & Chr(10) & "Paralela"

        'Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 5) = "Falta de " & Chr(10) & "Balanceo"

        'Cells(1, MaxNumTareasEnEstacion + 6) = "Falta de " & Chr(10) & "Balanceo" _

```

```

        '& Chr(10) & "Total"
    End If
Next
Cells(2, MaxNumTareasEnEstacion + 6) = FormatNumber(TotalLackofbalance, 2)
Cells(4, MaxNumTareasEnEstacion + 6) = FormatNumber(FuncionObjetivaFinal, 2)

Rows("1:1").Select
Selection.Font.Bold = True
Cells.Select
With Selection
    .HorizontalAlignment = xlCenter
End With
Selection.Columns.AutoFit
End Sub

```

APÉNDICE B. Generación del Archivo lp

MIN: $1.26867469879518E-02 * X_{t1_e01_1} + 2.53734939759036E-02 * X_{t1_e01_2} +$
 $+ 0 * X_{t2_e01_1} + 0 * X_{t2_e01_2} + 0 * X_{t3_e01_1} + 0 * X_{t3_e01_2} + 0 * X_{t4_e01_1} +$
 $+ 0 * X_{t4_e01_2} + 0 * X_{t5_e01_1} + 0 * X_{t5_e01_2} + 1.69156626506024E-02 * X_{t6_e01_1} +$
 $+ 3.38313253012048E-02 * X_{t6_e01_2} + 0 * X_{t7_e01_1} + 0 * X_{t7_e01_2} + 0 * X_{t8_e01_1} +$
 $+ 0 * X_{t8_e01_2} + 0 * X_{t9_e01_1} + 0 * X_{t9_e01_2} + 0 * X_{t12_e01_1} + 0 * X_{t12_e01_2}$

costo por paralela de estacion 1

$+ 1.26867469879518E-02 * X_{t1_e02_1} + 2.53734939759036E-02 * X_{t1_e02_2} +$
 $+ 0 * X_{t2_e02_1} + 0 * X_{t2_e02_2} + 0 * X_{t3_e02_1} + 0 * X_{t3_e02_2} + 0 * X_{t4_e02_1} + 0 * X_{t4_e02_2} +$
 $+ 0 * X_{t5_e02_1} + 0 * X_{t5_e02_2} + 1.69156626506024E-02 * X_{t6_e02_1} +$
 $+ 3.38313253012048E-02 * X_{t6_e02_2} + 0 * X_{t7_e02_1} + 0 * X_{t7_e02_2} + 0 * X_{t8_e02_1} +$
 $+ 0 * X_{t8_e02_2} + 0 * X_{t9_e02_1} + 0 * X_{t9_e02_2} + 0 * X_{t10_e02_1} + 0 * X_{t10_e02_2} +$
 $+ 0 * X_{t11_e02_1} + 0 * X_{t11_e02_2} + 0 * X_{t12_e02_1} + 0 * X_{t12_e02_2} +$
 $+ 8.4578313253012E-04 * X_{t15_e02_2} + 1.26867469879518E-03 * X_{t15_e02_3}$

costo por paralela de estacion 2

$+ 1.26867469879518E-02 * X_{t1_e03_1} + 2.53734939759036E-02 * X_{t1_e03_2} +$
 $+ 0 * X_{t2_e03_1} + 0 * X_{t2_e03_2} + 0 * X_{t3_e03_1} + 0 * X_{t3_e03_2} + 0 * X_{t4_e03_1} + 0 * X_{t4_e03_2} +$
 $+ 0 * X_{t5_e03_1} + 0 * X_{t5_e03_2} + 1.69156626506024E-02 * X_{t6_e03_1} +$
 $+ 3.38313253012048E-02 * X_{t6_e03_2} + 0 * X_{t7_e03_1} + 0 * X_{t7_e03_2} + 0 * X_{t8_e03_1} +$
 $+ 0 * X_{t8_e03_2} + 0 * X_{t9_e03_1} + 0 * X_{t9_e03_2} + 0 * X_{t10_e03_1} + 0 * X_{t10_e03_2} + 0 * X_{t11_e03_1} +$
 $+ 0 * X_{t11_e03_2} + 0 * X_{t12_e03_1} + 0 * X_{t12_e03_2} + 4.2289156626506E-04 * X_{t13_e03_1} +$
 $+ 8.4578313253012E-04 * X_{t13_e03_2} + 1.69156626506024E-02 * X_{t14_e03_1} +$
 $+ 3.38313253012048E-02 * X_{t14_e03_2} + 8.4578313253012E-04 * X_{t15_e03_2} +$
 $+ 1.26867469879518E-03 * X_{t15_e03_3} + 7.40060240963855E-03 * X_{t16_e03_1} +$
 $+ 1.48012048192771E-02 * X_{t16_e03_2} + 8.4578313253012E-04 * X_{t17_e03_2} +$
 $+ 1.26867469879518E-03 * X_{t17_e03_3}$

costo por paralela de estacion 3

$+ 1.26867469879518E-02 * X_{t1_e04_1} + 2.53734939759036E-02 * X_{t1_e04_2} +$
 $+ 0 * X_{t2_e04_1} + 0 * X_{t2_e04_2} + 0 * X_{t3_e04_1} + 0 * X_{t3_e04_2} + 0 * X_{t4_e04_1} +$
 $+ 0 * X_{t4_e04_2} + 0 * X_{t5_e04_1} + 0 * X_{t5_e04_2} + 1.69156626506024E-02 * X_{t6_e04_1} +$
 $+ 3.38313253012048E-02 * X_{t6_e04_2} + 0 * X_{t7_e04_1} + 0 * X_{t7_e04_2} + 0 * X_{t8_e04_1} +$
 $+ 0 * X_{t8_e04_2} + 0 * X_{t9_e04_1} + 0 * X_{t9_e04_2} + 0 * X_{t10_e04_1} + 0 * X_{t10_e04_2} +$
 $+ 0 * X_{t11_e04_1} + 0 * X_{t11_e04_2} + 0 * X_{t12_e04_1} + 0 * X_{t12_e04_2} + 4.2289156626506E-04 * X_{t13_e04_1} +$
 $+ 8.4578313253012E-04 * X_{t13_e04_2} +$

1.69156626506024E-02*X_t14_e04_1+3.38313253012048E-02*X_t14_e04_2+8.4578313253012E-04*X_t15_e04_2+1.26867469879518E-03*X_t15_e04_3+7.40060240963855E-03*X_t16_e04_1+1.48012048192771E-02*X_t16_e04_2+8.4578313253012E-04*X_t17_e04_2+1.26867469879518E-03*X_t17_e04_3

costo por paralela de estacion 4

+1.69156626506024E-02*X_t6_e05_1+3.38313253012048E-02*X_t6_e05_2+0*X_t7_e05_1+0*X_t7_e05_2+0*X_t9_e05_1+0*X_t9_e05_2+0*X_t10_e05_1+0*X_t10_e05_2+0*X_t11_e05_1+0*X_t11_e05_2+4.2289156626506E-04*X_t13_e05_1+8.4578313253012E-04*X_t13_e05_2+1.69156626506024E-02*X_t14_e05_1+3.38313253012048E-02*X_t14_e05_2+8.4578313253012E-04*X_t15_e05_2+1.26867469879518E-03*X_t15_e05_3+7.40060240963855E-03*X_t16_e05_1+1.48012048192771E-02*X_t16_e05_2+8.4578313253012E-04*X_t17_e05_2+1.26867469879518E-03*X_t17_e05_3

costo por paralela de estacion 5

+0*X_t10_e06_1+0*X_t10_e06_2+0*X_t11_e06_1+0*X_t11_e06_2+4.2289156626506E-04*X_t13_e06_1+8.4578313253012E-04*X_t13_e06_2+1.69156626506024E-02*X_t14_e06_1+3.38313253012048E-02*X_t14_e06_2+8.4578313253012E-04*X_t15_e06_2+1.26867469879518E-03*X_t15_e06_3+7.40060240963855E-03*X_t16_e06_1+1.48012048192771E-02*X_t16_e06_2+8.4578313253012E-04*X_t17_e06_2+1.26867469879518E-03*X_t17_e06_3

costo por paralela de estacion 6

+4.2289156626506E-04*X_t13_e07_1+8.4578313253012E-04*X_t13_e07_2+1.69156626506024E-02*X_t14_e07_1+3.38313253012048E-02*X_t14_e07_2+8.4578313253012E-04*X_t15_e07_2+1.26867469879518E-03*X_t15_e07_3+7.40060240963855E-03*X_t16_e07_1+1.48012048192771E-02*X_t16_e07_2+8.4578313253012E-04*X_t17_e07_2+1.26867469879518E-03*X_t17_e07_3

costo por paralela de estacion 7

+20.28*NP_e01

costo de labor

+20.28*NP_e02

costo de labor

+20.28*NP_e03

costo de labor

+20.28*NP_e04

costo de labor

+20.28*NP_e05

costo de labor

+20.28*NP_e06

costo de labor

+20.28*NP_e07

costo de labor

+0.01*Y_e01

costo por posicion en serie

+0.02*Y_e02

costo por posicion en serie

+0.03*Y_e03

costo por posicion en serie

+0.04*Y_e04

costo por posicion en serie

+0.05*Y_e05

costo por posicion en serie

+0.06*Y_e06

costo por posicion en serie

+0.07*Y_e07

costo por posicion en serie

+0.0001*F

Reduce Tiempo de Ciclo

SoloUnaEstacion_t1:

+X_t1_e01_1+X_t1_e01_2+X_t1_e02_1+X_t1_e02_2+X_t1_e03_1+X_t1_e03_2+X_t1_e04_1+X_t1_e04_2=1;

SoloUnaEstacion_t2:

+X_t2_e01_1+X_t2_e01_2+X_t2_e02_1+X_t2_e02_2+X_t2_e03_1+X_t2_e03_2+X_t2_e04_1+X_t2_e04_2=1;

SoloUnaEstacion_t3:

+X_t3_e01_1+X_t3_e01_2+X_t3_e02_1+X_t3_e02_2+X_t3_e03_1+X_t3_e03_2+X_t3_e04_1+X_t3_e04_2=1;

SoloUnaEstacion_t4:

+X_t4_e01_1+X_t4_e01_2+X_t4_e02_1+X_t4_e02_2+X_t4_e03_1+X_t4_e03_2+X_t4_e04_1+X_t4_e04_2=1;

SoloUnaEstacion_t5:

+X_t5_e01_1+X_t5_e01_2+X_t5_e02_1+X_t5_e02_2+X_t5_e03_1+X_t5_e03_2+X_t5_e04_1+X_t5_e04_2=1;

SoloUnaEstacion_t6:

+X_t6_e01_1+X_t6_e01_2+X_t6_e02_1+X_t6_e02_2+X_t6_e03_1+X_t6_e03_2+X_t6_e04_1+X_t6_e04_2+X_t6_e05_1+X_t6_e05_2=1;

SoloUnaEstacion_t7:

+X_t7_e01_1+X_t7_e01_2+X_t7_e02_1+X_t7_e02_2+X_t7_e03_1+X_t7_e03_2+X_t7_e04_1+X_t7_e04_2+X_t7_e05_1+X_t7_e05_2=1;

SoloUnaEstacion_t8:

+X_t8_e01_1+X_t8_e01_2+X_t8_e02_1+X_t8_e02_2+X_t8_e03_1+X_t8_e03_2+X_t8_e04_1+X_t8_e04_2=1;

SoloUnaEstacion_t9:

+X_t9_e01_1+X_t9_e01_2+X_t9_e02_1+X_t9_e02_2+X_t9_e03_1+X_t9_e03_2+X_t9_e04_1+X_t9_e04_2+X_t9_e05_1+X_t9_e05_2=1;

SoloUnaEstacion_t10:

+X_t10_e02_1+X_t10_e02_2+X_t10_e03_1+X_t10_e03_2+X_t10_e04_1+X_t10_e04_2+X_t10_e05_1+X_t10_e05_2+X_t10_e06_1+X_t10_e06_2=1;

SoloUnaEstacion_t11:

+X_t11_e02_1+X_t11_e02_2+X_t11_e03_1+X_t11_e03_2+X_t11_e04_1+X_t11_e04_2+X_t11_e05_1+X_t11_e05_2+X_t11_e06_1+X_t11_e06_2=1;

SoloUnaEstacion_t12:

+X_t12_e01_1+X_t12_e01_2+X_t12_e02_1+X_t12_e02_2+X_t12_e03_1+X_t12_e03_2+X_t12_e04_1+X_t12_e04_2=1;

SoloUnaEstacion_t13:

+X_t13_e03_1+X_t13_e03_2+X_t13_e04_1+X_t13_e04_2+X_t13_e05_1+X_t13_e05_2+X_t13_e06_1+X_t13_e06_2+X_t13_e07_1+X_t13_e07_2=1;

SoloUnaEstacion_t14:

+X_t14_e03_1+X_t14_e03_2+X_t14_e04_1+X_t14_e04_2+X_t14_e05_1+X_t14_e05_2+X_t14_e06_1+X_t14_e06_2+X_t14_e07_1+X_t14_e07_2=1;

SoloUnaEstacion_t15:

+X_t15_e02_2+X_t15_e02_3+X_t15_e03_2+X_t15_e03_3+X_t15_e04_2+X_t15_e04_3+X_t15_e05_2+X_t15_e05_3+X_t15_e06_2+X_t15_e06_3+X_t15_e07_2+X_t15_e07_3=1;

SoloUnaEstacion_t16:

+X_t16_e03_1+X_t16_e03_2+X_t16_e04_1+X_t16_e04_2+X_t16_e05_1+X_t16_e05_2+X_t16_e06_1+X_t16_e06_2+X_t16_e07_1+X_t16_e07_2=1;

SoloUnaEstacion_t17:

+X_t17_e03_2+X_t17_e03_3+X_t17_e04_2+X_t17_e04_3+X_t17_e05_2+X_t17_e05_3+X_t17_e06_2+X_t17_e06_3+X_t17_e07_2+X_t17_e07_3=1;

#

UnaPosSerial_t1_e01: +X_t1_e01-X_t1_e01_1-X_t1_e01_2=0;

UnaPosSerial_t1_e02: +X_t1_e02-X_t1_e02_1-X_t1_e02_2=0;

UnaPosSerial_t1_e03: +X_t1_e03-X_t1_e03_1-X_t1_e03_2=0;

UnaPosSerial_t1_e04: +X_t1_e04-X_t1_e04_1-X_t1_e04_2=0;

UnaPosSerial_t2_e01: +X_t2_e01-X_t2_e01_1-X_t2_e01_2=0;

UnaPosSerial_t2_e02: +X_t2_e02-X_t2_e02_1-X_t2_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t2_e03: +X_t2_e03-X_t2_e03_1-X_t2_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t2_e04: +X_t2_e04-X_t2_e04_1-X_t2_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t3_e01: +X_t3_e01-X_t3_e01_1-X_t3_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t3_e02: +X_t3_e02-X_t3_e02_1-X_t3_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t3_e03: +X_t3_e03-X_t3_e03_1-X_t3_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t3_e04: +X_t3_e04-X_t3_e04_1-X_t3_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t4_e01: +X_t4_e01-X_t4_e01_1-X_t4_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t4_e02: +X_t4_e02-X_t4_e02_1-X_t4_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t4_e03: +X_t4_e03-X_t4_e03_1-X_t4_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t4_e04: +X_t4_e04-X_t4_e04_1-X_t4_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t5_e01: +X_t5_e01-X_t5_e01_1-X_t5_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t5_e02: +X_t5_e02-X_t5_e02_1-X_t5_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t5_e03: +X_t5_e03-X_t5_e03_1-X_t5_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t5_e04: +X_t5_e04-X_t5_e04_1-X_t5_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t6_e01: +X_t6_e01-X_t6_e01_1-X_t6_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t6_e02: +X_t6_e02-X_t6_e02_1-X_t6_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t6_e03: +X_t6_e03-X_t6_e03_1-X_t6_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t6_e04: +X_t6_e04-X_t6_e04_1-X_t6_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t6_e05: +X_t6_e05-X_t6_e05_1-X_t6_e05_2=0;
 UnaPosSerial_t7_e01: +X_t7_e01-X_t7_e01_1-X_t7_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t7_e02: +X_t7_e02-X_t7_e02_1-X_t7_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t7_e03: +X_t7_e03-X_t7_e03_1-X_t7_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t7_e04: +X_t7_e04-X_t7_e04_1-X_t7_e04_2=0;

UnaPosSerial_t7_e05: +X_t7_e05-X_t7_e05_1-X_t7_e05_2=0;
 UnaPosSerial_t8_e01: +X_t8_e01-X_t8_e01_1-X_t8_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t8_e02: +X_t8_e02-X_t8_e02_1-X_t8_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t8_e03: +X_t8_e03-X_t8_e03_1-X_t8_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t8_e04: +X_t8_e04-X_t8_e04_1-X_t8_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t9_e01: +X_t9_e01-X_t9_e01_1-X_t9_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t9_e02: +X_t9_e02-X_t9_e02_1-X_t9_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t9_e03: +X_t9_e03-X_t9_e03_1-X_t9_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t9_e04: +X_t9_e04-X_t9_e04_1-X_t9_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t9_e05: +X_t9_e05-X_t9_e05_1-X_t9_e05_2=0;
 UnaPosSerial_t10_e02: +X_t10_e02-X_t10_e02_1-X_t10_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t10_e03: +X_t10_e03-X_t10_e03_1-X_t10_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t10_e04: +X_t10_e04-X_t10_e04_1-X_t10_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t10_e05: +X_t10_e05-X_t10_e05_1-X_t10_e05_2=0;
 UnaPosSerial_t10_e06: +X_t10_e06-X_t10_e06_1-X_t10_e06_2=0;
 UnaPosSerial_t11_e02: +X_t11_e02-X_t11_e02_1-X_t11_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t11_e03: +X_t11_e03-X_t11_e03_1-X_t11_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t11_e04: +X_t11_e04-X_t11_e04_1-X_t11_e04_2=0;
 UnaPosSerial_t11_e05: +X_t11_e05-X_t11_e05_1-X_t11_e05_2=0;
 UnaPosSerial_t11_e06: +X_t11_e06-X_t11_e06_1-X_t11_e06_2=0;
 UnaPosSerial_t12_e01: +X_t12_e01-X_t12_e01_1-X_t12_e01_2=0;
 UnaPosSerial_t12_e02: +X_t12_e02-X_t12_e02_1-X_t12_e02_2=0;
 UnaPosSerial_t12_e03: +X_t12_e03-X_t12_e03_1-X_t12_e03_2=0;
 UnaPosSerial_t12_e04: +X_t12_e04-X_t12_e04_1-X_t12_e04_2=0;

UnaPosSerial_t13_e03: +X_t13_e03-X_t13_e03_1-X_t13_e03_2=0;
UnaPosSerial_t13_e04: +X_t13_e04-X_t13_e04_1-X_t13_e04_2=0;
UnaPosSerial_t13_e05: +X_t13_e05-X_t13_e05_1-X_t13_e05_2=0;
UnaPosSerial_t13_e06: +X_t13_e06-X_t13_e06_1-X_t13_e06_2=0;
UnaPosSerial_t13_e07: +X_t13_e07-X_t13_e07_1-X_t13_e07_2=0;
UnaPosSerial_t14_e03: +X_t14_e03-X_t14_e03_1-X_t14_e03_2=0;
UnaPosSerial_t14_e04: +X_t14_e04-X_t14_e04_1-X_t14_e04_2=0;
UnaPosSerial_t14_e05: +X_t14_e05-X_t14_e05_1-X_t14_e05_2=0;
UnaPosSerial_t14_e06: +X_t14_e06-X_t14_e06_1-X_t14_e06_2=0;
UnaPosSerial_t14_e07: +X_t14_e07-X_t14_e07_1-X_t14_e07_2=0;
UnaPosSerial_t15_e02: +X_t15_e02-X_t15_e02_2-X_t15_e02_3=0;
UnaPosSerial_t15_e03: +X_t15_e03-X_t15_e03_2-X_t15_e03_3=0;
UnaPosSerial_t15_e04: +X_t15_e04-X_t15_e04_2-X_t15_e04_3=0;
UnaPosSerial_t15_e05: +X_t15_e05-X_t15_e05_2-X_t15_e05_3=0;
UnaPosSerial_t15_e06: +X_t15_e06-X_t15_e06_2-X_t15_e06_3=0;
UnaPosSerial_t15_e07: +X_t15_e07-X_t15_e07_2-X_t15_e07_3=0;
UnaPosSerial_t16_e03: +X_t16_e03-X_t16_e03_1-X_t16_e03_2=0;
UnaPosSerial_t16_e04: +X_t16_e04-X_t16_e04_1-X_t16_e04_2=0;
UnaPosSerial_t16_e05: +X_t16_e05-X_t16_e05_1-X_t16_e05_2=0;
UnaPosSerial_t16_e06: +X_t16_e06-X_t16_e06_1-X_t16_e06_2=0;
UnaPosSerial_t16_e07: +X_t16_e07-X_t16_e07_1-X_t16_e07_2=0;
UnaPosSerial_t17_e03: +X_t17_e03-X_t17_e03_2-X_t17_e03_3=0;
UnaPosSerial_t17_e04: +X_t17_e04-X_t17_e04_2-X_t17_e04_3=0;
UnaPosSerial_t17_e05: +X_t17_e05-X_t17_e05_2-X_t17_e05_3=0;

UnaPosSerial_t17_e06: +X_t17_e06-X_t17_e06_2-X_t17_e06_3=0;

UnaPosSerial_t17_e07: +X_t17_e07-X_t17_e07_2-X_t17_e07_3=0;

#

ParalelaSIoNO_e01_1:+17*delta_e01_1-X_t1_e01_1-X_t2_e01_1-X_t3_e01_1-X_t4_e01_1-X_t5_e01_1-X_t6_e01_1-X_t7_e01_1-X_t8_e01_1-X_t9_e01_1-X_t12_e01_1>0;

ParalelaSIoNO_e01_2:+17*delta_e01_2-X_t1_e01_2-X_t2_e01_2-X_t3_e01_2-X_t4_e01_2-X_t5_e01_2-X_t6_e01_2-X_t7_e01_2-X_t8_e01_2-X_t9_e01_2-X_t12_e01_2>0;

ParalelaSIoNO_e01_3: +17*delta_e01_3>0;

ParalelaSIoNO_e02_1:+17*delta_e02_1-X_t1_e02_1-X_t2_e02_1-X_t3_e02_1-X_t4_e02_1-X_t5_e02_1-X_t6_e02_1-X_t7_e02_1-X_t8_e02_1-X_t9_e02_1-X_t10_e02_1-X_t11_e02_1-X_t12_e02_1>0;

ParalelaSIoNO_e02_2:+17*delta_e02_2-X_t1_e02_2-X_t2_e02_2-X_t3_e02_2-X_t4_e02_2-X_t5_e02_2-X_t6_e02_2-X_t7_e02_2-X_t8_e02_2-X_t9_e02_2-X_t10_e02_2-X_t11_e02_2-X_t12_e02_2-X_t15_e02_2>0;

ParalelaSIoNO_e02_3: +17*delta_e02_3-X_t15_e02_3>0;

ParalelaSIoNO_e03_1:+17*delta_e03_1-X_t1_e03_1-X_t2_e03_1-X_t3_e03_1-X_t4_e03_1-X_t5_e03_1-X_t6_e03_1-X_t7_e03_1-X_t8_e03_1-X_t9_e03_1-X_t10_e03_1-X_t11_e03_1-X_t12_e03_1-X_t13_e03_1-X_t14_e03_1-X_t16_e03_1>0;

ParalelaSIoNO_e03_2: +17*delta_e03_2-X_t1_e03_2-X_t2_e03_2-X_t3_e03_2-X_t4_e03_2-X_t5_e03_2-X_t6_e03_2-X_t7_e03_2-X_t8_e03_2-X_t9_e03_2-X_t10_e03_2-X_t11_e03_2-X_t12_e03_2-X_t13_e03_2-X_t14_e03_2-X_t15_e03_2-X_t16_e03_2-X_t17_e03_2>0;

ParalelaSIoNO_e03_3: +17*delta_e03_3-X_t15_e03_3-X_t17_e03_3>0;

ParalelaSIoNO_e04_1:+17*delta_e04_1-X_t1_e04_1-X_t2_e04_1-X_t3_e04_1-X_t4_e04_1-X_t5_e04_1-X_t6_e04_1-X_t7_e04_1-X_t8_e04_1-X_t9_e04_1-X_t10_e04_1-X_t11_e04_1-X_t12_e04_1-X_t13_e04_1-X_t14_e04_1-X_t16_e04_1>0;

ParalelaSIoNO_e04_2:+17*delta_e04_2-X_t1_e04_2-X_t2_e04_2-X_t3_e04_2-X_t4_e04_2-X_t5_e04_2-X_t6_e04_2-X_t7_e04_2-X_t8_e04_2-X_t9_e04_2-X_t10_e04_2-X_t11_e04_2-X_t12_e04_2-X_t13_e04_2-X_t14_e04_2-X_t15_e04_2-X_t16_e04_2-X_t17_e04_2>0;

ParalelaSIoNO_e04_3: +17*delta_e04_3-X_t15_e04_3-X_t17_e04_3>0;

ParalelaSIoNO_e05_1:+17*delta_e05_1-X_t6_e05_1-X_t7_e05_1-X_t9_e05_1-X_t10_e05_1-X_t11_e05_1-X_t13_e05_1-X_t14_e05_1-X_t16_e05_1>0;

ParalelaSIoNO_e05_2:+17*delta_e05_2-X_t6_e05_2-X_t7_e05_2-X_t9_e05_2-X_t10_e05_2-X_t11_e05_2-X_t13_e05_2-X_t14_e05_2-X_t15_e05_2-X_t16_e05_2-X_t17_e05_2>0;

ParalelaSIoNO_e05_3: +17*delta_e05_3-X_t15_e05_3-X_t17_e05_3>0;

ParalelaSIoNO_e06_1: +17*delta_e06_1-X_t10_e06_1-X_t11_e06_1-X_t13_e06_1-X_t14_e06_1-X_t16_e06_1>0;

ParalelaSIoNO_e06_2: +17*delta_e06_2-X_t10_e06_2-X_t11_e06_2-X_t13_e06_2-X_t14_e06_2-X_t15_e06_2-X_t16_e06_2-X_t17_e06_2>0;

ParalelaSIoNO_e06_3: +17*delta_e06_3-X_t15_e06_3-X_t17_e06_3>0;

ParalelaSIoNO_e07_1:+17*delta_e07_1-X_t13_e07_1-X_t14_e07_1-X_t16_e07_1>0;

ParalelaSIoNO_e07_2: +17*delta_e07_2-X_t13_e07_2-X_t14_e07_2-X_t15_e07_2-X_t16_e07_2-X_t17_e07_2>0;

ParalelaSIoNO_e07_3: +17*delta_e07_3-X_t15_e07_3-X_t17_e07_3>0;

#

StationCycleTime_e01_1:L_e01_1-62.05*X_t1_e01_1-5.09*X_t2_e01_1-42.01*X_t3_e01_1-6.64*X_t4_e01_1-53.84*X_t5_e01_1-59.61*X_t6_e01_1-21.76*X_t7_e01_1-2.43*X_t8_e01_1-39.91*X_t9_e01_1-1.5*X_t12_e01_1=0;

StationCycleTime_e01_2:L_e01_2-31.025*X_t1_e01_2-2.545*X_t2_e01_2-21.005*X_t3_e01_2-3.32*X_t4_e01_2-26.92*X_t5_e01_2-29.805*X_t6_e01_2-10.88*X_t7_e01_2-1.215*X_t8_e01_2-19.955*X_t9_e01_2-0.75*X_t12_e01_2=0;

StationCycleTime_e01_3: L_e01_3=0;

StationCycleTime_e02_1:L_e02_1-62.05*X_t1_e02_1-5.09*X_t2_e02_1-42.01*X_t3_e02_1-6.64*X_t4_e02_1-53.84*X_t5_e02_1-59.61*X_t6_e02_1-21.76*X_t7_e02_1-2.43*X_t8_e02_1-39.91*X_t9_e02_1-55.01*X_t10_e02_1-8.27*X_t11_e02_1-1.5*X_t12_e02_1=0;

StationCycleTime_e02_2:L_e02_2-31.025*X_t1_e02_2-2.545*X_t2_e02_2-21.005*X_t3_e02_2-3.32*X_t4_e02_2-26.92*X_t5_e02_2-29.805*X_t6_e02_2-

10.88*X_t7_e02_2-1.215*X_t8_e02_2-19.955*X_t9_e02_2-27.505*X_t10_e02_2-
4.135*X_t11_e02_2-0.75*X_t12_e02_2

-46.905*X_t15_e02_2=0;

StationCycleTime_e02_3: L_e02_3-31.27*X_t15_e02_3=0;

StationCycleTime_e03_1:L_e03_1-62.05*X_t1_e03_1-5.09*X_t2_e03_1-
42.01*X_t3_e03_1-6.64*X_t4_e03_1-53.84*X_t5_e03_1-59.61*X_t6_e03_1-
21.76*X_t7_e03_1-2.43*X_t8_e03_1-39.91*X_t9_e03_1-55.01*X_t10_e03_1-
8.27*X_t11_e03_1-1.5*X_t12_e03_1

-50.93*X_t13_e03_1-66.91*X_t14_e03_1-20.22*X_t16_e03_1=0;

StationCycleTime_e03_2:L_e03_2-31.025*X_t1_e03_2-2.545*X_t2_e03_2-
21.005*X_t3_e03_2-3.32*X_t4_e03_2-26.92*X_t5_e03_2-29.805*X_t6_e03_2-
10.88*X_t7_e03_2-1.215*X_t8_e03_2-19.955*X_t9_e03_2-27.505*X_t10_e03_2-
4.135*X_t11_e03_2-0.75*X_t12_e03_2-25.465*X_t13_e03_2-33.455*X_t14_e03_2-
46.905*X_t15_e03_2-10.11*X_t16_e03_2-72.865*X_t17_e03_2=0;

StationCycleTime_e03_3: L_e03_3-31.27*X_t15_e03_3-48.57666*X_t17_e03_3=0;

StationCycleTime_e04_1:L_e04_1-62.05*X_t1_e04_1-5.09*X_t2_e04_1-
42.01*X_t3_e04_1-6.64*X_t4_e04_1-53.84*X_t5_e04_1-59.61*X_t6_e04_1-
21.76*X_t7_e04_1-2.43*X_t8_e04_1-39.91*X_t9_e04_1-55.01*X_t10_e04_1-
8.27*X_t11_e04_1-1.5*X_t12_e04_1

-50.93*X_t13_e04_1-66.91*X_t14_e04_1-20.22*X_t16_e04_1=0;

StationCycleTime_e04_2:L_e04_2-31.025*X_t1_e04_2-2.545*X_t2_e04_2-
21.005*X_t3_e04_2-3.32*X_t4_e04_2-26.92*X_t5_e04_2-29.805*X_t6_e04_2-
10.88*X_t7_e04_2-1.215*X_t8_e04_2-19.955*X_t9_e04_2-27.505*X_t10_e04_2-
4.135*X_t11_e04_2-0.75*X_t12_e04_2-25.465*X_t13_e04_2-33.455*X_t14_e04_2-
46.905*X_t15_e04_2-10.11*X_t16_e04_2-72.865*X_t17_e04_2=0;

StationCycleTime_e04_3: L_e04_3-31.27*X_t15_e04_3-48.57666*X_t17_e04_3=0;

StationCycleTime_e05_1:L_e05_1-59.61*X_t6_e05_1-21.76*X_t7_e05_1-
39.91*X_t9_e05_1-55.01*X_t10_e05_1-8.27*X_t11_e05_1-50.93*X_t13_e05_1-
66.91*X_t14_e05_1-20.22*X_t16_e05_1=0;

StationCycleTime_e05_2:L_e05_2-29.805*X_t6_e05_2-10.88*X_t7_e05_2-
19.955*X_t9_e05_2-27.505*X_t10_e05_2-4.135*X_t11_e05_2-25.465*X_t13_e05_2-
33.455*X_t14_e05_2-46.905*X_t15_e05_2-10.11*X_t16_e05_2-
72.865*X_t17_e05_2=0;

StationCycleTime_e05_3: L_e05_3-31.27*X_t15_e05_3-48.57666*X_t17_e05_3=0;

StationCycleTime_e06_1: L_e06_1-55.01*X_t10_e06_1-8.27*X_t11_e06_1-50.93*X_t13_e06_1-66.91*X_t14_e06_1-20.22*X_t16_e06_1=0;

StationCycleTime_e06_2: L_e06_2-27.505*X_t10_e06_2-4.135*X_t11_e06_2-25.465*X_t13_e06_2-33.455*X_t14_e06_2-46.905*X_t15_e06_2-10.11*X_t16_e06_2-72.865*X_t17_e06_2=0;

StationCycleTime_e06_3: L_e06_3-31.27*X_t15_e06_3-48.57666*X_t17_e06_3=0;

StationCycleTime_e07_1: L_e07_1-50.93*X_t13_e07_1-66.91*X_t14_e07_1-20.22*X_t16_e07_1=0;

StationCycleTime_e07_2: L_e07_2-25.465*X_t13_e07_2-33.455*X_t14_e07_2-46.905*X_t15_e07_2-10.11*X_t16_e07_2-72.865*X_t17_e07_2=0;

StationCycleTime_e07_3: L_e07_3-31.27*X_t15_e07_3-48.57666*X_t17_e07_3=0;

#

StationCycleTime_e01: L_e01-L_e01_1-L_e01_2-L_e01_3=0;

StationCycleTime_e02: L_e02-L_e02_1-L_e02_2-L_e02_3=0;

StationCycleTime_e03: L_e03-L_e03_1-L_e03_2-L_e03_3=0;

StationCycleTime_e04: L_e04-L_e04_1-L_e04_2-L_e04_3=0;

StationCycleTime_e05: L_e05-L_e05_1-L_e05_2-L_e05_3=0;

StationCycleTime_e06: L_e06-L_e06_1-L_e06_2-L_e06_3=0;

StationCycleTime_e07: L_e07-L_e07_1-L_e07_2-L_e07_3=0;

#

QueParalela_e01: +delta_e01_1+delta_e01_2+delta_e01_3<1;

QueParalela_e02: +delta_e02_1+delta_e02_2+delta_e02_3<1;

QueParalela_e03: +delta_e03_1+delta_e03_2+delta_e03_3<1;

QueParalela_e04: +delta_e04_1+delta_e04_2+delta_e04_3<1;

QueParalela_e05: +delta_e05_1+delta_e05_2+delta_e05_3<1;

QueParalela_e06: $+\delta_{e06_1}+\delta_{e06_2}+\delta_{e06_3}<1;$

QueParalela_e07: $+\delta_{e07_1}+\delta_{e07_2}+\delta_{e07_3}<1;$

#

SerialSiNo_e01: $+Y_{e01}-\delta_{e01_1}-\delta_{e01_2}-\delta_{e01_3}=0;$

SerialSiNo_e02: $+Y_{e02}-\delta_{e02_1}-\delta_{e02_2}-\delta_{e02_3}=0;$

SerialSiNo_e03: $+Y_{e03}-\delta_{e03_1}-\delta_{e03_2}-\delta_{e03_3}=0;$

SerialSiNo_e04: $+Y_{e04}-\delta_{e04_1}-\delta_{e04_2}-\delta_{e04_3}=0;$

SerialSiNo_e05: $+Y_{e05}-\delta_{e05_1}-\delta_{e05_2}-\delta_{e05_3}=0;$

SerialSiNo_e06: $+Y_{e06}-\delta_{e06_1}-\delta_{e06_2}-\delta_{e06_3}=0;$

SerialSiNo_e07: $+Y_{e07}-\delta_{e07_1}-\delta_{e07_2}-\delta_{e07_3}=0;$

#

Estacion_de_t1: $E_{t1}-1*X_{t1_e01}-2*X_{t1_e02}-3*X_{t1_e03}-4*X_{t1_e04}=0;$

Estacion_de_t2: $E_{t2}-1*X_{t2_e01}-2*X_{t2_e02}-3*X_{t2_e03}-4*X_{t2_e04}=0;$

Estacion_de_t3: $E_{t3}-1*X_{t3_e01}-2*X_{t3_e02}-3*X_{t3_e03}-4*X_{t3_e04}=0;$

Estacion_de_t4: $E_{t4}-1*X_{t4_e01}-2*X_{t4_e02}-3*X_{t4_e03}-4*X_{t4_e04}=0;$

Estacion_de_t5: $E_{t5}-1*X_{t5_e01}-2*X_{t5_e02}-3*X_{t5_e03}-4*X_{t5_e04}=0;$

Estacion_de_t6: $E_{t6}-1*X_{t6_e01}-2*X_{t6_e02}-3*X_{t6_e03}-4*X_{t6_e04}-5*X_{t6_e05}=0;$

Estacion_de_t7: $E_{t7}-1*X_{t7_e01}-2*X_{t7_e02}-3*X_{t7_e03}-4*X_{t7_e04}-5*X_{t7_e05}=0;$

Estacion_de_t8: $E_{t8}-1*X_{t8_e01}-2*X_{t8_e02}-3*X_{t8_e03}-4*X_{t8_e04}=0;$

Estacion_de_t9: $E_{t9}-1*X_{t9_e01}-2*X_{t9_e02}-3*X_{t9_e03}-4*X_{t9_e04}-5*X_{t9_e05}=0;$

Estacion_de_t10: $E_{t10}-2*X_{t10_e02}-3*X_{t10_e03}-4*X_{t10_e04}-5*X_{t10_e05}-6*X_{t10_e06}=0;$

Estacion_de_t11: $E_{t11-2} * X_{t11_e02-3} * X_{t11_e03-4} * X_{t11_e04-5} * X_{t11_e05-6} * X_{t11_e06} = 0;$

Estacion_de_t12: $E_{t12-1} * X_{t12_e01-2} * X_{t12_e02-3} * X_{t12_e03-4} * X_{t12_e04} = 0;$

Estacion_de_t13: $E_{t13-3} * X_{t13_e03-4} * X_{t13_e04-5} * X_{t13_e05-6} * X_{t13_e06-7} * X_{t13_e07} = 0;$

Estacion_de_t14: $E_{t14-3} * X_{t14_e03-4} * X_{t14_e04-5} * X_{t14_e05-6} * X_{t14_e06-7} * X_{t14_e07} = 0;$

Estacion_de_t15: $E_{t15-2} * X_{t15_e02-3} * X_{t15_e03-4} * X_{t15_e04-5} * X_{t15_e05-6} * X_{t15_e06-7} * X_{t15_e07} = 0;$

Estacion_de_t16: $E_{t16-3} * X_{t16_e03-4} * X_{t16_e04-5} * X_{t16_e05-6} * X_{t16_e06-7} * X_{t16_e07} = 0;$

Estacion_de_t17: $E_{t17-3} * X_{t17_e03-4} * X_{t17_e04-5} * X_{t17_e05-6} * X_{t17_e06-7} * X_{t17_e07} = 0;$

#

Precedente_t3_t1: $E_{t3} - E_{t1} > 0;$

Precedente_t3_t2: $E_{t3} - E_{t2} > 0;$

Precedente_t4_t3: $E_{t4} - E_{t3} > 0;$

Precedente_t5_t4: $E_{t5} - E_{t4} > 0;$

Precedente_t6_t5: $E_{t6} - E_{t5} > 0;$

Precedente_t7_t7: $E_{t7} - E_{t7} > 0;$

Precedente_t9_t6: $E_{t9} - E_{t6} > 0;$

Precedente_t9_t8: $E_{t9} - E_{t8} > 0;$

Precedente_t10_t9: $E_{t10} - E_{t9} > 0;$

Precedente_t11_t10: $E_{t11} - E_{t10} > 0;$

Precedente_t13_t11: $E_{t13} - E_{t11} > 0;$

Precedente_t13_t12: $E_{t13} - E_{t12} > 0;$

Precedente_t14_t14: $E_{t14} - E_{t14} > 0$;

Precedente_t15_t7: $E_{t15} - E_{t7} > 0$;

Precedente_t16_t15: $E_{t16} - E_{t15} > 0$;

Precedente_t17_t14: $E_{t17} - E_{t14} > 0$;

Precedente_t17_t16: $E_{t17} - E_{t16} > 0$;

#

Numdeparalelas_e01: $NP_{e01-1} * \delta_{e01_1-2} * \delta_{e01_2-3} * \delta_{e01_3-0} = 0$;

Numdeparalelas_e02: $NP_{e02-1} * \delta_{e02_1-2} * \delta_{e02_2-3} * \delta_{e02_3-0} = 0$;

Numdeparalelas_e03: $NP_{e03-1} * \delta_{e03_1-2} * \delta_{e03_2-3} * \delta_{e03_3-0} = 0$;

Numdeparalelas_e04: $NP_{e04-1} * \delta_{e04_1-2} * \delta_{e04_2-3} * \delta_{e04_3-0} = 0$;

Numdeparalelas_e05: $NP_{e05-1} * \delta_{e05_1-2} * \delta_{e05_2-3} * \delta_{e05_3-0} = 0$;

Numdeparalelas_e06: $NP_{e06-1} * \delta_{e06_1-2} * \delta_{e06_2-3} * \delta_{e06_3-0} = 0$;

Numdeparalelas_e07: $NP_{e07-1} * \delta_{e07_1-2} * \delta_{e07_2-3} * \delta_{e07_3-0} = 0$;

#

TiempoDeCiclo_e01: $F - L_{e01} > 0$;

TiempoDeCiclo_e02: $F - L_{e02} > 0$;

TiempoDeCiclo_e03: $F - L_{e03} > 0$;

TiempoDeCiclo_e04: $F - L_{e04} > 0$;

TiempoDeCiclo_e05: $F - L_{e05} > 0$;

TiempoDeCiclo_e06: $F - L_{e06} > 0$;

TiempoDeCiclo_e07: $F - L_{e07} > 0$;

#

LackOfBalance_e01: $LB_{e01} - F + L_{e01} = 0$;

LackOfBalance_e02: $LB_{e02} - F + L_{e02} = 0$;

LackOfBalance_e03: $LB_e03 - F + L_e03 = 0$;

LackOfBalance_e04: $LB_e04 - F + L_e04 = 0$;

LackOfBalance_e05: $LB_e05 - F + L_e05 = 0$;

LackOfBalance_e06: $LB_e06 - F + L_e06 = 0$;

LackOfBalance_e07: $LB_e07 - F + L_e07 = 0$;

#

MaxCycleTime: $F < 78$;

:ENDE

BOUNDS

UI BOUND X_t1_e01 1.0

UI BOUND X_t1_e02 1.0

UI BOUND X_t1_e03 1.0

UI BOUND X_t1_e04 1.0

UI BOUND X_t2_e01 1.0

UI BOUND X_t2_e02 1.0

UI BOUND X_t2_e03 1.0

UI BOUND X_t2_e04 1.0

UI BOUND X_t3_e01 1.0

UI BOUND X_t3_e02 1.0

UI BOUND X_t3_e03 1.0

UI BOUND X_t3_e04 1.0

UI BOUND X_t4_e01 1.0

UI BOUND X_t4_e02 1.0

UI BOUND X_t4_e03 1.0

UI BOUND X_t4_e04 1.0
UI BOUND X_t5_e01 1.0
UI BOUND X_t5_e02 1.0
UI BOUND X_t5_e03 1.0
UI BOUND X_t5_e04 1.0
UI BOUND X_t6_e01 1.0
UI BOUND X_t6_e02 1.0
UI BOUND X_t6_e03 1.0
UI BOUND X_t6_e04 1.0
UI BOUND X_t6_e05 1.0
UI BOUND X_t7_e01 1.0
UI BOUND X_t7_e02 1.0
UI BOUND X_t7_e03 1.0
UI BOUND X_t7_e04 1.0
UI BOUND X_t7_e05 1.0
UI BOUND X_t8_e01 1.0
UI BOUND X_t8_e02 1.0
UI BOUND X_t8_e03 1.0
UI BOUND X_t8_e04 1.0
UI BOUND X_t9_e01 1.0
UI BOUND X_t9_e02 1.0
UI BOUND X_t9_e03 1.0
UI BOUND X_t9_e04 1.0
UI BOUND X_t9_e05 1.0

UI BOUND X_t10_e02 1.0
UI BOUND X_t10_e03 1.0
UI BOUND X_t10_e04 1.0
UI BOUND X_t10_e05 1.0
UI BOUND X_t10_e06 1.0
UI BOUND X_t11_e02 1.0
UI BOUND X_t11_e03 1.0
UI BOUND X_t11_e04 1.0
UI BOUND X_t11_e05 1.0
UI BOUND X_t11_e06 1.0
UI BOUND X_t12_e01 1.0
UI BOUND X_t12_e02 1.0
UI BOUND X_t12_e03 1.0
UI BOUND X_t12_e04 1.0
UI BOUND X_t13_e03 1.0
UI BOUND X_t13_e04 1.0
UI BOUND X_t13_e05 1.0
UI BOUND X_t13_e06 1.0
UI BOUND X_t13_e07 1.0
UI BOUND X_t14_e03 1.0
UI BOUND X_t14_e04 1.0
UI BOUND X_t14_e05 1.0
UI BOUND X_t14_e06 1.0
UI BOUND X_t14_e07 1.0

UI BOUND X_t15_e02 1.0
UI BOUND X_t15_e03 1.0
UI BOUND X_t15_e04 1.0
UI BOUND X_t15_e05 1.0
UI BOUND X_t15_e06 1.0
UI BOUND X_t15_e07 1.0
UI BOUND X_t16_e03 1.0
UI BOUND X_t16_e04 1.0
UI BOUND X_t16_e05 1.0
UI BOUND X_t16_e06 1.0
UI BOUND X_t16_e07 1.0
UI BOUND X_t17_e03 1.0
UI BOUND X_t17_e04 1.0
UI BOUND X_t17_e05 1.0
UI BOUND X_t17_e06 1.0
UI BOUND X_t17_e07 1.0
UI BOUND delta_e01_1 1.0
UI BOUND delta_e01_2 1.0
UI BOUND delta_e01_3 1.0
UI BOUND delta_e02_1 1.0
UI BOUND delta_e02_2 1.0
UI BOUND delta_e02_3 1.0
UI BOUND delta_e03_1 1.0
UI BOUND delta_e03_2 1.0

UI BOUND delta_e03_3 1.0
UI BOUND delta_e04_1 1.0
UI BOUND delta_e04_2 1.0
UI BOUND delta_e04_3 1.0
UI BOUND delta_e05_1 1.0
UI BOUND delta_e05_2 1.0
UI BOUND delta_e05_3 1.0
UI BOUND delta_e06_1 1.0
UI BOUND delta_e06_2 1.0
UI BOUND delta_e06_3 1.0
UI BOUND delta_e07_1 1.0
UI BOUND delta_e07_2 1.0
UI BOUND delta_e07_3 1.0
ENDATA

APÉNDICE C. Casos de Estudio para los Experimentos

❖ Caso 1

Costos de E.M.I/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000008133	15.75	0.005437
1195200		0.004375	
0.001054			

Tareas	Duración	Tareas	Predecesores	Costo por Inversion
t1	62.05	t3	t1	0.0001627
t2	5.09	t3	t2	0
t3	42.01	t4	t3	0
t4	6.64	t5	t4	0
t5	53.84	t6	t5	0
t6	59.61	t7	t6	0.0002169
t7	21.76	t9	t6	0
t8	2.43	t9	t8	0
t9	39.91	t10	t9	0
t10	55.01	t11	t10	0
t11	8.27	t13	t11	0
t12	1.5	t13	t12	0
t13	50.93	t14	t13	0.0000054
t14	66.91	t15	t7	0.0002169
t15	93.81	t16	t15	0.0000054
t16	20.22	t17	t14	0.0000949
t17	145.73	t17	t16	0.0000054

❖ Caso 2

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000008133	15.75	0.005437
1195200		0.004375	
0.001054			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	1.70	t2	t1	\$0	0
t2	8.92	t3	t1	0	0
t3	1.70	t4	t1	0	0
t4	2.55	t5	t1	0	0
t5	3.82	t6	t2	0	0
t6	3.82	t6	t3	\$0	0
t7	4.25	t6	t5	0	0
t8	3.40	t7	t1	0	0
t9	5.10	t8	t6	0	0
t10	3.82	t9	t6	0	0
t11	2.97	t10	t1	0	0
t12	7.22	t11	t1	0	0
t13	7.22	t12	t6	\$0	0
t14	4.66	t13	t6	\$0	0
t15	2.54	t14	t6	\$0	0
t16	11.47	t15	t8	\$0	0
t17	25.91	t15	t9	\$0	0
t18	36.96	t15	t12	\$0	0
t19	18.68	t15	t13	\$8,000	0.00022
t20	8.91	t15	t14	\$0	0.00000
		t15	t7		
		t15	t11		
		t15	t4		
		t16	t10		
		t16	t15		
		t17	t16		
		t18	t17		
		t19	t18		
		t20	t19		

❖ Caso 3

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000018621	18.36	0.007532
522000		0.0051	
0.002414			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	20.05	t2	t1	\$0	0
t2	121.7	t3	t2	0	0
t3	40.97	t4	t3	2500	0.00016
t4	5.73	t5	t4	0	0
t5	17.7	t6	t5	0	0
t6	46.06	t7	t6	\$2,500	0.00016
t7	116.42	t8	t7	0	0
t8	33.94	t9	t8	0	0
t9	26.68	t11	t10	0	0
T10	49.18	t12	t11	0	0
T11	8.01	t13	t12	0	0
T12	7.48	t14	t13	0	0
T13	49.91	t15	t14	\$0	0
T14	60.35	t16	t15	\$4,000	0.00025
T15	69.68	t16	t9	\$0	0
T16	44.62	t17	t16	\$0	0
T17	8.63	t18	t17	\$0	0
T18	18.69	t19	t18	\$0	0
T19	24.8			\$0	0

❖ Caso 4

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000008133	26.25	0.008354
1195200		0.007292	
0.001054			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Inver/seg	Costos de Maquinaria
t1	2.85	t2	t1	\$0	0.00000
t2	3.48	t5	t3	0	0.00000
t3	2.28	t5	t4	0	0.00000
t4	10.54	t6	t5	1500	0.00004
t5	20.76	t9	t7	0	0.00000
t6	15.00	t9	t8	\$0	0.00000
t7	1.74	t10	t9	0	0.00000
t8	8.60	t13	t11	0	0.00000
t9	23.88	t13	t12	0	0.00000
t10	8.21	t14	t13	2000	0.00005
t11	7.40	t15	t10	0	0.00000
t12	11.20	t15	t14	0	0.00000
t13	6.50	t16	t15	\$0	0.00000
t14	5.90	t17	t16	\$0	0.00000
t15	17.84	t18	t17	\$0	0.00000
t16	19.27			\$0	0.00000
t17	4.35			\$0	0.00000
t18	1.43			\$0	0.00000

❖ Caso 5

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000018621	18.36	0.007532
522000		0.0051	
0.002414			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	115.69	t4	t3	\$0	0
t2	189.12	t5	t4	\$0	0
t3	51.16	t6	t1	\$0	0
t4	25.35	t6	t2	\$0	0
t5	48.04	t6	t5	\$0	0
t6	34.78	t7	t6	\$0	0
t7	21.43	t8	t7	\$0	0
t8	11.54	t9	t8	\$1,500	0.00009310
t9	82.75	t10	t9	\$8,000	0.00049655
t10	44.99	t12	t10	\$900	0.00005586
t11	31.08	t12	t11	\$0	0
t12	19.98	t13	t12	\$900	0.00005586
t13	106.4	t14	t13	\$0	0
t14	43.52	t15	t14	\$6,000	0.00037241
t15	44			\$0	0

❖ Caso 6

Costos de E.M.I/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1620	0.000008133	39.15	0.012239
1195200		0.010875	
0.001355			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	6.912	t3	t1	\$10,000	0.00027108
t2	15.12	t3	t2	\$0	0
t3	43.71	t4	t3	\$0	0
t4	27.36	t5	t4	\$0	0
t5	28.8	t7	t5	\$30,000	0.00081325
t6	6.912	t7	t6	\$10,000	0.00027108
t7	15.84	t9	t7	\$30,000	0.00081325
t8	6.912	t9	t8	\$10,000	0.00027108
t9	141.26	t10	t9	\$0	0
t10	12.00			\$0	0

❖ Caso 7

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000016265	45.6	0.014791
597600		0.012667	
0.002108			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	13.21	t3	t1	\$0	0
t2	7.47	t3	t2	\$0	0
t3	8.76	t4	t3	\$0	0
t4	6.48	t6	t5	\$0	0
t5	7.4	t7	t5	\$0	0
t6	5.47	t8	t6	\$0	0
t7	2.86	t9	t7	\$0	0
t8	3.98	t9	t8	\$0	0
t9	10.17	t10	t9	\$0	0
t10	4.9	t12	t11	\$0	0
t11	20.48	t13	t10	\$0	0
t12	3.75	t13	t12	\$0	0
t13	22.88	t14	t13	\$2,800	0.00015181
t14	20.54	t16	t14	\$10,000	0.00054217
t15	5.12	t16	t15	\$0	0
t16	8.88			\$0	0

❖ Caso 8

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1440	0.000006291	12.5145	0.004415
1545120		0.003476	
0.000932			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	4.29	t2	t1	\$0	0
t2	2.6	t3	t2	\$0	0
t3	4.51	t5	t4	\$2,000	0.00004194
t4	5.9	t6	t3	\$0	0
t5	12.35	t6	t5	\$0	0
t6	3.15	t8	t7	\$0	0
t7	10.78	t9	t8	\$0	0
t8	3.54	t10	t6	\$0	0
t9	10.71	t10	t9	\$0	0
t10	5.86	t11	t10	\$0	0
t11	8.24	t12	t11	\$5,000	0.00010485
t12	14.56	t13	t12	\$0	0
t13	6.77	t14	t11	\$0	0
t14	23.62	t15	t13	\$0	0
t15	9.66	t15	t14	\$0	0

❖ Caso 9

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000008133	21.114	0.006927
1195200		0.005865	
0.001054			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	8.9	t2	t1	\$0	0
t2	24.6	t3	t2	\$0	0
t3	18.5	t4	t3	\$0	0
t4	6.3	t5	t3	\$0	0
t5	5.9	t7	t6	\$500	0.00001355
t6	15.38	t8	t7	\$0	0
t7	20.9	t9	t4	\$0	0
t8	16.56	t9	t5	\$0	0
t9	9.79	t9	t8	\$0	0
t10	22.58	t11	t10	\$0	0
t11	3.47	t12	t11	\$0	0
t12	12.8	t13	t9	\$0	0
t13	7.45	t13	t12	\$0	0
t14	22.13	t14	t13	\$0	0
t15	20.15	t15	t14	\$0	0
t16	5.67	t16	t15	\$0	0

❖ Caso 10

Costos de E.M.L/segundo

Espacio	Mesa	Labor	Total
1260	0.000008133	21.114	0.006927
1195200		0.005865	
0.001054			

Tarea	Duracion (seg)	Tareas	Precedentes	Costos de Maquinaria	Costos de Inver/seg
t1	5.8	t2	t1	200.00	0.00000542
t2	66.4	t3	t1	4200.00	0.00011386
t3	21.1	t4	t2	0.00	0
t4	45.4	t5	t3	0.00	0
t5	8.9	t8	t6	3000.00	0.00008133
t6	21.9	t8	t7	5300.00	0.00014367
t7	11.2	t9	t8	200.00	0.00000542
t8	9.3	t10	t5	0.00	0
t9	55.2	t10	t9	0.00	0
t10	4.1	t11	t10	200.00	0.00000542
t11	22.8	t11	t4	8000.00	0.00021687
t12	6.8	t12	t11	200.00	0.00000542
t13	26.3	t13	t12	0.00	0
t14	33.7	t14	t13	3500.00	0.00009488
t15	14.8	t15	t14	0.00	0
t16	5.67	t16	t15	0.00	0

APÉNDICE D. Tabla de Datos para el Análisis

Estadístico del Experimento

Bloques	Tratamientos	Tipo de Diferencia	Tiempo de Ciclo	Diferencias
B1	AC1	A	C1	0.00668
B2	AC1	A	C1	0.08824
B3	AC1	A	C1	0.00000
B4	AC1	A	C1	0.13333
B5	AC1	A	C1	0.00000
B6	AC1	A	C1	0.00000
B7	AC1	A	C1	0.06695
B8	AC1	A	C1	0.00000
B9	AC1	A	C1	0.00000
B10	AC1	A	C1	0.00000
B1	BC1	B	C1	0.07127
B2	BC1	B	C1	0.08824
B3	BC1	B	C1	0.06801
B4	BC1	B	C1	0.13333
B5	BC1	B	C1	0.10373
B6	BC1	B	C1	0.03675
B7	BC1	B	C1	0.13808
B8	BC1	B	C1	0.07937
B9	BC1	B	C1	0.05294
B10	BC1	B	C1	0.00000
B1	CC1	C	C1	0.06416
B2	CC1	C	C1	0.00000
B3	CC1	C	C1	0.06801
B4	CC1	C	C1	0.00000
B5	CC1	C	C1	0.10373
B6	CC1	C	C1	0.03675
B7	CC1	C	C1	0.06667
B8	CC1	C	C1	0.07937
B9	CC1	C	C1	0.05294
B10	CC1	C	C1	0.00000

Bloques	Tratamientos	Tipo de Diferencia	Tiempo de Ciclo	Diferencias
B1	AC2	A	C2	0.00000
B2	AC2	A	C2	0.00000
B3	AC2	A	C2	0.00000
B4	AC2	A	C2	0.00694
B5	AC2	A	C2	0.00000
B6	AC2	A	C2	0.00000
B7	AC2	A	C2	0.05128
B8	AC2	A	C2	0.00000
B9	AC2	A	C2	0.00000
B10	AC2	A	C2	0.00000
B1	BC2	B	C2	0.11213
B2	BC2	B	C2	0.24731
B3	BC2	B	C2	0.16969
B4	BC2	B	C2	0.24306
B5	BC2	B	C2	0.16549
B6	BC2	B	C2	0.00000
B7	BC2	B	C2	0.30769
B8	BC2	B	C2	0.24138
B9	BC2	B	C2	0.22289
B10	BC2	B	C2	0.06061
B1	CC2	C	C2	0.11213
B2	CC2	C	C2	0.24731
B3	CC2	C	C2	0.16969
B4	CC2	C	C2	0.23448
B5	CC2	C	C2	0.16549
B6	CC2	C	C2	0.00000
B7	CC2	C	C2	0.24390
B8	CC2	C	C2	0.24138
B9	CC2	C	C2	0.22289
B10	CC2	C	C2	0.06061
B1	AC3	A	C3	0.00000
B2	AC3	A	C3	0.00000
B3	AC3	A	C3	0.00000
B4	AC3	A	C3	0.02069
B5	AC3	A	C3	0.00000
B6	AC3	A	C3	0.00000

Bloques	Tratamientos	Tipo de Diferencia	Tiempo de Ciclo	Diferencias
B7	AC3	A	C3	0.00000
B8	AC3	A	C3	0.00000
B9	AC3	A	C3	0.03165
B10	AC3	A	C3	0.00000
B1	BC3	B	C3	0.00000
B2	BC3	B	C3	0.28261
B3	BC3	B	C3	0.04878
B4	BC3	B	C3	0.24138
B5	BC3	B	C3	0.19802
B6	BC3	B	C3	0.00000
B7	BC3	B	C3	0.21739
B8	BC3	B	C3	0.03509
B9	BC3	B	C3	0.27215
B10	BC3	B	C3	0.04981
B1	CC3	C	C3	0.00000
B2	CC3	C	C3	0.28261
B3	CC3	C	C3	0.04878
B4	CC3	C	C3	0.21622
B5	CC3	C	C3	0.19802
B6	CC3	C	C3	0.00000
B7	CC3	C	C3	0.21739
B8	CC3	C	C3	0.03509
B9	CC3	C	C3	0.23313
B10	CC3	C	C3	0.04981