

**BALANCE DE LÍNEA EN UN PROCESO CON MÁQUINAS
SEMIAUTOMÁTICAS**

**JESSICA ANDREA PINTO PINZON
SILVANA DANIELA REYES GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2012

**BALANCE DE LÍNEA EN UN PROCESO CON MÁQUINAS
SEMIAUTOMÁTICAS**

**JESSICA ANDREA PINTO PINZÓN
SILVANA DANIELA REYES GONZALEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera industrial**

**Director
NÉSTOR RAÚL ORTIZ PIMIENTO
Ingeniero industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
INGENIERIA INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2012**

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al grupo OPALO por brindarnos la oportunidad de ser parte de él, realizando un proyecto que satisfaga las necesidades de investigación de su línea de optimización.

A nuestro director de grado Néstor Raúl Ortiz que estuvo acompañándonos en todas las etapas del proyecto, brindándonos su conocimiento, correcciones y guiándonos en los momentos de dudas.

Al profesor Fabio González que nos colaboró en el ingreso a la empresa DANA TRANSEJES en donde se realizó un caso para la aplicación del modelo construido y a John Barrera, Néstor y Edgar Ferreira, en el acompañamiento mientras estuvimos en la planta.

A nuestros amigos por apoyarnos y animarnos en todo momento, con los cuales compartimos los mejores momentos durante la carrera.

A la escuela de estudios industriales que fue nuestra segunda casa en donde junto con los profesores ayudaron en la formación para ser excelentes profesionales.

DEDICATORIA

A mis padres por ser las personas más importantes en mi vida, por su amor incondicional, por ser mi apoyo en todo momento y en esta etapa que con este proyecto culmina deseo brindarles la felicidad de compartir este éxito conmigo y agradecerles todo lo que me han enseñado, su dedicación y la confianza que siempre han tenido en mí.

A mis amigos que han sido como mi familia, por todos los momentos compartidos juntos, por estar ahí cuando más los he necesitado, por acompañarme en la realización de este proyecto, apoyando, guiándome y motivándome cuando surgían problemas. Gracias por esa bella amistad que me han brindado y que permanecerá en el tiempo.

DANIELA REYES GONZALEZ

A mis padres por ese incondicional apoyo que me dieron durante toda mi carrera, por creer en mí, por todos los esfuerzos que hicieron por mí para convertirme en la persona que soy hoy, y por todo ese amor y consejos que en todo momento me brindan, no se imaginan cuanto los quiero y les dedico este gran triunfo.

A mi hermanito por tantos momentos hermosos compartidos, porque confía en mí y siempre ha estado orgulloso de mí.

A mi familia, amigos y Elkin, por todos esos momentos maravillosos que hemos compartido, y por todo el apoyo brindado; los quiero mucho.

A mi nono Jorge, por ser el nono más maravilloso, por ese apoyo incondicional y por tantos consejos valiosos que me has dado.

JESSICA ANDREA PINTO PINZÓN

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	19
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.3 JUSTIFICACIÓN	19
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	20
2. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 LÍNEAS DE MONTAJE.....	23
2.1.1 Clasificación según la arquitectura de la línea.....	25
2.1.2 Clasificación según el flujo de la pieza	27
2.1.3 Clasificación según características de las tareas.....	28
2.1.4 Clasificación según la disciplina de entrada de las piezas.....	28
2.1.5 Clasificación según la clase de operador.....	28
2.2 PROBLEMA DE BALANCE O EQUILIBRADO DE LÍNEA	29
2.2.1 Clasificación de los problemas SALB	30
2.2.2 Clasificación de los GALBP	31
2.2.3 Métodos utilizados para resolver el problema de balance de línea	32
2.3 BALANCE DE CARGA.....	34
2.3.1 Diagrama hombre-máquina.....	37
3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROBLEMA	39
3.1 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	41
4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
4.1 LA FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	42
4.2 PROGRAMACIÓN DEL MODELO EN GAMS.....	43
4.3 DISEÑO DE CASOS Y CASO REAL	43
4.4 COMPARACIÓN DE SOLUCIONES ENTRE EL MÉTODO HEURÍSTICO Y EL MODELO EN PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA.....	44
4.5 RESULTADOS Y ANALISIS.....	44
5. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	45

6. PROGRAMACIÓN DEL MODELO	51
6.1 CÁLCULO DE DATOS EN EXCEL	51
6.2 MODELADO EN GAMS.....	52
6.2.1 Modelado de balance de línea en GAMS.....	55
6.2.2 Modelado de balance de carga en GAMS.....	57
7. APLICACIÓN DEL MODELO	61
8. ANALISIS DE LOS CASOS	73
9. CONCLUSIONES	77
10. RECOMENDACIONES.....	79
11. BIBLIOGRAFÍA.....	80
12. ANEXOS	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos cumplidos	14
Tabla 2. Ecuaciones del balance de línea	56
Tabla 3. Ecuaciones para el balance de carga	57
Tabla 4. Tiempos caso aleatorio	62
Tabla 5. Diferencia entre las funciones objetivos	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los tipos de línea según Backer y Scholl.....	24
Figura 2. Línea de ensamble con estaciones en serie	25
Figura 3. Línea de ensamble con estaciones en paralelo	26
Figura 4. Línea de ensamble con estaciones en forma de U	26
Figura 5. Línea de ensamble de dos lados	27
Figura 6. Clasificación del problema SALBP	30
Figura 7. Foto del modelo en GAMS.....	58
Figura 8. Excel caso aleatorio.....	62
Figura 9. Asignación caso aleatorio	64
Figura 10 Diagrama de Hombre-Máquina Caso 2	66
Figura 11. Tiempos de la línea de tulipas referencia AMAZON	69
Figura 12. Excel Caso real.....	70
figura 13. Asignación de operarios de la línea de tulipas DANA Transejes	72

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A Casos generados aleatoriamente para la aplicación del modelo.....	84
ANEXO B Manual para el manejo del modelo matemático: Balance de línea en procesos con máquinas semiautomáticas en GAMS y con vinculación con EXCEL.....	128

Tabla 1. Objetivos cumplidos

TABLA DE OBJETIVO CUMPLIDO	
OBJETIVO	NUMERAL EN DONDE SE CUMPLE ESTE OBJETIVO
<ul style="list-style-type: none"> • Profundizar sobre el tema de balance de línea y la nivelación de la carga de los operarios. 	Este objetivo se cumple en el numeral 2 MARCO TEÓRICO, del presente proyecto.
<ul style="list-style-type: none"> • Establecer los parámetros y variables específicos que caracterizan el problema bajo estudio. 	Este objetivo se cumple en el numeral 5 FORMULACION DEL MODELO MATEMATICO, del presente proyecto.
<ul style="list-style-type: none"> • Plantear un modelo matemático a través de la programación lineal entera mixta que cumpla con el objetivo de balance de línea y balance de carga para un proceso con máquinas semiautomáticas que produce un solo tipo de producto. 	Este objetivo se cumple en el numeral 5 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO, del presente proyecto.
<ul style="list-style-type: none"> • Resolver el modelo anteriormente planteado mediante el lenguaje de modelado GAMS. 	Este objetivo se cumple en el numeral 6 PROGRAMACIÓN DEL MODELO, del presente proyecto.

Fuente: Autores

RESUMEN

TÍTULO: BALANCE DE LÍNEA EN UN PROCESO CON MÁQUINAS SEMIATOMÁTICAS*

AUTORES: JESSICA ANDREA PINTO PINZÓN. SILVANA DANIELA REYES GONZALEZ**

PALABRAS CLAVES: Tiempo de ciclo, carga de trabajo, tiempo inactivo, tiempo interno, tiempo externo, SALBP

CONTENIDO

Este proyecto de grado muestra una alternativa de solución a través de la programación lineal entera mixta modelada en el lenguaje GAMS con vinculación en Excel, para el problema del balance de línea con máquinas semiautomáticas en un proceso productivo. En este caso se maneja el problema más sencillo, un SALBP (simple assembly line balancing problem), en donde una línea de tipo serial produce un gran lote (una sola referencia), que requiere una sola operación en cada tipo de máquina. Los datos requeridos para la construcción del modelo son la demanda, los tipos de máquinas utilizadas y sus respectivos tiempos, tanto los internos (tiempo de trabajo de la maquina), como los externos (tiempos de carga y descarga), con los que se obtendrá el número óptimo de operarios y máquinas requeridas. Estos últimos datos suplirán al modelo, que resolverá el problema híbrido entre el balance de línea y el balance de carga de operarios. Esta nueva técnica de solución fue contrastada con la heurística que la ingeniería de métodos usa para hacer la asignación de máquinas a los operarios teniendo en cuenta el tiempo de ciclo y la cual muestra los tiempos ociosos de los operarios y las máquina (Diagrama hombre-máquina).

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Industrial, Magister Néstor Raúl Ortiz Pimiento.

ABSTRACT

TITLE: LINE BALANCING IN A PROCESS WITH SEMI-AUTOMATIC MACHINES*

AUTHORS: JESSICA ANDREA PINTO PINZÓN AND SILVANA DANIELA REYES GONZALEZ**

KEYWORDS: Cycle time, workload, idle time, internal time, external time, SALBP

CONTENT

This thesis presents a new alternative to solve the line balancing with semi-automatic machines problem in a productive process, through mixed integer linear programming modeled in the GAMS language with a link to Excel. This case is handled with a simple problem, a SALBP (simple assembly line balancing problem), where there is a serial line that produces a large batch (only one reference), which requires a single operation on each type of machine. The data required for the construction of the model are the demand, the types of machines, and their respective times: the internal time (machine's working time) as well as the external one (load-unload time). Using those, the optimal required number of operators and machines can be obtained, then this new data is supplied to the model which will solve the hybrid problem between the line balancing problem and operator load balancing problem. This new solution technique was compared with the heuristic that is used by engineering methods for the allocation of machines to operators considering the cycle time which shows the idle time of operators and machines (Man-machine diagram).

* Graduation Project.

** Faculty of Physical – Mechanical Engineering, Industrial Engineering School, MSc. Néstor Raúl Ortiz Pimiento.

INTRODUCCIÓN

El problema del balance de línea es un tema que ha sido ampliamente tratado desde hace muchos años, por tener un gran impacto en los sistemas productivos y traer consigo beneficios como la minimización de costos y tiempos. Este problema consiste básicamente en la asignación de tareas a los centros de trabajo, en las que se debe respetar las condiciones de precedencia y las demás restricciones que se planteen en el sistema, todo esto con el objetivo de optimizar la función objetivo, que puede variar de acuerdo a las relaciones establecidas entre el tiempo de ciclo y el número de estaciones, satisfaciendo ciertas condiciones de equilibrio de la carga de trabajo de los operarios y el cumplimiento de la demanda.

Los objetivos al balancear una línea de producción son variados y contemplan la minimización de tiempos, el balance de la carga de trabajo, la minimización de los costos y/o maximizar utilidades. En este proyecto se trabaja un híbrido entre el problema del balance de línea y el problema del balance de carga de los operarios en un proceso con máquinas semiautomáticas, un tema muy importante que poco se ha trabajado, por ello se desea aportar una solución a través de la programación lineal entera mixta, con ayuda del lenguaje GAMS. Lo mencionado anteriormente hace que esta tesis sirva como información base para investigaciones posteriores en donde se realicen variaciones a las características básicas del problema y además se evalúe la posibilidad de emplear otros métodos de solución alternativos.

En este proyecto se presenta el marco teórico donde se conceptualiza la línea de ensamble, los métodos de solución exactos para el problema de balance de línea, el problema del balance de carga de los operarios y un método heurístico que emplea el tradicional diagrama de actividades múltiples para solucionar el problema de balance de línea con máquinas semiautomáticas.

Luego se describen las características particulares del problema, la metodología utilizada, la construcción del modelo matemático con sus respectivas variables de decisión, su función objetivo y sus restricciones. Posteriormente se resuelven y comparan las soluciones de 10 casos de estudio ficticios y para un caso real, empleando el modelo diseñado y el método heurístico

Como conclusión general, se demuestra que además de encontrar una mejor solución, el modelo diseñado facilita la obtención de resultados, sin cálculos tediosos cuando manejan problemas de mayor magnitud y se pueden evitar posibles errores al realizar el diagrama hombre-máquina.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Construir un modelo matemático a través de la programación lineal entera mixta para resolver el problema de balance de línea con un solo producto y operaciones que requieren máquinas semiautomáticas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Profundizar sobre el tema de balance de línea y la nivelación de la carga de los operarios.
- Establecer los parámetros y variables específicos que caracterizan el problema bajo estudio.
- Plantear un modelo matemático a través de la programación lineal entera mixta que cumpla con el objetivo de balance de línea y balance de carga para un proceso con máquinas semiautomáticas que produce un solo tipo de producto.
- Resolver el modelo anteriormente planteado mediante el lenguaje de modelado GAMS.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El balance de línea es un tema importante si se desea lograr el aprovechamiento al máximo de los recursos que intervienen en su proceso productivo (maquinaria y

mano de obra) para disminuir significativamente el tiempo ocioso, que implica disminuciones en costos y manejo de un buen ambiente de trabajo, ya que las diferencias entre la carga de trabajo en los operarios es mínima.

Por otra parte, este trabajo de grado representa avance en el estudio de la línea de optimización del grupo OPALO, ya que se proporcionará nuevo conocimiento sobre el balance de línea de máquinas semiautomáticas, y su información servirá como base para futuras investigaciones, en búsqueda de posteriores aplicaciones prácticas en el sector real, publicaciones en artículos y libros, lo cual genera desarrollo y reconocimiento para el grupo OPALO.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

Con la realización del proyecto se pretende contribuir a la investigación del grupo OPALO proporcionando como resultado:

- La formulación del problema de balance de línea con máquinas semiautomáticas para un tipo de producto a través de la programación lineal entera mixta.
- La programación del modelo obtenido anteriormente a través del lenguaje GAMS en el cual se podrá obtener datos como el tiempo de ciclo del sistema, carga externa por cada tipo de máquina, unidades de producto a programar, la asignación de cada operario, la diferencia de carga entre los operarios, entre otras variables relevantes de este problema.
- Una serie de resultados arrojados por el modelo para un grupo de casos, los cuales son analizados y servirán de base para las posteriores conclusiones.

- Un artículo publicable sobre el tema tratado de acuerdo a los parámetros exigidos por revistas como UIS ingenierías, revista DYNA (de la universidad nacional de Medellín) o revista UTP (de la universidad tecnológica de Pereira).
- Un documento final en donde se recopile toda la información obtenida con el proyecto además de un marco teórico del problema de balance de línea, sus variantes de acuerdo a su función objetivo, balance de carga de trabajo de los operarios, acompañado de sus respectivas revisiones bibliográficas y el algoritmo de solución del problema de balance de línea de procesos con máquinas semiautomáticas.

2. MARCO TEÓRICO

Para una mejor comprensión del problema que trata este proyecto, es importante comenzar mostrando los conceptos más significativos del balance de línea, como por ejemplo la línea de montaje y sus diferentes clasificaciones, el balance de línea y sus variaciones de acuerdo a la función objetivo que se proponga, el tiempo de ciclo, la carga de trabajo, el tiempo ocioso, entre otros; la diferencia entre un proceso de manufactura que utiliza máquinas automáticas a uno con máquinas semiautomáticas y los tipos de métodos existentes que hay para resolver problemas de optimización.

Como se mencionó anteriormente es elemental tener clara la distinción entre los tipos de máquinas que pueden existir dentro de un proceso productivo, las cuales se pueden clasificar en 3 tipos: aquellas que requieren de mando manual en donde el hombre domina el proceso, las semiautomáticas y las automáticas.

Según Vila¹ las máquinas manuales son aquellas que trabajan con la necesidad de la continua presencia y control de las personas, en este tipo de máquinas no hay motor y se accionan sus mecanismos al recibir fuerza externas. Las máquinas semiautomáticas si tienen un tiempo de procesamiento automático acompañado del tiempo de maquinado manual para cumplir a cabalidad el ciclo de la máquina, y por último las máquinas automáticas, trabajan sin necesitar la continua presencia y control de las personas. Las CNC (máquinas de control numérico computarizado) contienen un programa en el cual se les indica lo que se quiere hacer a través de unas instrucciones con su respectivo lenguaje.

¹ Imma Ribas Vila, Ramon companys pascual, programación de la producción en un sistemas flowshop hibrido sin esperas y tiempos de preparación dependientes de la secuencia, Departament d'Organització d'Empreses. Escola técnica superior d'Enginyers Industrials de Barcelona, Barcelona del 2006

2.1 LÍNEAS DE MONTAJE

El concepto de líneas de montajes fue utilizado en 1799 por primera vez en Estados Unidos. La línea de ensamble básica permite ensamblar una serie de componentes para elaborar un producto y consta fundamentalmente de estaciones de trabajo que pueden ser variables o fijas, a las cuales se les asigna un grupo de tareas que tienen un tiempo de duración establecido con unas relaciones de precedencia entre ellas.

Dentro de una línea de ensamble se manejan algunos conceptos que la caracterizan como lo son: **tarea**, que se refiere al conjunto de elementos indivisibles que componen una unidad de trabajo, los cuales a su vez componen el trabajo total para la elaboración de un producto y el lugar donde se llevan a cabo estas tareas en una línea de ensamble es conocido como **estación**. Estas estaciones o centros de trabajo pueden tener algún grado de automatización, ser totalmente manuales o totalmente automatizadas.

El tiempo en cada estación, es la suma de los tiempos requeridos para ejecutar todas las tareas asignadas a la estación, y a este conjunto de tareas asignadas se les llama **carga de trabajo**.

Las **relaciones de precedencia** son una serie de restricciones que establecen el orden en que deben llevarse las operaciones en la línea, es decir que una tarea no puede ejecutarse hasta que la anterior termine.

Otros importantes conceptos a definir y que son de gran utilidad para el desarrollo del proyecto son el tiempo de ciclo, takt time y tiempo ocioso o tiempo inactivo. El **tiempo de ciclo** es el tiempo que transcurre entre la producción de dos unidades consecutivas, El **takt time** corresponde al “ritmo” en el que se debe producir para cumplir con la demanda. Éste se obtiene al dividir el tiempo disponible para la producción entre la demanda de los clientes en ese mismo periodo de tiempo. Por su parte el **tiempo ocioso** es el tiempo en que una estación de la línea de

ensamble se encuentra libre, es decir la diferencia entre el tiempo de ciclo y el tiempo de la estación. También se presenta tiempo ocioso en los operarios cuando éstos se encuentran libres sin ninguna operación a realizar; éste se obtiene de la diferencia del tiempo de ciclo de la línea de producción y el tiempo que trabajó el operario en sus tareas.

Las líneas de montaje pueden ser clasificadas de acuerdo a distintos conceptos según Backer y Scholl (2006) como su arquitectura, la duración de las tareas, el flujo de la pieza, el tipo de operador y la disciplina de entrada de las piezas, como se puede apreciar en la figura 1.

Figura 1. Clasificación de los tipos de línea según Backer y Scholl



Fuente: Master thesis, “Exposición y resolución del caso Multi-Min-Max en el problema de equilibrado de líneas de Montaje”, Sentinella Ribas Carles y Solsona Clapés Jordi, España noviembre 2005. 13p

2.1.1 Clasificación según la arquitectura de la línea

Según su arquitectura, se presentan cuatro tipos de líneas de montaje: en serie, en paralelo, en U y de dos lados.

En la línea de montaje **en serie**, las estaciones están ubicadas en forma secuencial como se muestra en la figura 2. Para pasar de una estación a la siguiente se utiliza algún tipo de mecanismo, generalmente la cinta transportadora.

Figura 2. Línea de ensamble con estaciones en serie



Fuente. Autor

En la *ilustración 2* se muestran un ejemplo de una línea de 5 estaciones en serie (A, B, C, D, E)

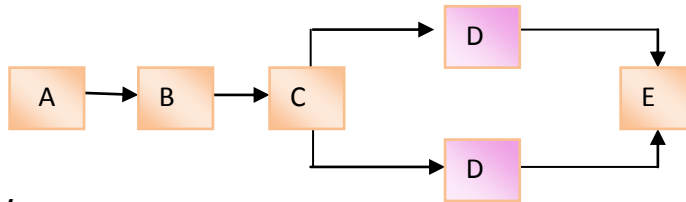
Este tipo de líneas son poco flexibles cuando se quieren hacer cambios de la capacidad o para generar una variedad de productos. Por otra parte, el mantenimiento preventivo es muy importante ya que con esto se evitan posibles inconvenientes en las estaciones, lo que causaría graves problemas a la empresa porque si se detiene una de las estaciones se detiene todo la línea de producción.

Las líneas de montaje con estaciones **en paralelo**, poseen como mínimo de dos estaciones iguales que realizan paralelamente las mismas tareas.

Cuando la duración de alguna de las tareas es mayor que el takt time, es más utilizado este tipo de línea, ya que entonces el valor promedio de la duración de la tarea se reduce proporcionalmente al número de estaciones.

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de una línea de ensamble con 2 estaciones en paralelo.

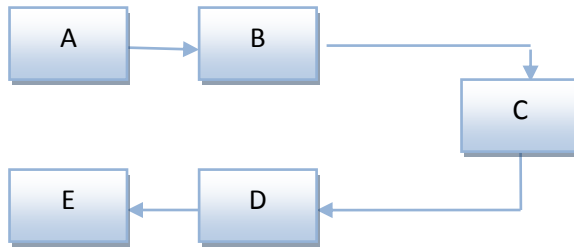
Figura 3. Línea de ensamble con estaciones en paralelo



Fuente: Autores

La línea de montaje con estaciones de forma **en U**, se caracteriza por estar el comienzo y el final cerca, en forma de U, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Línea de ensamble con estaciones en forma de U



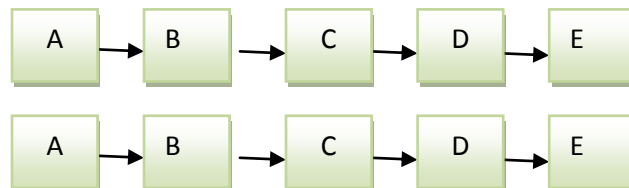
Fuente: Autores

Su ventaja principal consiste en rebalancear las cargas de trabajo sin necesitar cambios en la planta física, pero para lograrlo, es requisito contar con empleados multifuncionales, ya que pueden manejar varias estaciones.

Finalmente, las líneas de montaje **de dos lados** son aquellas que están compuestas por dos líneas seriales ubicadas una a la otra en paralelo como se puede observar en la Figura 5; es decir cada estación tiene su opuesta al otro lado que pueden procesar simultáneamente una pieza, por ejemplo en la industria

automovilística, mientras se ensambla la puerta derecha se puede estar ensamblado la izquierda o así mismo ruedas espejos, etc.

Figura 5. Línea de ensamble de dos lados



Fuente: Autores

Esta la figura 5, muestra dos líneas en serie ubicadas en paralelo en donde hay 5 estaciones (A,B,C,D,E), en donde se pueden realizar ya sean operaciones opuestas o complementarias que trabajen el mismo producto al tiempo.

2.1.2 Clasificación según el flujo de la pieza

Según el flujo de piezas se pueden presentar tres tipos de líneas de montaje: las sincrónicas, asincrónicas y de alimentación. Las líneas de montaje **sincrónicas**, son aquellas en donde el tiempo de ciclo de todas las estaciones es el mismo y por lo tanto todas las piezas pasan de una estación a otra al mismo tiempo. Las **asincrónicas** se presentan cuando las estaciones tienen velocidades de proceso diferentes, y las líneas de **alimentación** aquellas en las que se realizan sub-ensambles, las cuales producen algún tipo de producto intermedio que después alimenta a la línea principal.

Los tipos de líneas montaje también se pueden clasificar según los productos que se elaboren: las **simples** se caracterizan por procesar un único tipo de producto, y las tareas que se realizan en las estaciones son repetitivas, las **líneas mixtas** se elaboran productos con variaciones pequeñas, y las operaciones que se realizan

son similares en cada una de las variaciones del producto principal, razón por la cual no se requiere tiempos de preparación y las **líneas multi-modelo** es aquella donde los procesos de producción varían entre un modelo y otro, se organiza la producción en lotes de producto, y por este motivo, requieren tiempos de preparación de la línea para cambiar de un producto a otro.

2.1.3 Clasificación según características de las tareas

En las líneas de ensamble según la duración de la tarea, se encuentran las líneas de montaje **determinísticas**, en donde todos los tiempos de proceso de las tareas son conocidos con certeza, las **estocásticas** en donde es aleatoria la duración de una o más tareas, y las **dependientes** en donde el tiempo de duración de una tarea depende del tipo de estación a la que ha sido asignada, del tipo de operador o de la secuencia.

2.1.4 Clasificación según la disciplina de entrada de las piezas

Según la disciplina de entrada de las piezas a la línea, se encuentran las líneas de montaje en líneas **de entrada fija** que se caracteriza porque las piezas llegan en intervalos regulares, y las **líneas de entrada variable** que es lo contrario, la tasa de entrada de las piezas a la línea es variable.

2.1.5 Clasificación según la clase de operador

Y por último se clasifican según el tipo de operador, que pueden ser de dos tipos. Las **líneas manuales**, si tienen operadores manuales, sean o no automatizadas,

y las **líneas robotizadas** que se caracterizan porque los operadores son robots y sus procesos son totalmente automatizados.

2.2 PROBLEMA DE BALANCE O EQUILIBRADO DE LÍNEA

El problema de balance de línea es un tema de gran importancia dentro de las empresas industriales, siendo objeto de múltiples investigaciones por diferentes autores a lo largo del tiempo.

El problema del balance de línea consiste en asignar operaciones a las estaciones de trabajo de tal manera que la suma del tiempo de las mismas no sobrepase el takt time, pero teniendo en cuenta que cada operación estará asignada a una sola estación y que se respeten una serie de restricciones ya sean de precedencia, incompatibilidad, o afinidad de las tareas. Usualmente este problema se aplica en línea de ensamble, sin embargo es igualmente útil al analizar líneas de producción.

La clasificación del problema **ALBP (Assembly Line Balancing Problem)** ha sido variada, una de ellas fue la realizada por Baybars (1986) en donde se establecen dos tipos de problemas: los **SALBP (Simple Assembly Line Balancing Problem)**, que son aquellos que incluyen los problemas de equilibrado más sencillos como las líneas simples en las cuales las tareas son indivisibles y una de sus restricciones son las relaciones de precedencia, además de características como las que se mencionan a continuación:

- ✓ Tienen tiempo de ciclo o número de estaciones fijas
- ✓ La organización del proceso según el flujo es en serie.
- ✓ Las tasas de entrada de las piezas a líneas es fija

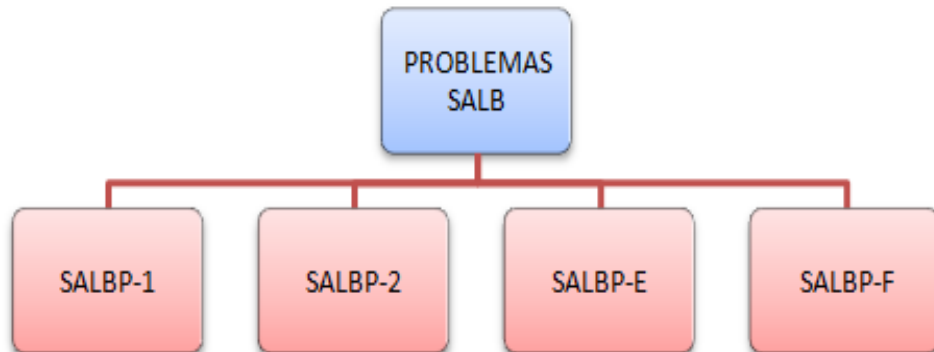
- ✓ Las estaciones están igualmente preparadas para realizar cualquiera de las tareas que componen el proceso de montaje del producto.

Y el otro tipo de problema son los **GALBP (General Assembly Line Balancing Problem)**, los cuales corresponden al resto de problemas de equilibrado de línea de montaje que no están dentro del grupo de los SALBP. Dentro de este grupo podemos encontrar los modelos mixtos, estaciones en paralelo, procesamientos alternativos, tiempo de procesos variables. Los GALBP son modelaciones de problemas más reales y usuales que los SALBP.

2.2.1 Clasificación de los problemas SALB

Los SALBP se pueden dividir en 4 subgrupos distintos, que comparten características comunes, como se muestra en la siguiente en la figura 6.

Figura 6. Clasificación del problema SALBP



Fuente: Autores

La descripción de estas subdivisiones del tipo de problema SALB es la siguiente:

SALBP-1: Busca minimizar el número de estaciones que se requiere para llevar a cabo el proceso, teniendo un tiempo de ciclo asignado. Es útil este tipo de problema cuando la demanda externa es posible ser estimada y se quiere instalar un nuevo sistema de montaje.

SALBP-2: Busca minimizar el tiempo de ciclo de la línea, partiendo de un número de estaciones fijo, es útil cuando la línea de montaje ya existe.

El modelo de SALBP-2, es el modelo de balance de línea que tiene mayor cercanía con las características del problema que se trabaja en este proyecto, por ello es una referencia importante para el modelo trabajado.

SALBP-E: Busca maximizar la eficiencia de la línea de montaje, mediante la minimización del producto del número de estaciones y el tiempo de ciclo.

SALBP-F: Busca una solución factible para una combinación cualquiera de tiempo de ciclo y número de estaciones, sin necesariamente minimizar o maximizar algún valor sino encontrar una solución.

2.2.2 Clasificación de los GALBP

Dentro de los problemas GALBP se encuentran 4 subtipos de problemas los cuales son: los UABP (*U-line Assembly Line Balancing Problem*), MALBP (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*), MOALBP (*Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem*), RALBP (*Robotic Assembly Line Balancing Problem*), los cuales se mencionan a continuación:

Los **UALBP (*U-line Assembly Line Balancing Problem*)**, son aquellos en donde su organización es de tipo en U, los operarios pueden manejar fácilmente más de una máquina, teniendo una mayor posibilidad de asignar tareas a las estaciones. Dentro de este grupo se dividen en 3 tipos de acuerdo a los objetivos. Los tipo 1, en donde se quiere minimizar el número de estaciones; los tipo 2, en donde se busca minimizar el tiempo de ciclo y los tipo E, en donde el objetivo es maximizar la eficiencia de la línea. Otros son los **MALBP (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*)**, son problemas de líneas que elaboran varias referencias de un mismo producto, pero estos subproductos (referencias) tienen tareas en común, por esto no se tienen en cuenta los tiempos de preparación de la línea. En estos problemas están también los tipo 1, 2 y E que se mencionaron anteriormente. Los **MOALBP (*Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem*)**, son utilizados para el equilibrado de líneas con objetivos múltiples, en los cuales se combinan los objetivos simultáneamente por ejemplo, minimizar el tiempo de ciclo, el costo y maximizar la eficiencia. Y por último los **RALBP (*Robotic Assembly Line Balancing Problem*)**, son aquellos que buscan balancear líneas robotizadas, en donde se optimice la asignación tanto de robots a las estaciones como la de las tareas a las estaciones.

2.2.3 Métodos utilizados para resolver el problema de balance de línea

El primero en hablar del problema SALBP (*simple assembly line balancing problem*) fue Salveson (1955), que consiste en asignar tareas a estaciones, de modo que se minimice el número que de éstas se requiere. Para esto propuso un conjunto de restricciones de precedencia entre las tareas que deben ser respetadas y se debe llevar a cabo cumpliendo que la suma de los tiempos de tarea no exceda el tiempo de ciclo en ninguna estación. El problema se formuló a

través de la programación lineal, en donde se incluyen todas las posibles combinaciones de asignación de estaciones.

Con posterioridad, otros investigadores ofrecieron sus aportaciones al estudio del tema, añadiendo nuevas características que no se habían tenido en cuenta en el trabajo de Salveson. Como por ejemplo, Jackson (1956) fue el primero en proponer un algoritmo para SALBP-1 utilizando la noción de un árbol mediante un método computacional.

Bowman (1960) fue el primero en proporcionar una restricción de no divisibilidad, al problema de SALBP-1, cambiando la formulación de programación lineal para un cero-uno de programación entera. White (1961) y Held et al. (1963), prosiguieron el trabajo intentando encontrar una solución óptima al problema del SALBP-1.

Helgeson (1961) propuso una de las primeras heurísticas, que fue la RPW (ranked positional weight). La idea principal de esta heurística era asignar primero las tareas que tenían las cadenas más largas de tareas sucesivas. La longitud de la cadena puede ser medida por el número de tareas sucesoras o por la suma de los tiempos de las tareas sucesoras. El procedimiento de esta heurística es simple pero da buenos resultados solo con problemas sencillos.

Arcus (1966) propuso la heurística COMSOAL (Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines). La idea básica es que este algoritmo genera aleatoriamente un número muy grande de soluciones factibles y selecciona la mejor opción con el mínimo número de estaciones.

Shtub (1990) propuso dos maneras de lidiar con la relación entre una tarea y las subtareas en las cuales la tarea es realizada. El primero se propone para minimizar el número de subtareas manejados en cada estación. La segunda manera limita el número de subtareas por cada estación. El método es aplicado a SALBP-1 Y SALBP-2.

Agnētis y Arbib (1997) direccionaron el problema de asignación y secuenciación de tareas a estaciones con un método que es limitado a un solo tipo de producto y es basado en la técnica de la programación dinámica, con el objetivo de minimizar los costos de inventario o los tiempos de terminación de un grupo de trabajos idénticos.

2.3 BALANCE DE CARGA

Uno de los problemas que se encuentran con mayor frecuencia en las líneas de producción, es el desbalance en las cargas de trabajo y se ve reflejado cuando hay operarios sobrecargados mientras otros se encuentran ociosos; por tanto, para reducir este problema, el objetivo del balance de carga es disminuir este desbalance, dando cargas de trabajo similares a los operarios al asignarles un número de máquinas a trabajar, teniendo en cuenta las restricciones de máquinas disponibles y el tiempo del operario.

Por ser este un problema de gran importancia en la industria, se han hecho muchos estudios al respecto. En los inicios el problema era solo de asignar un operario a múltiple máquinas, en donde se determina primero el número óptimo de máquinas idénticas k , para luego ser establecidas a un operario. La primera vez que se trabajó fue de forma gráfica a través del diagrama de Gantt para hallar el tiempo de ciclo y con este valor se llevaba a 3 ecuaciones que a prueba y error se obtenía el resultado óptimo². El diagrama hombre-máquina fue hecho para determinar el mínimo número de máquinas manejadas al tiempo por un operario, las características que se asumen es que los tiempos son determinísticos, se produce un solo tipo de producto y aunque en sus inicios este

² Tomado de: The operator-machine assignment problem, A Quantitative Teaching Note for Operations Management. Edward F. Stafford, 2007

método se realizaba para máquinas iguales, posteriormente fue extendido para varios operarios y varios tipos de máquinas. Más adelante en el numeral en el numeral... 2.3.1... se describe detalladamente esta metodología.

Fetter (1955), Killginback (1964) y Miller y Berry (1974), proporcionaron métodos para asignar máquinas a operarios, con tiempos determinísticos para el cargue, descargue y procesamiento de productos en máquinas semiautomáticas. Stecke y Aronson (1985), hicieron una revisión de modelos de interferencia operario-máquina y describieron futuras aplicaciones de modelos de interferencia en la robótica y sistemas de manufactura flexible. La interferencia se refiere a la ociosidad de máquina que es causada por un operador que atiende varias máquinas, lo que se relaciona con la baja productividad en un sistema productivo generando un gran problema para las empresas. La mayoría de estos modelos están diseñados para minimizar el costo de de esta interferencia o disminuir estos tiempos ociosos. Kolumas y Smith (1988) y Kolumas en (1922), consideraron el problema de la programación de dos o más máquinas semiautomáticas en paralelo que comparten el mismo operador, con el objetivo de minimizar el tiempo de inactividad de la máquina que resulta de la falta de disponibilidad del operario, ya que las máquinas requieren atención periódica por parte del operario debido a una avería o la carga y descarga.

Sin embargo, el objetivo de estas investigaciones se basó en reducir al mínimo la interferencia sin tener en cuenta la carga de trabajo del operador, ya que consideraron un solo operario. Pero otro punto de vista relacionado con la situación considerada, es el equilibrio carga de trabajo, porque es importante mirar la forma en que se distribuyen los trabajos y las máquinas a cada operario para que no se presente un desequilibrio de la carga de trabajo entre los operarios y así puedan trabajar por igual y no hayan quejas por parte de ellos. Ahora se presentan algunas investigaciones que tienen en cuenta el equilibrio de carga de trabajo, que es el propósito de este proyecto.

Ram Rachamadugu y Brian Talbot (1991) plantearon un nuevo procedimiento que rebalancea proporcionando una solución para nivelar la asignación de tareas, para igualar la asignación de las cargas de trabajo en las líneas de ensamble. Chu and Lin y Grandzol an Traae (1993) estudiaron cual era la mejor forma de asignarle a los operarios las tareas, cuando la capacidad de trabajo de los operarios es diferente. Young Ju Kim, Yeo Keun Kim y Yongkyun Cho (1997) del departamento de ingeniería industria de la universidad nacional de Chonnan y del departamento de ciencia de la computación de la Universidad Chodang de la República de Corea, los cuales establecieron una heurística basada en un algoritmo genético para suavizar la carga en las líneas de ensamble, es decir distribuir la carga de trabajo de manera uniforme a las estaciones de trabajo.

El problema de balance de carga con máquinas semiautomáticas no ha sido tratado ampliamente y por eso vale la pena mencionar el estudio que se hizo en el Departamento de Ingeniería Industrial y Sistemas, por Dug Hee Moon, Dae Kyoung Kim, Jong Yun Jung (2004), en la universidad nacional de Changwon, Corea del sur; quienes propusieron un método exacto para balancear la carga de trabajo de los operarios en una celda de máquinas semiautomáticas en paralelo.

El problema consiste en el equilibrio de carga entre los operarios con dos tipos de máquinas semiautomáticas en paralelo. Se supone que las máquinas se asignan a un operario, la celda se adapta a la producción por lotes y el objetivo es asignar los trabajos a las máquinas adecuadas y asignar las máquinas a los operarios para minimizar el desequilibrio de la carga de trabajo entre los operarios bajo los límites de máquina-tiempo de operario disponible.

Plantearon restricciones tales como que el trabajo total por tipo de máquina y la carga de trabajo total por operario, no supere el tiempo disponible en el día de trabajo, un trabajo debe ser asignado a una sola máquina de su propio tipo, una máquina debe ser asignada a un solo operario, que cada trabajo debe ser

asignado a una máquina y cada máquina produce por lo menos un trabajo y cada operario maneja al menos una máquina.

Andreas C. Nearchou (2011) utilizó el PSO (*particle swarm optimization*) uno de los heurísticos más recientes desarrollados que pocas veces han sido aplicados en producción y problemas de optimización, para maximizar la tasa de producción y el suavizado de la carga de trabajo en las líneas de montaje sencillas (SALBP).

2.3.1 Diagrama hombre-máquina

Este es el método más utilizado cuando se quiere asignar operarios y ver los tiempos inactivos en procesos con máquinas semiautomáticas; por tanto, es importante saber de qué se trata y en qué consiste su método de solución.

Este diagrama es útil en aquellas situaciones en que uno o varios operarios manipulan una o varias máquinas. Tiene como propósito identificar tiempos inactivos en el operario o en las máquinas, lo cual sirve de base para optimizar la asignación del trabajo.

A fin de visualizar las actividades de operarios y máquinas, cada uno de ellos es representado por medio de una columna que a la vez va a indicar el tiempo requerido para llevar a cabo cada tarea.

Como aclaración de este diagrama se debe emplear la misma escala tanto para operarios como para las máquinas, para que se pueda observar la correlación entre estos elementos; por esto las columnas deben ubicar frente a frente.

Como el diagrama se elabora para un ciclo de producción, se presenta a continuación su definición:

“Un ciclo de producción es el conjunto de actividades que se repiten durante la jornada de trabajo. Durante un ciclo se

elabora una unidad de producción; dicha unidad de producción no es necesariamente una unidad de producto, ya que es posible que un ciclo se produzca 8 piezas a la vez”³.

Las actividades o tareas que se muestran en el diagrama se pueden clasificar así:

- ✓ Tiempo externo: corresponde al trabajo que el operario tiene que hacer sobre la máquina como por ejemplo el montaje, la puesta en marcha, el desmontaje, etc.
- ✓ Tiempo interno: es el trabajo propio de la máquina (proceso automático) o el operario (otras actividades que no involucra maquina).
- ✓ Tiempo inactivo: es el tiempo libre que le puede quedar a un operario o a una máquina durante un ciclo de trabajo.

En este proyecto de grado, se agregó un cálculo más a esta heurística para poder comparar los resultados de los casos programados en GAMS. Se va a comparar la función objetivo del balance de carga del modelo matemático, con una que se va a obtener del diagrama restando la carga de trabajo mayor de un operario con la carga de trabajo más pequeña entre los operarios. Esta comparación es muy interesante, ya que esta heurística solo asigna a los operarios de una forma que sea factible para el problema, donde no se sobrepase el tiempo de ciclo.

³ ORTIZ PIMIENTO, Néstor Raúl. Análisis y mejoramiento de los procesos de la empresa. Colombia, 1999. 95p

3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROBLEMA

En el grupo OPALO se propuso trabajar para el proyecto de grado resolver el siguiente interrogante ¿Es posible la asignación óptima de los recursos de producción (máquinas semiautomáticas y operarios) de tal forma que se satisfagan ciertas condiciones relacionadas con el equilibrio de la carga de trabajo de los operarios y cumplimiento de la demanda?

Cuando se habla de líneas de ensamble, se hace referencia a Centros de Trabajo organizados secuencialmente, en donde se ejecutan operaciones manuales o automatizadas para la fabricación de un producto, teniendo en cuenta la precedencia de dichas operaciones. El problema en líneas de ensamble consiste en encontrar la mejor manera de asignar las operaciones a los operarios o robots, de tal forma que se satisfagan ciertas condiciones como el tiempo de ciclo, número de Centros de Trabajo, entre otros.

Pero cabe resaltar que este problema no es exclusivo de líneas de ensamble, ya que es extensivo a procesos de transformación. Cada operación puede corresponder a un recurso de producción (por ejemplo una máquina), y se analiza en la gran mayoría de casos para configuraciones de proceso continuos, aunque es válido también el análisis para procesos intermitentes con configuraciones en línea.

En revisiones bibliográficas realizadas se pudo observar que la totalidad de los aportes investigativos han resuelto el problema considerando únicamente líneas de producción cuyas operaciones exigen dedicación total por parte de los operadores o robots. En otras palabras, si a un operario se le asignan varias operaciones (y cada Operación debe realizarse en una máquina diferente), entonces el tiempo de ocupación del operario (por ciclo) sería exactamente igual a la suma del tiempo de procesamiento de las máquinas que tenga a su cargo (por

ciclo). Sin embargo, si las máquinas son semiautomáticas, el tiempo dedicado por el operario en cada ciclo de trabajo no sería igual al tiempo de procesamiento de las máquinas que tiene a su cargo. Esta situación se debe a que las máquinas semiautomáticas poseen tres elementos fundamentales: Cargar el producto en la máquina (Montaje), Procesar automáticamente el producto (Trabajo Interno de la máquina), y Descargar del producto de la máquina (Desmontaje); de tal forma que el operario solo interviene en el Montaje y Desmontaje del producto, el resto del tiempo es tiempo inactivo.

Como ya se dijo, el balance óptimo de una línea de producción puede determinarse empleando algoritmos exactos o metaheurísticos; éstos mismos algoritmos pueden utilizarse en el caso de máquinas semiautomáticas, sin embargo, en esta situación particular, no puede asegurarse que la solución obtenida sea óptima, ya que los algoritmos actuales no consideran el trabajo intermitente del operario durante el ciclo de producción (ni su tiempo inactivo), y por lo tanto, existe la posibilidad de que la carga de trabajo de los operarios quede desbalanceada.

Debido a lo anterior, una mejor solución debe tender al aprovechamiento de ese tiempo inactivo del operario mediante la asignación de un mayor número de máquinas.

El análisis del trabajo con máquinas semiautomáticas es un tema clásico abordado desde la disciplina de ingeniería de métodos, en donde se busca asignar y nivelar la carga de trabajo de los operarios cuando trabajan con máquinas semiautomáticas (*“operator load-balancing problem”*), resolviéndolo tradicionalmente de manera heurística, por medio de gráficas conocidas como los diagramas hombre máquina (operator-machine chart) y/o los diagramas de actividades múltiples (*multiple activity chart*). Al trabajar simultáneamente estos dos problemas anteriores (*“Assembly Line Balancing Problem”* y *“operator load-*

balancing problem”) se obtuvo el problema base de investigación de este proyecto de grado.

3.1 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El problema del presente proyecto consistió en obtener la asignación óptima de los recursos de producción al trabajar con la programación lineal entera mixta en el balance de línea para un gran lote de producción (una sola referencia), que está compuesto por Q unidades de producto y cada unidad de producto requiere una sola operación en cada tipo de máquina.

El setup time no se tiene en cuenta porque aparece una sola vez cuando se procese todo el lote de producción, además a un operario se le pueden asignar varias máquinas iguales o diferentes (trabajadores polivalentes), pero cada máquina estará a cargo de un solo operario, y previamente se tienen establecidos el número óptimo de operarios y máquinas que cumplan el ritmo de la demanda.

Al modelar el problema, se obtuvieron:

- Dos funciones objetivo una referente al balance de línea y la otra para el balance de carga de los operarios.
- Un conjunto de restricciones básicas: un trabajo debe ser asignado a una sola máquina, una máquina debe ser asignado a un solo operador, guardar la precedencia de las tareas, cada operador maneja al menos una máquina, a un operario se le pueden asignar varias máquinas iguales o diferentes.
- Restricciones que evidencian el balance de línea como: la limitación del tiempo de ciclo en cada estación de trabajo y el cumplimiento de la demanda.

4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología utilizada para la investigación del problema de balance de línea en procesos con máquinas semiautomáticas se puede dividir en las siguientes etapas: formulación del modelo matemático, programación del modelo en GAMS, diseño de los casos aleatorios y caso real, comparación de soluciones entre el método heurístico y el modelo en Programación lineal entero mixto, resultados y análisis.

4.1 LA FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para la formulación del modelo matemático fue necesario realizar previamente una revisión bibliográfica de temas relacionados con las características del problema del presente proyecto de donde pudo definirse que el tipo de línea a trabajar corresponde al tipo serial, con tiempos determinísticos (externos e internos), máquinas semiautomáticas y para un solo tipo de producto. Se definió además que el SALBP-2 era el tipo de balance de línea que más se asemeja al problema bajo estudio. Se definió que el problema sería dividido en dos partes una que corresponde al balance de línea, en donde a través de Excel se hallan el número de máquinas y operarios para cumplir con una demanda dada, para posteriormente a través de un modelo matemático, minimizar el tiempo de ciclo de la línea de producción; y una segunda parte correspondería al balance de carga en donde se asignen las máquinas a los operarios cumpliendo con las restricciones de que la carga de cada operario no supere el tiempo de ciclo y minimizando la diferencia entre el operario con mayor carga y el de menor. Estas dos partes fueron formuladas a través de la programación lineal entera mixta.

4.2 PROGRAMACIÓN DEL MODELO EN GAMS

Este paso correspondió a programar el modelo en el lenguaje GAMS, creando algoritmos de solución para resolver problemas matemáticos. Este también fue realizado en dos partes (las mencionadas anteriormente) programando las variables, ecuaciones y restricciones para cada una. También se incluyeron unas instrucciones de tipo GDXXRW, para hacer la respectiva vinculación de los datos obtenidos en Excel con la entrada de datos al modelo en GAMS.

4.3 DISEÑO DE CASOS Y CASO REAL

La tercera etapa correspondió al diseño de los casos, en donde se decidió generar aleatoriamente 10 de ellos, basados en una distribución de probabilidad normal, además, se establecieron los rangos para los valores que serían generados como los de la demanda, número de tipos de máquina y los tiempos (externos e internos), los rangos se establecieron teniendo en cuenta datos teóricos que se encontraban en libros y ejemplos en otros estudios, ya que no se tiene conocimiento de cómo es el comportamiento de una línea en empresas reales. También se realizó un caso real, el cual sería llevado a cabo con datos de la empresa DANA Transejes, para lo cual fue necesario ir a la empresa y tomar los respectivos tiempos y datos de demanda, número de operarios que se encuentran en la línea, número de tipos de máquinas y número de máquinas por tipo para la línea de tulipas referencia AMAZON, para finalmente realizar una comparación entre el balance de línea que se tiene actualmente en la empresa y los resultados arrojados por el modelo realizado.

4.4 COMPARACIÓN DE SOLUCIONES ENTRE EL MÉTODO HEURÍSTICO Y EL MODELO EN PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

En esta etapa se confrontó las soluciones obtenidas a través del modelo de programación entero lineal mixto con los del método heurístico propuesto para la comparación, el diagrama Hombre-máquina. Para ello se debió establecer antes una fórmula que cumpliera el papel de “función objetivo” para los valores que proporcionaba el diagrama. Esta fórmula era la misma empleada por el modelo en programación lineal entera mixta, la cual consiste en restar el tiempo de ocupación del operario que posee la mayor carga de trabajo, con el tiempo de ocupación del operario que posee la menor carga de trabajo.

4.5 RESULTADOS Y ANALISIS

El análisis está basado en comparaciones entre las soluciones obtenidas por el método heurístico y el método exacto. Este análisis ha sido organizado en dos partes, La primera corresponde a los casos aleatorios y la segunda al caso de la empresa DANA transejes.

Este análisis ha sido fundamental para generar las conclusiones del proyecto y recomendaciones para futuros proyectos.

5. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático planteado se divide en cuatro partes: los datos de entrada necesarios para la formulación del modelo, la definición de las variables y sus respectivas unidades, la función objetivo y las restricciones.

Como se ha dicho anteriormente, se va a resolver un problema híbrido entre el balance de línea y el balance de carga, por lo tanto, el modelo se dividió en 2 partes; la primera consiste en las restricciones y función objetivo para realizar el balance de línea y la segunda parte para realizar el balance de carga de los operarios.

5.1 EL PROBLEMA

Se definen L tipos de máquina. El balance de línea debe realizarse para un gran lote de producción (una sola referencia). Un lote de producción está compuesto por una cantidad Q de unidades de producto. Cada unidad de producto requiere una sola operación en cada tipo de máquina. El setup time no se tiene en cuenta porque aparecerá una sola vez cuando se procese todo el lote de producción. A un operario se le pueden asignar varias máquinas iguales o diferentes (trabajadores polivalentes), pero cada máquina estará a cargo de un solo operario. Se asume que hay n operarios. En este modelo, i , j y k representan máquina, tipo de máquina y operario.

- **Balance de línea:**

En esta primera parte del modelo matemático donde se describe el balance de línea, es donde se hace la correcta asignación de unidades por máquina y teniendo en cuenta que la carga de trabajo por máquina no sobrepase el tiempo de ciclo.

El modelo necesita la entrada de algunos datos necesario como la demanda, denominada en este modelo con la letra D, es la cantidad de productos que el cliente requiere para satisfacer sus necesidades. Para este caso la demanda que se necesita es la suma de unidades que requieren los clientes de la empresa, específicamente la de una línea de producción. La demanda que requiere el modelo está expresada en unidades por hora.

El número total de tipos de máquinas de las que se compone la línea, denominado en este modelo con la letra I.

El modelo también contempla dos parámetros, el tiempo de trabajo interno de la máquina tipo j, denominado con la letra L(j), que es el tiempo de procesamiento propio de cada tipo de máquina y que está expresada en minutos. Y, el tiempo de trabajo externo de la máquina tipo j, denominado con la letra P(j), que es la suma del tiempo de carga y descarga por tipo de máquina y está expresada en minutos.

El modelo también requiere otros tres datos que se obtienen con cálculos, que en este proyecto, se extraen de una hoja de cálculo en Excel donde ya se programaron éstos.

Uno de los procesamientos de datos requeridos, es el takt time, que es el ritmo de la demanda y está expresada en minutos. Se denomina con la letra TT. Se establece a partir de la demanda, convirtiéndola en los minutos requeridos para producir una unidad.

Para hallar el número de operarios que se necesitan para satisfacer la demanda y compongan la línea, primero se necesita saber cuál es la capacidad de los operarios y éste se calcula de la siguiente forma:

$$C_{op} = \frac{60 \text{ min}}{\sum_{j=1}^l P(j)}$$

Cuando se tiene el valor de la capacidad se procede a hallar el número de operarios:

$$N = \frac{D}{C_{op}}$$

Y por último, éste resultado se redondea al entero mayor y así se establece el número de operarios que se requieren para cumplir la demanda. El número de operarios se denomina con la letra N.

Para hallar el número de máquinas por tipo, se necesita saber cuál es la capacidad por tipo de máquina y éste se calcula de la siguiente forma:

$$C_{m(j)} = \frac{60 \text{ min}}{(P(j) + L(j))}$$

Cuando se tiene el valor de la capacidad se procede a hallar el número de máquinas por tipo:

$$M(j) = \frac{D}{C_{m(j)}}$$

Y por último, éste resultado se redondea al entero mayor y así se establece el número de máquinas por tipo que se requieren para cumplir la demanda. El número de máquinas por tipo, se denomina con la letra M.

A continuación, se muestra la estructura del modelo matemático final para el problema del balance de línea. El objetivo, minimizar el tiempo de ciclo, asignando la cantidad correcta de unidades por máquina, como se ve en el numeral 1.

TC Tiempo de ciclo [minutos]

Wm (i, j) Carga externa por cada tipo de máquina [minutos]

Q (i, j) Unidades de producto a programar por ciclo en la i-ésima máquina tipo j [unidades]

QQ Unidades de producto por tipo de máquina [unidades]

$$\text{Min } Z = TC \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^m Q(i, j) = QQ \quad j = 1, 2, \dots, l \tag{2}$$

$$Q(i, j) * ((P(j) + L(j)) \leq TC \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, l \tag{3}$$

$$WM(i, j) = Q(i, j) * P(j) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, l \tag{4}$$

$$TC = TT * QQ \tag{5}$$

$$QQ \geq 1 \tag{6}$$

La restricción (2) es para que el número de unidades por tipo de máquina sea el mismo número de unidades en cada conjunto de máquinas por tipo de máquina (balance de unidades por tipo de máquina). La restricción (3) es para que el tiempo de carga en cada máquina del sistema no supere el tiempo de ciclo. La restricción (4) significa la carga externa por máquina, la restricción (5) indica que la tasa de producción del sistema debe ser igual o menor al takt time. Y la restricción (6) indica que las unidades en el sistema tienen que ser mayor a 1.

- Balance de carga de operarios:

La segunda parte del modelo, describe el balance de carga de los operarios, donde el objetivo es minimizar los desbalances en las cargas de trabajo en los operarios para disminuir el inconformismo entre los operarios y hacer la mejor asignación de máquinas a los operarios para disminuir los tiempos ociosos.

X (i, j, k) 1 si la i-ésima máquina tipo j es asignada al operario k, 0 de otra forma

Wm (i, j) Carga externa por cada tipo de máquina [minutos]

Wmop Carga de trabajo mínima de algún operario [minutos]

TC Carga de trabajo máxima de algún operario [minutos]

*En esta parte del modelo, la variable TC, comienza con el valor del tiempo de ciclo, siendo este el valor máximo de carga de trabajo que puede tener el operario, a medida que se va encontrando mejores soluciones para balancear la carga de trabajo esta puede ir disminuyendo.

La función objetivo es minimizar la diferencia entre carga de trabajo mayor de algún operario y la carga de trabajo menor de algún operario, es decir minimizar el desequilibrio de cargas de trabajo, como se ve en el numeral 1.

$$\text{Min } Z = TC - W_{mop} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^m WM(i,j) * X(i,j,k) \leq TC \quad k = 1,2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^m WM(i,j) * X(i,j,k) \geq W_{mop} \quad k = 1,2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^n X(i,j,k) = 1 \quad i = 1,2, \dots, m \quad j = 1,2, \dots, l \quad (4)$$

Las restricción (2) es para que el tiempo de carga en cada operario no supere el tiempo de ciclo del sistema, la restricción (3) significa que el tiempo de carga en cada operario supere el mínimo deseado, y por último la restricción (4) indica que cada máquina debe ser asignada a un solo operario.

6. PROGRAMACIÓN DEL MODELO

Para la programación del modelo matemático construido anteriormente se utilizó el lenguaje GAMS, el cual será mostrado detalladamente a continuación. Además, se utilizó Excel como herramienta de apoyo para el cálculo de algunos datos de entrada que requiere el programa, tales como número de máquinas, número de operarios y takt time. Esta herramienta está vinculada con GAMS lo cual hace el programa más eficiente ya que no se requiere copiar manualmente estos datos.

6.1 CÁLCULO DE DATOS EN EXCEL.

Excel requiere el ingreso de los siguientes valores para comenzar a correr el programa:

- ✓ Demanda: en unidades/hora
- ✓ Número de tipos de máquinas
- ✓ Tiempo interno de la maquina : en minutos
- ✓ Tiempo externo de la maquina: en minutos.

En el manual diseñado que se encuentra en el anexo A, se especifica claramente como es el manejo de Excel, que significa cada casilla y procedimientos a seguir para que el macro y las funciones que tiene corran correctamente

Con los valores ingresados mencionados anteriormente, EXCEL halla una serie de datos a través de las siguientes formulas:

- Capacidad por tipo de maquina= $\frac{60}{(\text{tiempo interno} + \text{tiempo externo de la maquina})}$
- Capacidad por tipo de maquina= unidades/hora
- Capacidad por operario= $\frac{60}{(\text{tiempo externo de la maquina})}$
- Capacidad por operario=unidades/hora
- Número de máquinas por tipo= $\frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidad de la maquina}}$
- Número de operarios= $\frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidad por operario}}$
- Tackt time= $\frac{60}{\text{Demanda}}$

Cuando EXCEL ha hallado esos datos los organiza en una tabla construida a través de un macro programado con VISUAL BASIC, estos datos serán utilizados en GAMS para los SET (I,) (J) y (K), para ello se utilizaron unas funciones que son especificadas en el manual. Los otros datos se toman de las casillas en donde EXCEL las calculó.

6.2 MODELADO EN GAMS

Con el modelo matemático construido se empezó a modelar en el lenguaje GAMS, el cual se encuentra dividido en los bloques de SETS, DATOS, VARIABLES,

ECUACIONES, MODELO, SOLUCION Y VISUALIZACION. A continuación se muestra como se estableció cada uno para el modelo, tanto para la primera y segunda etapa en la que se dividió el modelo matemático.

- SETS: es el bloque de conjuntos que se usa para definir una serie de conjuntos, por lo general son índices. Para el modelo los índices son (I), (J) y (K). Los cuales como se mencionó anteriormente son extraídos por GAMS de EXCEL, con las siguientes instrucciones:

```
$include C:\Users\T135-S1305WH\Desktop\proyecto gams\i.txt
```

```
$include C:\Users\T135-S1305WH\Desktop\proyecto gams\j.txt
```

```
$include C:\Users\T135-S1305WH\Desktop\proyecto gams\k.txt
```

- DATOS: Este bloque está compuesto por los grupos de parámetros y escalares. Los parámetros del problema son el tiempo de trabajo interno para cada tipo de maquina L(J) y el tiempo de trabajo independiente para cada tipo de máquina P(J). los escalares corresponden a el takt time (TT) y el número de operarios (NOP). Estos valores también son extraídos de EXCEL con las siguientes instrucciones:

Para los parámetros:

Las siguientes instrucciones fueron las utilizadas por GAMS para traer los 2 parámetros necesarios para el modelo, la primera corresponde a L que es tiempo de trabajo interno para cada tipo de máquina y la segunda a P que es el tiempo de trabajo independiente para cada tipo de máquina

```
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135S1305WH\Documents\gammdir\projdir  
\CASON1.xls par=L rng=C9:D12 rdim=1  
$GDXIN CASON1.gdx  
$LOAD L
```

```
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135-S1305WH\Documents \gammdir  
\projdir\CASON1.xls par=P rng=E9:F12 rdim=1  
$GDXIN CASON1.gdx  
$LOAD P  
$GDXIN
```

Para los escalares:

Las siguientes instrucciones fueron las utilizadas por GAMS para los escalares TT takt time y NOP número de operarios

```
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135-S1305WH\Documents\gammdir  
\projdir\CASON1.xls par=TT rng=H22 dim=0  
$GDXIN CASON1.gdx  
$LOAD TT
```

```
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135-S1305WH\Documents\gammdir  
\projdir\CASON1.xls par=NOP rng=H27 dim=0  
$GDXIN CASON1.gdx  
$LOAD NOP  
$GDXIN
```

Como el modelo es un híbrido entre balance de línea y balance de carga de los operarios para la facilidad de su desarrollo en GAMS también se dividió en dos partes como se muestra a continuación.

6.2.1 Modelado de balance de línea en GAMS

- **VARIABLES:** Las variables de modelo construido se dividen también en variables positivas, variables enteras y variables binarias. A continuación se muestran cada una:

Variable:

(F) la función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar

Variables positivas:

(TC) Tiempo de ciclo

WM (I,J) Carga externa por cada tipo de maquina

Variables enteras:

Q(I,J) Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

QQ Unidades de producto por tipo de maquina

Variable binaria:

X(I,J,K) 1 si la i-ésima maquina tipo J es asignada al operario k

- **ECUACIONES:** Dentro de este bloque se encuentran las ecuaciones y restricciones para el balance de línea, las cuales se muestran a continuación como fueron escritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones del balance de línea

LETRA	DESCRIPCIÓN	ECUACION
Z	Tiempo de ciclo a minimizar	$F = E = TC$
R1(J)	Restricción para que el número de unidades por tipo de maquina sea el mismo (balance de unidades por tipo de maquina)	$SUM(I, Q(I, J)) = E = QQ$
R2(I, J)	Restricción para que el tiempo de carga en cada máquina del sistema no supere el tiempo de ciclo	$Q(I, J) * (P(J) + L(J)) = L = TC$
R3(I, J)	Carga externa por maquina	$Q(I, J) * P(J) = E = WM(I, J)$
R4	La tasa de producción del sistema debe ser igual o menor al tatk time	$TC = E = TT * QQ$
R5	las unidades en el sistema tiene que ser mayor a 1	$QQ = G = 1$

Fuente. Autores

- **MODELO y SOLUCIÓN:** el modelo resolverá las restricciones y ecuaciones nombradas anteriormente, minimizando la función objetivo (F) a través de la programación lineal entera mixta (MIP).
- **VISUALIZACIÓN:** para la primera parte del modelo se quiere que se visualice los valores arrojados de unidades de producto por tipo de máquina

(QQ), unidades de producto a programar en la i-ésima máquina tipo j, (Q) y la carga externa por cada tipo de maquina (WM).

6.2.2 Modelado de balance de carga en GAMS

- VARIABLES: Para la segunda parte las variables del modelo corresponden a la nueva función objetivo la cual corresponde al balance de carga (F1) y la carga de trabajo mínima de algún operario (Wmop).
- ECUACIONES: Las nuevas ecuaciones que se plantearon para la segunda parte del modelo son las que se muestran a continuación en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3. Ecuaciones para el balance de carga

LETRA	DESCRIPCIÓN	ECUACION
Z1	Balance de carga a minimizar	$F1 = E = TC - Wmop$
R6(K)	Restricción para que el tiempo de carga en cada operario no supere el tiempo de ciclo del sistema	$SUM((I,J), WM.I(I,J) * X(I,J,K)) = L = TC$
R7(K)	Restricción para que el tiempo de carga en cada operario supere el mínimo deseado	$SUM((I,J), WM.I(I,J) * X(I,J,K)) = G = Wmop$
R8(I,J)	Restricción que cada máquina es asignada a un solo operario	$SUM(K, X(I,J,K)) = E = 1$

FUENTE: Autores

- **MODELO y SOLUCIÓN:** el modelo resolverá las restricciones y ecuaciones nombradas anteriormente, minimizando la función objetivo (F1) a través de la programación lineal entera mixta (MIP).
- **VISUALIZACIÓN:** para la segunda parte del modelo se quiere que se visualice los valores arrojados de la función objetivo de balance de carga minimizada (F1) y la asignación de máquinas para cada operario X(I,J,K).

A continuación en la figura 7 se muestra el modelo completo programado en el lenguaje GAMS

Figura 7. Foto del modelo en GAMS

```

OPTIONS
limrow = 100;
OPTIONS
limcol = 100;

SETS
I Indica el numero de maquinas existentes por cada tipo
/
$include C:\Users\T135-S1305WH\Desktop\proyecto gams\i.txt
/;
SETS
J Indica el numero de tipos de maquina
/
$include C:\Users\T135-S1305WH\Desktop\proyecto gams\j.txt
/ ;
SETS
K Indica la cantiad de operarios a asignar
/
$include C:\Users\T135-S1305WH\Desktop\proyecto gams\k.txt
/;

```

```

$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135-S1305WH\Documents\gamsdir\projdir\casoreal.xls par=L rng=C9:D14 rdim=1
$GDXIN casoreal.gdx
$LOAD L
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135-S1305WH\Documents\gamsdir\projdir\casoreal.xls par=P rng=E9:F14 rdim=1
$GDXIN casoreal.gdx
$LOAD P
$GDXIN

```

SCALARS

```

TT      Takt time
NOP     Numero de operarios
* wop tiempo de carga de trabajo minima por operario /0/ ;
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135-S1305WH\Documents\gamsdir\projdir\casoreal.xls par=TT rng=H22 dim=0
$GDXIN casoreal.gdx
$LOAD TT
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\T135-S1305WH\Documents\gamsdir\projdir\casoreal.xls par=NOP rng=H27 dim=0
$GDXIN casoreal.gdx
$LOAD NOP
$GDXIN

```

VARIABLE

```
F      Funcion objetivo de tiempo de ciclo a minimizar;
```

POSITIVE VARIABLE

```
TC      Tiempo de ciclo
WM(I,J) Carga externa por cada tipo de maquina ;
```

INTEGER VARIABLE

```
Q(I,J)  Uniades de proucto a programar en la i-esima maquina tipo J
QQ      Uniades de producto por tipo de maquina;
```

BINARY VARIABLE

```
X(I,J,K) 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario k ;
```

```
*Inicializacion de la variable Q(I,J) igual a cero cuando existe diferente numero de maquinas tipo J ;
```

<pre> EQUATIONS Z Tiempo de ciclo a minimizar R1(J) Restriccion para que el numero de unidades por tipo de maquina sea el mismo (balance de unidades por tipo de maquina) R2(I,J) Restriccion para que el tiempo de carga en cada maquina del sistema no supere el tiempo de ciclo R3(I,J) Carga externa por maquina R4 La tasa de prouccion del sistema debe ser igual o menor al task time R5 las unidades en el sistema tiene que ser mayor a 1 ; z.. F =E= TC ; R1(J).. SUM(I,Q(I,J))=E= QQ; R2(I,J).. Q(I,J)*(P(J)+L(J))=L= TC ; R3(I,J).. Q(I,J)*P(J)=E=WM(I,J) ; R4.. TC=E= TT*QQ ; R5.. QQ=G=1; MODEL XXX / Z, R1, R2, R3, R4, R5 / ; OPTIONS iterlim = 1E8 ; OPTIONS reslim = 1E8 ; OPTIONS optcr = 0.0001 SOLVE XXX minimizing F using MIP; display QQ.1, Q.1, WM.1 ; </pre>	
<pre> BINARY VARIABLE X(I,J,K) 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario K ; EQUATIONS Z1 Diferencia entre la carga de los operarios a minimizar R6(K) Restriccion para que el tiempo de caraga en cada operario no supere el tiempo de ciclo del sistema R7(K) Restriccion para que el tiempo de carga en cada operario supere el minimo deseado R8(I,J) Restriccion que cada maquina es asignada a un solo operario ; Z1.. F1 =E= TC -Wmop; R6(K).. SUM((I,J),WM.1(I,J)*X(I,J,K))=L=TC; R7(K).. SUM((I,J),WM.1(I,J)*X(I,J,K)) =G=Wmop; R8(I,J).. SUM(K,X(I,J,K))=E=1; MODEL XX2 / Z1, R6, R7, R8/; OPTIONS iterlim = 1E8; OPTIONS reslim = 1E8; OPTIONS optcr = 0.0001 ; SOLVE XX2 minimizing F1 using MIP; </pre>	

Fuente: Autores

7. APLICACIÓN DEL MODELO

Para la aplicación del modelo se plantearon 10 problemas ficticios generados aleatoriamente en Excel y uno real con datos de una la línea de tulipas de referencia AMAZON de la empresa DANA Transejes Colombia. A continuación se muestra los resultados obtenidos en cada uno de los casos con el modelo desarrollado en GAMS y con la heurística que emplea el diagrama Hombre-Máquina, para posteriormente ser comparados.

Para los casos aleatorios generados en Excel con una distribución normal se tomaron los siguientes rangos: para la demanda entre 10 y 60 unidades por hora, para el número de tipos de maquina entre 2 y 10 y para los tiempos tanto interno como externos los rangos establecidos fueron entre 1 y 3 minutos.

Como ilustración se mostrará uno de los casos generados aleatoriamente y el caso real los otros casos se encuentran en el ANEXO B del proyecto.

CASO ALEATORIO

Para este caso aleatorio ilustrativo que se encuentra como caso número 2 de los 10 realizados (anexo B) los valores generados aleatoriamente fueron los siguientes:

- Demanda de 12 unidades por hora
- número de tipo de máquinas 8, y los respectivos tiempos internos y externos que se encuentran en la tabla 4.

Tabla 4. Tiempos caso aleatorio

MÁQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
1	1,8	2,1
2	1,1	1,4
3	2,0	2,5
4	1,6	1,6
5	1,3	1,5
6	2,3	1,7
7	2,1	2,9
8	2,2	3,0

Fuente: Autores

En la figura 8. Se puede observar los datos arrojados en Excel de número de máquinas por tipo y de operario para los valores mencionados anteriormente.

Figura 8. Excel caso aleatorio

DEMANDA	12	NÚMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	8				
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARIO	NÚMERO DE OPERARIO	
1	1,8	1	2,1	15,425808	3,5955404	4	
2	1,1	2	1,4	23,580276			
3	2,0	3	2,5	13,327004			
4	1,6	4	1,6	18,457164			
5	1,3	5	1,5	20,876349			
6	2,3	6	1,7	15,201675			
7	2,1	7	2,9	12,1858			
8	2,2	8	3,0	11,555698			
9		9		0			
10		10		0			
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA		TACKT TIME	5,00	I	J	K
1	1		I	2	1	1	1
2	1		J	8	2	2	2
3	1		K	4	3	3	3
4	1				4	4	4
5	1				5		
6	1				6		
7	1				7		
8	2				8		
9	0						

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

---- F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 10.000

----TC Tiempo de ciclo 10.000

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de máquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-ésima máquina tipo J

	1	2	3	4	5	6	7	8
	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.000
								1.000

---- WM Carga externa por cada tipo de máquina

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4.213	2.818	5.092	3.253	3.075	3.303	5.714	2.954
								2.954

---- X 1 si la i-ésima maquina tipo J es asignada al operario

	k			
	1	2	3	4
1.1		1.000		
1.2				1.000
1.3	1.000			
1.4	1.000			
1.5			1.000	

1.6		1.000	
1.7			1.000
1.8			1.000
2.1	1.000		
2.2	1.000		
2.3	1.000		
2.4	1.000		
2.5	1.000		
2.6	1.000		
2.7	1.000		
2.8			1.000

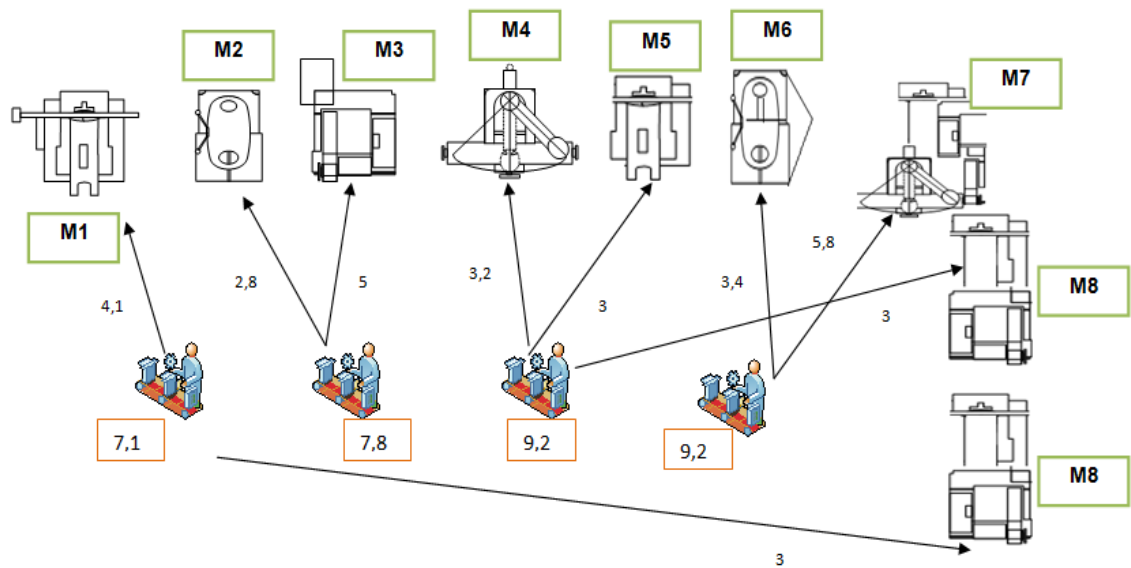
---- F1 = 1.273 Diferencia de carga entre operarios a minimizar

- Heurística de diagrama hombre- máquina

Los datos con los que se va a hacer la asignación de los operarios a las máquinas son los arrojados por la primera parte de GAMS. Tiempo de ciclo de 10, 2 unidades por ciclo, 4 operarios, 8 tipos de máquina (1 de cada tipo y 2 de la tipo 8), que han sido obtenidos anteriormente.

Los gráficos de la asignación de las máquinas a operarios como el de la figura 9, se realizaron para facilitar dicha asignación cumpliendo que la carga por operario no sobrepase el tiempo de ciclo. No implica que esta sea el tipo de línea según la organización. El tipo de línea del problema que se está trabajando en el proyecto es en serie.

Figura 9. Asignación caso aleatorio



FUENTE: Autores

Para calcular estas 2 cargas se suman los tiempos externos por operario o se resta el tiempo de ciclo con el tiempo inactivo por operario, luego se identifica cuál es la carga mayor y cuál es la menor.

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la ilustración 10, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, para este caso la diferencia entre la carga de trabajo fue de 1.9 minutos en donde el operario número 1 quedara libre por este tiempo con respecto a los operarios 3 y 4 que tienen la misma carga de trabajo de 9.2 minutos y con respecto al tiempo de ciclo estará ocioso 2.9 minutos y el operario 2 también tienen diferencia con los de carga mayor de 1.4 minutos.

En este diagrama se identifican 3 colores: el color gris claro indica el tiempo externo, el gris oscuro el tiempo interno y el blanco es el tiempo inactivo.

Con la figura 10 se muestra el diagrama hombre-máquina en donde se puede observar también la diferencia entre la carga de los operarios la cual se planteará con motivos de comparación de los dos métodos de resolución como:

Carga mayor de trabajo – carga menor de trabajo

Figura 10 Diagrama de Hombre-Máquina Caso 2

CASO REAL

En la figura 11, se muestran los tiempos externos e internos tomados en la línea de tulipas referencia AMAZON de la empresa DANA Transejes, Además de la demanda que corresponde a 57 unidades por hora, pero cabe resaltar que aunque la demanda sea de 912 unidades mensuales, por ser una referencia con una demanda tan pequeña la empresa dedica un día con 2 turnos de 8 horas para producir el requerimiento mensual. También en la figura 11 se especifica el número de tipos de máquina que tiene esta línea.

Este conjunto de datos se introdujeron en Excel para encontrar la solución matemática a este problema en el modelo propuesto en este proyecto.

Figura 11. Tiempos de la línea de tulipas referencia AMAZON

		Tiempo externo (seg)	Tiempo interno (seg)
		Operación torneado	23,7 22,9 23,6
	Tiempo promedio	23,40	80,33
Operación rolado		5 5,08 4,82	6,44 7 6,15
	Tiempo promedio	4,97	6,53
Tratamiento térmico 1		5,2 5,23 5	24,93 24,68 25,07
	Tiempo promedio	5,14	24,89
Tratamiento térmico 2		6,62 8,59 7,28	23,24 23 21
	Tiempo promedio	7,50	22,41
Operación rectificadora		16,7 16,3 15,8	33,96 33,87 32,14
	Tiempo promedio	16,27	33,32
Operación magnaflux		5,28 5,43 4,09	15,11 14,23 18,46
	Tiempo promedio	4,93	15,93

Datos de la línea de tulipas - referencia AMAZON
Demanda mensual= 912 unidades
La producción de tulipas de referencia amazon es sólo el 5% de la producción total de tulipas, es la de menor demanda. Estas 912 unidades que producen al mes las trabajan en un solo día del mes en 2 turnos de 8 horas.
Demanda por hora= 57 unidades/hora
NÚMERO TOTAL DE TIPOS DE MÁQUINAS: 6

Fuente: Autores

- Con el modelo

Estos valores fueron introducidos al modelo construido y en la parte de Excel se obtuvieron los datos que se muestran en la figura 12.

Figura 12. Excel Caso real

DEMANDA	57	NOMERO DE TIPOS DE MAQUINAS				6			
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARI	NOMERO DE OPERARI			
1	1,34	1	0,39	34,6820809	52,6315789	2			
2	0,11	2	0,12	260,869565					
3	0,42	3	0,12	111,1111111					
4	0,37	4	0,13	120					
5	0,56	5	0,27	72,2891566					
6	0,27	6	0,11	157,894737					
7		7		0					
8		8		0					
9		9		0					
10		10		0					
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA			TACKT TIME	1,05	I	J	K	
1	2			I	2				
2	1			J	6	1	1	1	
3	1			K	2	2	2	2	
4	1						3		
5	1						4		
6	1						5		
7	0						6		
8	0								

Fuente: Autores

La parte de GAMS para este caso real arrojó los siguientes resultados:

---- F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 2.105
 ---- TC Tiempo de ciclo 2.105

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-ésima maquina tipo J

	1	2	3	4	5	6
1	1.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
2	1.000					

---- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3	4	5	6
1	0.390	0.240	0.240	0.260	0.540	0.220
2	0.390					

---- X 1 si la i-ésima maquina tipo J es asignada al operario

	k	
	1	2
1.1		1.000
1.2	1.000	
1.3	1.000	
1.4	1.000	
1.5		1.000
1.6		1.000
2.1	1.000	
2.2	1.000	
2.3	1.000	

2.4 1.000

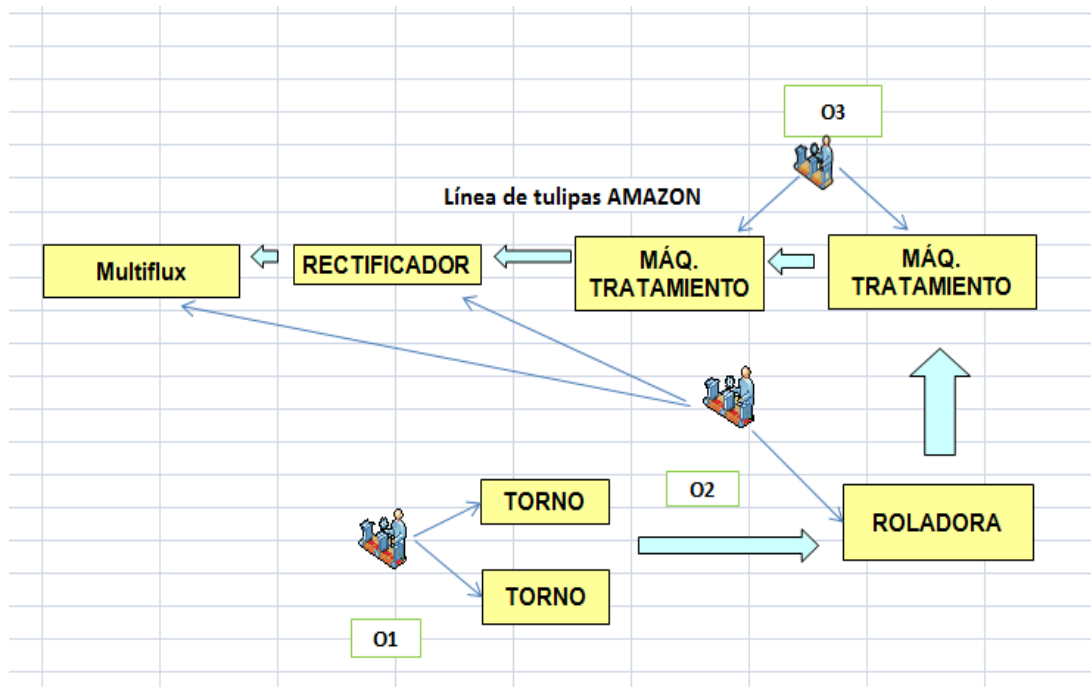
2.5 1.000

2.6 1.000

- Organización actual de la empresa DANA TRANSEJES

La empresa cuenta actualmente para esta línea 3 operarios, 6 tipos de máquinas (1 de cada tipo y 2 de la tipo 1), los operarios se encuentran organizados de la siguiente forma como se puede apreciar en la figura 13 el operario 1 es el encargado de las dos máquinas tipo 1, el operario 2 de la tipo 2, 5 y 6 y el operario 3 de la tipo 3 y 4.

figura 13. Asignación de operarios de la línea de tulipas DANA Transejes



Fuente: DANA transejes

8. ANALISIS DE LOS CASOS

Para poder hacer una comparación de los casos resueltos a través del modelo construido en el lenguaje GAMS con la heurística utilizada en la ingeniería de métodos (el diagrama hombre-máquina), se planteó una relación para después de realizado el diagrama, se obtuviera la diferencia entre la carga mayor de algún operario y la carga menor de algún operario, y de esta forma tener una posible función objetivo que pueda contrastarse con la función objetivo del modelo planteado en el proyecto.

Analizando los casos se puede decir que cuando estos tienen menos recursos (máquinas + operarios) hay mayor posibilidad de acercarse a una buena solución o la solución óptima, ya que hay menos opciones para asignar operarios a las máquinas, además hay menor posibilidad de cometer errores a la hora de graficar el diagrama hombre-máquina, ya que si hay muchos recursos para graficar implica más columnas, un mayor manejo de escalas y cálculos. Sucede lo mismo cuando hay muchas unidades a fabricar en un mismo ciclo, porque se tienen que manejar varios tiempos de trabajo de los operarios para una misma máquina, el cual a su vez se tiene que ajustar con el de las otras máquinas que tenga a su cargo.

A continuación en la tabla 5 se muestra las diferencias entre las dos funciones objetivos que se mencionaron anteriormente para realizar las respectivas comparaciones, para cada uno de los casos generados aleatoriamente. Acompañado de datos importantes de cada caso como el número de máquinas totales, el número total de operarios y el número de recursos totales es decir la suma entre máquinas y operarios.

Tabla 5. Diferencia entre las funciones objetivos

CASOS	DIFERENCIA ENTRE LAS 2 FUNCIONES OBJETIVOS
1	0,6
2	0,63
3	1
4	0,58
5	0,4
6	0,04
7	0,4
8	2,18
9	1,07
10	0,203

Fuente: Autores

Según las diferencias halladas entre las dos funciones objetivos mencionadas anteriormente, se corrobora que el modelo a través de la programación entera lineal mixta obtiene mejores resultados por las razones que se han mencionado anteriormente. Los valores de las diferencias entre las 2 funciones objetivos estuvo en un rango entre 0,04 y 2,18 minutos, es decir en algunos casos hubo gran variación y en otros fue muy mínima, esto refleja la variabilidad de la técnica que usualmente se utiliza por la ingeniería de métodos, ya sea por factores propios de quien desarrolla el diagrama al momento de escoger una de las posibilidades de la asignación entre las máquinas y operarios o por las

características de la línea (interacción entre el tiempo de ciclo, número de máquinas y operarios, y número de unidades a programar por ciclo).

También cabe mencionar un tipo de problema que presentó inconvenientes a la hora de resolverlo, donde no se puede realizar el diagrama hombre-máquina, así ya previamente se haya obtenido una asignación factible entre operarios y máquinas, que cumpliera con la restricción de que no supere el tiempo de ciclo. Esto sucede cuando hay muchas máquinas asignadas a los operarios y no se tienen en cuenta los tiempos inactivos de las máquinas llamados interferencias, causados por los tiempos de espera desde que la máquina es trabajada por el operario (carga y descarga) hasta que el operario, que se encuentra ocupado con otra máquina, vuelve a estar disponible.

Por otro lado al realizar el caso real (DANA TRANSEJES) se puede observar que los datos tomados en la empresa con los datos aleatorios son bastante diferentes, ya que previamente no se contaba con conocimiento de datos en empresas reales sino con datos teóricos encontrados en libros y previos estudios realizados del tema. Al analizar los resultados obtenidos se puede apreciar algunas diferencias con respecto a los datos reales de la línea de tulipas, ya que teóricamente se requieren dos operarios, el número de máquinas es el mismo y la asignación de los operarios a las máquinas es diferente.

Los motivos por los cuales se considera que aparecen estas diferencias en los resultados es por varias razones, algunas de ellas son:

- ✓ Errores que se pueden presentar en la toma de datos, ya que se debe tener en cuenta los errores humanos tanto por el método usado para la toma de los datos o por el errores del instrumento de medición, además del número de veces que se toman.

- ✓ Errores de cuando se toman tiempos tan pequeños, ya que a veces es difícil identificar los elementos de carga, descarga y procesamiento en cada operación.

- ✓ El modelo diseñado no contempla tiempos y eventos no repetitivos que se manejan en esta línea tales como ir a traer materiales, llenar el tobogán, cambio de herramientas, lubricación de las máquinas y mediciones. Los tiempos extraños o aleatorios como por ejemplo cuando un operario se le cae una pieza. Además otros tiempos que se deberían tener en cuenta son suplementos, como las necesidades personales del operario y tiempo de descanso. Por último el tiempo de los operarios de desplazarse de una máquina a otra.

9. CONCLUSIONES

- A través de la programación lineal entera mixta se logró construir un modelo matemático que resolviera el problema de balance de línea y balance de carga de los operarios satisfaciendo sus respectivas funciones objetivo, parámetros y variables específicos que fueron establecidos, y características propias del problema tales como, una línea que elabora un lote de producción grande, con un solo tipo de producto y con operaciones que requieran máquinas semiautomáticas.
- Con ayuda del lenguaje de programación GAMS se consiguió resolver el modelo construido con la programación lineal entera mixta, y obtener solución a 10 casos ficticios y un caso con datos de demanda, tipos de máquinas y tiempos reales de la empresa DANA TRANSEJES COLOMBIA, que sirvieron de base para hacer análisis sobre que tanto el modelo programado, contempla la realidad de una línea productiva.
- Con la comparación entre los dos métodos de solución trabajados para los casos, el exacto (programación lineal entera mixta) y el heurístico (el diagrama hombre-máquina), se puede afirmar que ambos son modelos válidos pero el primero además de balancear línea, balancea la carga de los operarios obteniendo un mejor resultado, ya que presenta una función objetivo la cual se minimiza con el programa; al contrario del diagrama hombre-máquina que balancea la línea y realiza una asignación factible de operarios-máquinas, ya que es un proceso subjetivo que depende de quién lo está realizando de como escoja las relaciones (hombre-máquina), y su única restricción es que ésta no supere el tiempo de ciclo.

- Con la comparación del caso real con los resultados obtenidos por el modelo se concluye que éste resuelve idealmente el problema con falencias, ya que no se tienen en cuenta otros tiempos que son importantes para el balance de línea y carga del operario para una línea real, como lo son los tiempos de los suplementos, los tiempos acíclicos, tiempos de eventos no repetitivos, tiempos de eventos extraños y los tiempos de desplazamiento del operario entre las máquinas que fueron asignadas.
- El modelo realizado en este proyecto de grado, no tiene en cuenta el problema de interferencia, que se presenta cuando un operario atiende varias máquinas, y es causada por los tiempos de espera desde que la máquina es trabajada por el operario (carga y descarga) hasta que el operario, que se encuentra ocupado con otra máquina, vuelve a estar disponible. Este problema es muy común en un balance de línea; por tanto se van a presentar casos en el que no se puedan obtener soluciones con este modelo.
- Este modelo sería de gran utilidad en empresas para mejorar el ambiente de trabajo, al dar carga de trabajo similares a todos los operario y así no hayan inconformidades, hacer un balance adecuado entre número de operarios y número de máquinas que se necesitan por tipo para cumplir con la demanda y disminuir el tiempo de ciclo, pero para que se acerque más a la realidad y se obtengan los mejores resultados para la empresa se necesita mejorar el modelo incluyendo datos que contemplen más la situación en la línea como se ha dicho anteriormente.

10. RECOMENDACIONES

- Con estos primeros estudios realizados para el problema híbrido de balance de línea y balance de carga que dieron como resultado un modelo en programación lineal entero mixto en el lenguaje de GAMS, se realicen posteriores investigaciones con otros métodos de solución y/o variaciones de las características del problema, para que se acerquen más a la realidad.
- Comparar el modelo planteado con otro método de resolución, para mirar con mayor claridad y matemáticamente su eficiencia, ya que actualmente solo existe la heurística y con esta matemáticamente era imposible hacer una comparación exhaustiva.
- Incluir en el modelo los otros tiempos que fueron mencionados anteriormente en los análisis como los no repetitivos, los tiempos extraños o aleatorios, los de desplazamientos en que se vea involucrado el operario por desplazamiento de una máquina a otra y los suplementos respectivos para el tipo de trabajo que tenga que hacer el operario en cada operación.
- Sería ideal que en investigaciones posteriores de este modelo, se incluya el problema de interferencia, que aunque es un tema que no ha sido muy abarcado en estudios anteriores, es muy importante tenerlo en cuenta ya que se relaciona con la baja productividad en un sistema productivo, y es un problema común y frecuente en muchas empresas.

11. BIBLIOGRAFÍA

ALI ALLAHVERDI, CT, Ng, T.C.E.Cheng, MIKHAIL Y, Kovalyov. A survey of scheduling problems with setup times or costs, *European journal of operational research*, 2008.

ARCUS, A.L. COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. *L, tternationat Journal of Production Research*, 1966.

AGNETIS, A. y C, Arbib. Concurrent operations assignment and sequencing of particular assembly problems in flow lines. *Annals' of Operations Research*, 1997.

BAYBARS, Ilker. A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem, *Management Science* 32. 1986.

BOWMAN, E.H. Assembly line balancing by linear programming. *Operations Research*, 1960.

CAMPS, Gonzalo, COROMINAS, Albert y PASTOR, Rafael. Equilibrado de línea de montajes de productos voluminosos, Universidad de Cataluña, Junio 2003.

CAPACHO BETANCOURT, Liliana y MORENO, Rafael Pastor. Generación de secuencias de montaje y equilibrado de líneas. Universitat Politècnica de Catalunya: España: 2004.

CHU, S. C. K., y LIN, C. K. Y. A manpower allocation model of job specialization. *Journal of the Operational Research Society*, 1993.

CHUECA CLOSA, Ignacio. Resolución del “Lexicographic Bottleneck Assembly Line Balancing Problem” mediante métodos heurísticos. Universidad Politécnica de Catalunya, 2008.

DUG HEE MOON, DAE KYOUNG KIM y JONG YUN JUNG. An operator load-balancing problem in a semi-automatic parallel machine shop. Changwon National University: South Korea, 2004. 355-358p.

DURÁN, Freddy Alfonso. Ingeniería de métodos - Globalización: Técnicas para el Manejo Eficiente de Recursos en Organizaciones Fabriles, de Servicios y Hospitalarias. Guayaquil, Ecuador, 2007. 92p.

E.F.STANFFORD. The operator-machine assignment problem, A quantitative teaching note of operations management, 2006

E.ROSENTHAL, Richard. A gams tutorial, naval postgraduate school Monterey, California USA

F.CROSI, M. PERONA, A. POZZETTI, Work- forcé manangement in automated assembly systems, Universidad de Brescia, Politecnico de Milano, International journal of production economics, 2000.

HELGESON, W. B y D. P. BIRNIE. Assembly line balancing using the ranked positional weight technique, 1961.

JACKSON, J.R. A computing procedure for the line balancing problem. Management Science, 1956.

KEYTACK, H. The computer operator-machine system (oms) for the least cost combination of operators and machines, Universidad de Toledo, USA, 1996.

KOULAMAS, C. P., & Smith, M. L. Look-ahead scheduling for minimizing machine interference. International Journal of Production Research, 1988.

KOULAMAS, C. P. Scheduling two parallel semi-automatic machines to minimize machine interference. Computers and Operations Research, 1996.

MARVAL L, Fernando J, CENTENO, Manuel y SAAZAR G, Juan. Heurística para balancear una línea de ensamble simple SALBP-1, Universidad de oriente, Venezuela, Universidad de la laguna España, 2004

NEARCHOU C, Andrea. Departamento de administración de negocios. Maximizing production rate and workload smoothing in assembly lines using particle swarm optimization. Universidad de Patras. 26 de octubre 2010

RAMCHAMADUGU, Ram y TALBOT, Brian. Improving the quality of workload assignments in assembly lines. Universidad de Michigan, USA. 1990

RESTREPO, Jorge Hernán, MEDINA V. Pedro Daniel y CRUZ T, Eduardo Arturo. Assembly balancing line problem salbp-1 y salbp-2: un caso de estudio, Universidad tecnológica de Pereira, scientia et techica, Diciembre 2008

REKIEK, Brahim, DOLGUI, Alexandre, Delchambre, Alain y BRATCU, Antoneta. State of art of optimization methods or assembly line design. Departamento de la Universidad libre e bruxelles, Brusseles, Belgium, Universidad de tecnología de troyes, 2002

RUIZ RUIZ, David Elberto, Modelo de nivelación de carga de trabajo de operarios en talleres con máquinas paralelas semiautomáticas.

SÁNCHEZ, Pedro, RAMOS, Andrés, LINARES, Pedro, FERRER, José María y BARQUÍN, Julián. Modelos matemáticos de optimización. Universidad Pontificia Comillas: Madrid, 2010.

SHTUB, A. y E.M, Dar El. An assembly chart oriented assembly line balancing approach, 1990.

STECKE, K. E., y ARONSON, J. E. Review of operator/machine interference models. *International Journal of Production Research*, 1985.

WHITE, W.W. Comments on a paper by Bowman, *Operations Research*, 1961.

YOUNG JU KIM, YEO KEUN KIM, YOUNGKYUN CHO. A heuristic-Based genetic algorithm for workload smoothing in assembly lines. Departamento de ingeniería industrial, Universidad Kwangju. Departamento de ciencias de la computación, Universidad Chodan. Republica de corea. 1997

ZAPATA POVÉDA, Javier Andrés y HURTADO FLOREZ, Carlos Hernando. Aplicación de algunos métodos exactos para resolver el problema de balanceo de línea simple, Universidad tecnológica de Pereira, 2009.

12. ANEXOS

ANEXO A. Casos generados aleatoriamente para la aplicación del modelo

CASO 1

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 34 unidades por hora, número de tipo de máquinas 2 y la siguiente tabla 5 de tiempos.

Tabla 1. Tiempos caso 1

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
2.5	1.3
2.7	1.1

Fuente. Autores

Con estos valores, se consiguieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 1.

Figura 1. Excel caso 1

DEMANDA	34	NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS		2			
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARI	NUMERO DE OPERARI	
1	2,5	1	1,3	16,11147	25,16404	2	
2	2,7	2	1,1	15,72189			
3		3		0			
4		4		0			
5		5		0			
6		6		0			
7		7		0			
8		8		0			
9		9		0			
10		10		0			
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE	TACKT TIME		1,76	I	J	K
1	3				1		1
2	3					2	2
3	0						
4	0						
5	0						
6	0						
		I	J	K			
		3	2	2			

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

----F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 5.294

----TC Tiempo de ciclo 5.294

----QQ = 3.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima máquina tipo J

	1	2
1	1.000	1.000
2	1.000	1.000
3	1.000	1.000

----WM Carga externa por cada tipo de máquina

	1	2
1	1.268	1.116

2	1.268	1.116
3	1.268	1.116

---- X. 1 si la i-esima máquina tipo J es asignada al operario

	k	
	1	2
1.1		1.000
1.2		1.000
2.1	1.000	
2.2		1.000
3.1	1.000	
3.2	1.000	

---- F2 = 0.151 Función de balance de carga

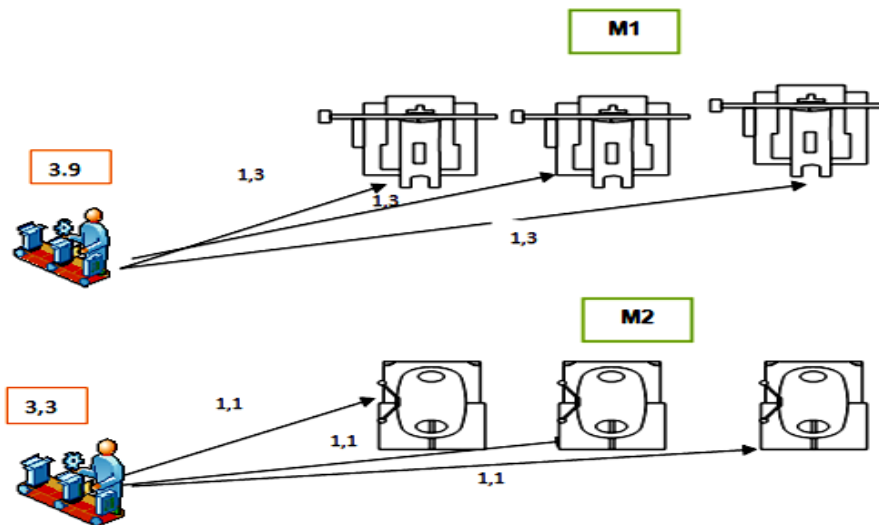
- Heurística de diagrama hombre-máquina

Los datos con los que se va a hacer la asignación de los operarios a las máquinas son los arrojados por la primera parte de GAMS. Tiempo de ciclo de 5.3. Sale 1 unidad por ciclo y el sistema requiere de 2 operarios, 2 tipos de máquina (2 de cada tipo).

Como se observa en la siguiente figura 2 esta fue la asignación escogida para hacer el diagrama hombre-máquina, en donde la carga del operario 1 es de 3.9 y del operario 2 de 3.3.

Los gráficos de la asignación de las máquinas a operarios como el de la ilustración 2, se realizaron para facilitar dicha asignación cumpliendo que la carga por operario no sobrepase el tiempo de ciclo. No implica que esta sea el tipo de línea según la organización. El tipo de línea del problema que se está trabajando en el proyecto es en serie.

Figura 2. Asignación caso 1



Fuente: Autores

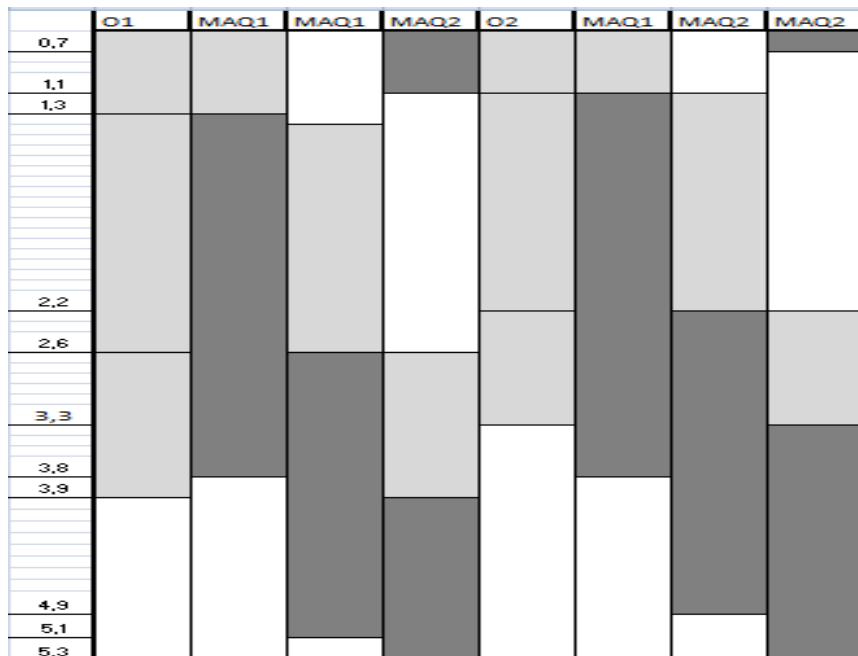
Con la figura 3 se muestra el diagrama hombre-máquina en donde se puede observar también la diferencia entre la carga de los operarios la cual se planteará con motivos de comparación de los dos métodos de resolución como:

Carga mayor de trabajo – carga menor de trabajo

Para calcular estas 2 cargas se suman los tiempos externos por operario o se resta el tiempo de ciclo con el tiempo inactivo por operario, luego se identifica cuál es la carga mayor y cuál es la menor.

En este diagrama se identifican 3 colores: el color gris claro indica el tiempo externo, el gris oscuro el tiempo interno y el blanco es el tiempo inactivo. Para este caso la diferencia fue de 0.6 minutos en donde el operario número dos se encuentra más ocioso que el operario 1.

Figura 3. Caso 1



Fuente: Autores

CASO 2

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 12 unidades por hora, número de tipo de máquinas 8 y la siguiente tabla 6 de tiempos.

Tabla 2. Tiempos caso 2

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
1,8	2,1
1,1	1,4
2,0	2,5
1,6	1,6
1,3	1,5
2,3	1,7
2,1	2,9
2,2	3,0

Fuentes: Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 4.

Figura 4. Excel caso 2

DEMANDA	12	NOMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	8			
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARIO	
1	1,8	1	2,1	15,425808	3,5955404	
2	1,1	2	1,4	23,580276		
3	2,0	3	2,5	13,327004		
4	1,6	4	1,6	18,457164		
5	1,3	5	1,5	20,876349		
6	2,3	6	1,7	15,201675		
7	2,1	7	2,9	12,1858		
8	2,2	8	3,0	11,555698		
9		9		0		
10		10		0		
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA	TACKT TIME	5,00	I	J	K
1	1	I	2	1	1	1
2	1	J	8	2	2	2
3	1	K	4	3	3	3
4	1			4	4	4
5	1			5		
6	1			6		
7	1			7		
8	2			8		
9	0					

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

---- F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 10.000

----TC Tiempo de ciclo 10.000

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de máquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima máquina tipo J

	1	2	3	4	5	6	7	8
	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.000
								1.000

---- WM Carga externa por cada tipo de máquina

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4.213	2.818	5.092	3.253	3.075	3.303	5.714	2.954

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

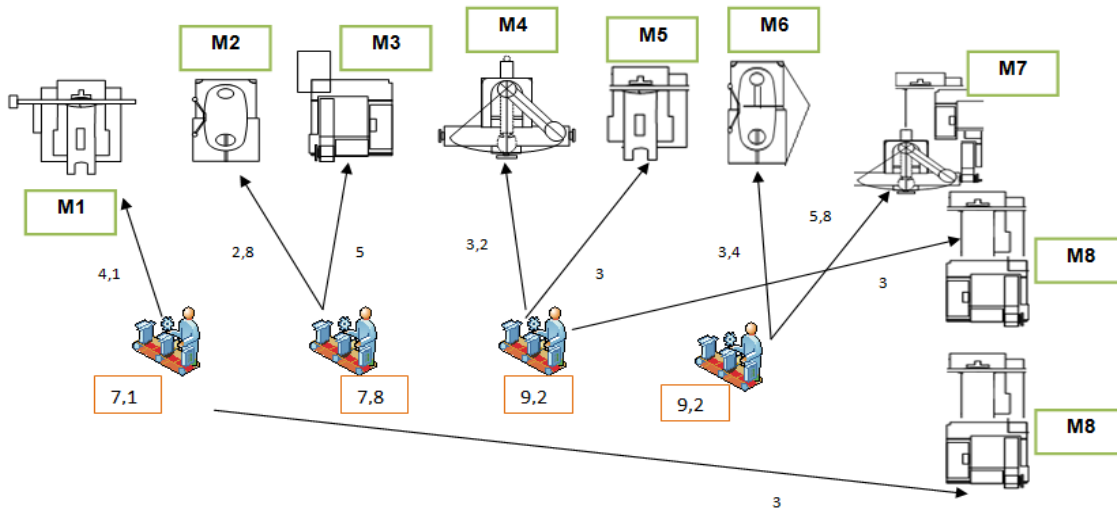
	k			
	1	2	3	4
1.1		1.000		
1.2				1.000
1.3	1.000			
1.4	1.000			
1.5			1.000	
1.6		1.000		
1.7			1.000	
1.8				1.000
2.1	1.000			
2.2	1.000			
2.3	1.000			
2.4	1.000			
2.5	1.000			
2.6	1.000			
2.7	1.000			
2.8				1.000

---- F1 = 1.273 Diferencia de carga entre operarios a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

La asignación de los operarios es la que se muestra en la figura 5 con los datos tiempo de ciclo de 10, 2 unidades por ciclo, 4 operarios, 8 tipos de maquina (1 de cada tipo y 2 de la tipo 8), que han sido obtenidos anteriormente.

Figura 5. Asignación Caso 2

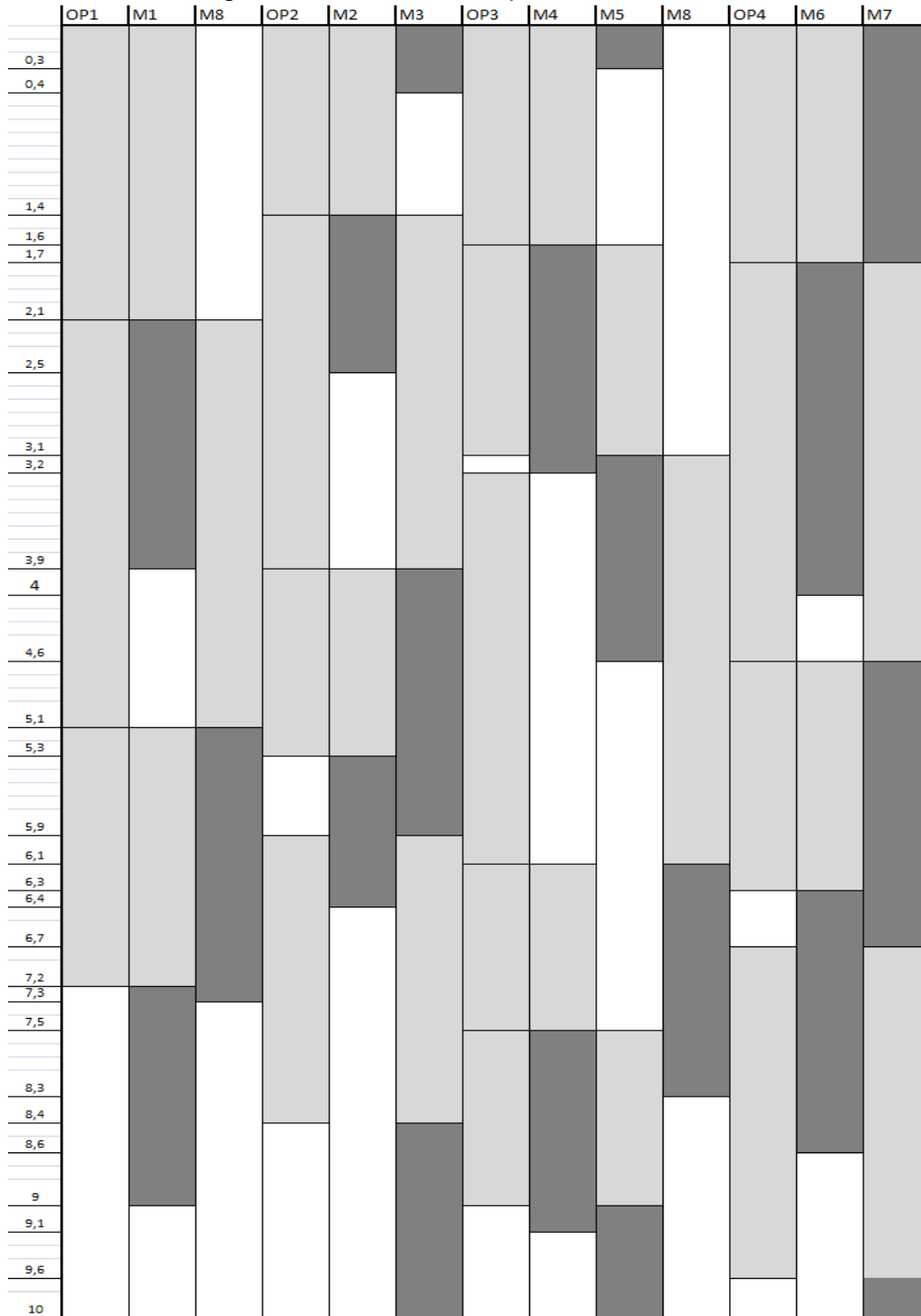


Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 6, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, para este caso la diferencia entre la carga de trabajo fue de 1.9 minutos en donde el operario número 1 quedara libre por este tiempo con respecto a los operarios 3 y 4 que tienen la misma carga de trabajo de 9.2 minutos y con respecto al tiempo de ciclo estará ocioso 2.9 minutos y el operario 2 también tienen diferencia con los de carga mayor de 1.4 minutos.

Fuente. Autor

Ilustración 6. Diagrama de Hombre-Máquina Caso 2



Fuente: Autores

CASO 3

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 24 unidades por hora, número de tipo de máquinas 7 y la siguiente tabla 3 de tiempos.

Tabla 3. Tiempos caso 3

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
2,2	2,1
2,5	1,5
1,6	1,9
1,9	1,4
1,9	1,2
2,1	1,0
1,3	1,7

Fuente. Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 7.

Figura 7. Excel Caso 3

DEMANDA	24	NOMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	7				
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARIO	NOMERO DE OPERARIO	
1	2,2	1	2,1	13,914995	5,592933	5	
2	2,5	2	1,5	14,988071			
3	1,6	3	1,9	17,102905			
4	1,9	4	1,4	18,464014			
5	1,9	5	1,2	19,521308			
6	2,1	6	1,0	19,456084			
7	1,3	7	1,7	20,332965			
8		8		0			
9		9		0			
10		10		0			
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA		TACKT TIME	2,50	I	J	K
1	2		I	2	1	1	1
2	2		J	7	2	2	2
3	2		K	5	3	3	3
4	2				4	4	4
5	2				5	5	5
6	2				6		
7	2				7		
8	0						

Fuente: Autores

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

---- F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 5.000

---- TC Tiempo de ciclo 5.000 .

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

---- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3	4	5	6	7
1	2.068	1.472	1.934	1.390	1.157	1.010	1.696
2	2.068	1.472	1.934	1.390	1.157	1.010	1.696

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

	k				
	1	2	3	4	5
1.1					1.000
1.2			1.000		
1.3				1.000	
1.4				1.000	
1.5		1.000			
1.6	1.000				
1.7		1.000			
2.1					1.000
2.2		1.000			
2.3	1.000				
2.4	1.000				

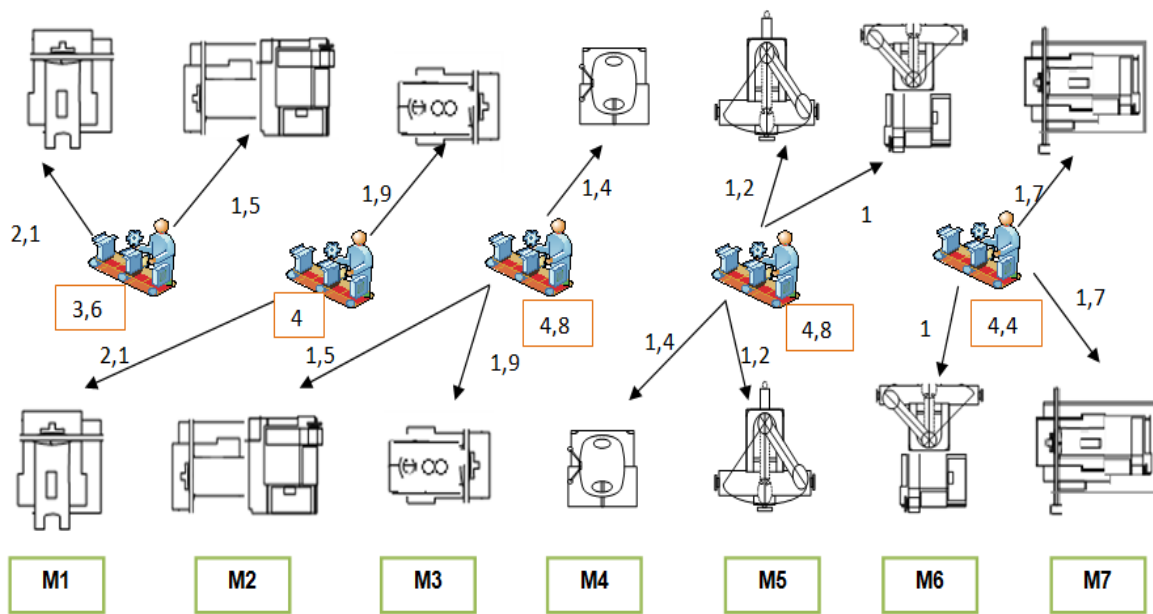
2.5	1.000	
2.6		1.000
2.7	1.000	

---- F1 = 0.198 Diferencia de carga entre operarios a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

La asignación de los operarios es la que se muestra en la figura 8, se realizó con los datos: tiempo de ciclo de 5, 2 unidad por ciclo, 5 operarios, 7 tipos de maquina (2 de cada tipo), que han sido obtenidos anteriormente.

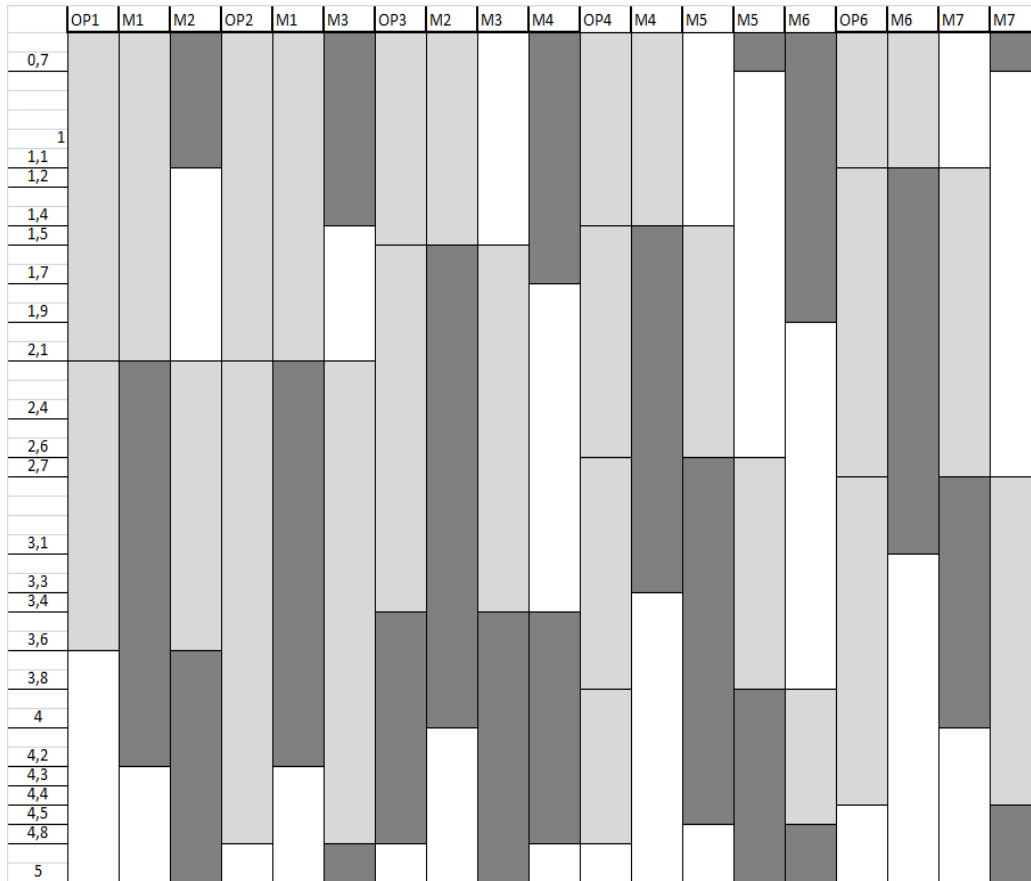
Figura 8. Asignación Caso 3



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 9, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, el operario que más carga tiene que es el número 4 con un 4.8 minutos y el de menor carga que es el número 1 con 3.6 minutos para un resultado de 1.2 minutos.

Figura 9. Diagrama de Hombre-Máquina Caso 2



Fuente: Autores

CASO 4

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 32 unidades por hora, número de tipo de máquinas 4 y la siguiente tabla 4 de tiempos.

Tabla 4. Tiempos caso 4

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
2,1	1,2
1,2	1,6
2,4	1,7
2,1	1,4

Fuente: Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 10.

Figura 10. Excel Caso 4

DEMANDA	32	NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS		4			
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARIO	NUMERO DE OPERARIO	
1	2,1	1	1,2	17,982244	10,003134	4	
2	1,2	2	1,6	20,953476			
3	2,4	3	1,7	14,651294			
4	2,1	4	1,4	16,845273			
5		5		0			
6		6		0			
7		7		0			
8		8		0			
9		9		0			
10		10		0			
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA	TACKT TIME		1,88	I	J	K
1	2				1	1	1
2	2				2	2	2
3	3				3	3	3
4	2						
5	0				I	3	
6	0				J	4	
					K	4	

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

---- F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 11.250

---- TC Tiempo de ciclo 11.250

---- QQ = 6.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3	4
1		3.000	3.000	2.000
				3.000

2	3.000	3.000	2.000	3.000
3			2.000	

---- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3	4
1	3.647	4.946	3.405	4.294
2	3.647	4.946	3.405	4.294
3			3.405	

---- X. 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

	k			
	1	2	3	4
1.1		1.000		
1.2		1.000		
1.3			1.000	
1.4	1.000			
2.1				1.000
2.2				1.000
2.3			1.000	
2.4	1.000			
3.1	1.000			
3.2	1.000			
3.3			1.000	
3.4	1.000			

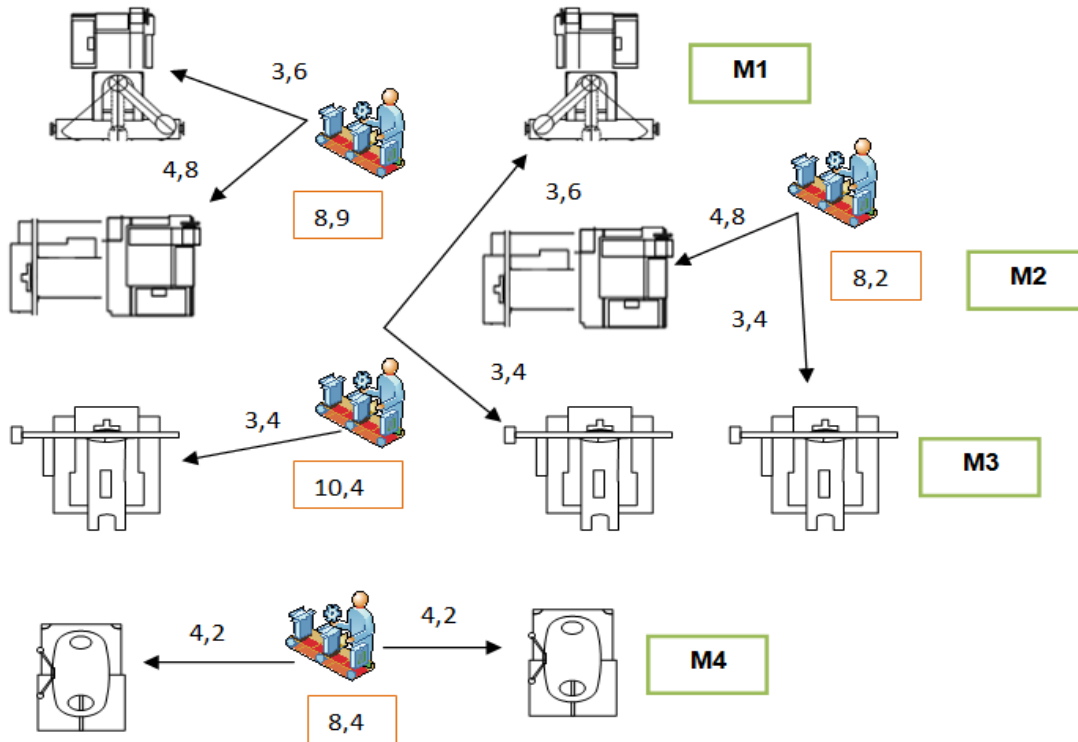
---- F1 = 1.629 Diferencia de carga entre operarios a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

Para este caso el tiempo de ciclo fue de 11.3 minutos, se produce 6 unidades por ciclo y el sistema requiere de 4 operarios, 4 tipos de maquina (2 de cada tipo y 3 de la tipo 3).

Como se observa en la figura 11. Esta fue la asignación escogida para hacer el diagrama múltiple de actividades, en donde la carga del operario 1 es de 8.9, operario 2 del operario 2 de 10.4, del operario 3 de 8.4 y del último operario de 8.2.

Figura 11. Asignación caso 4



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 12, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, la cual es de 2.2 minutos en donde el operario número 4 es que tiene la mayor carga de la línea y el operario 1 el tiene más tiempo ocioso, es decir menor carga.

Figura 12. Diagrama Hombre-Máquina caso 4



Fuente: Autores

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

----F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 5.625

----TC Tiempo de ciclo 5.625

---- QQ = 3.000 Unidades de producto por tipo de maquina

----Q Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3
1	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000
3	1.000	1.000	1.000

--- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3
1	1.900	2.100	1.300
2	1.900	2.100	1.300
3	1.900	2.100	1.300

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

K

	1	2	3
1.1			1.000
1.2		1.000	
1.3		1.000	

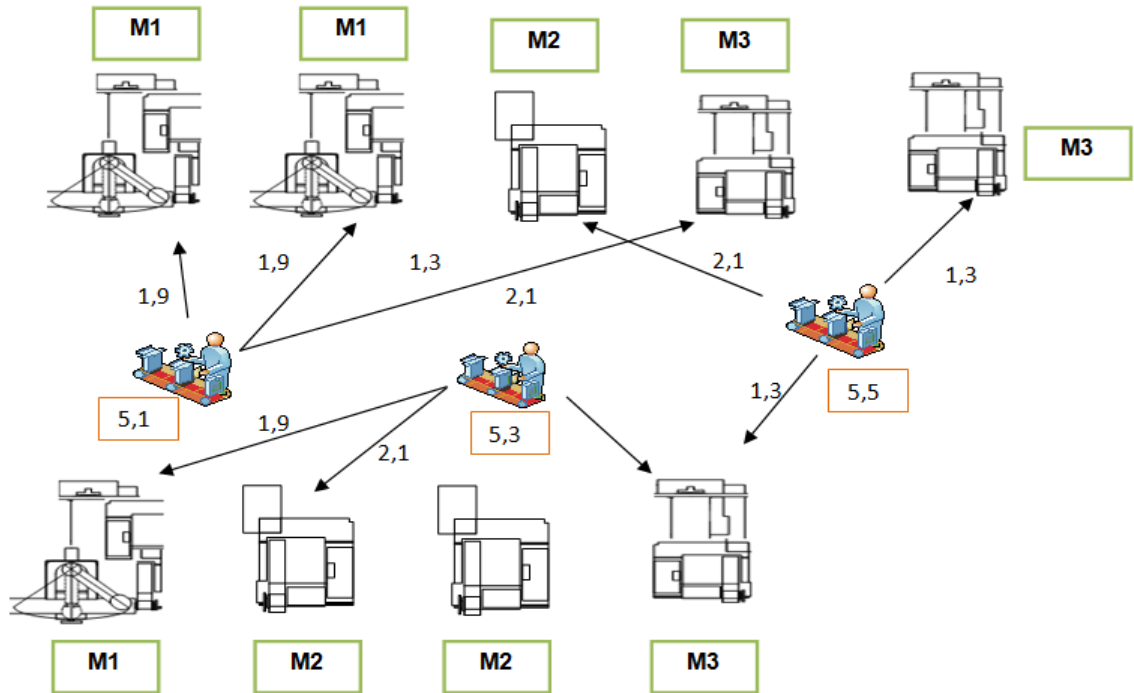
2.1	1.000		
2.2			1.000
2.3	1.000		
3.1		1.000	
3.2	1.000		
3.3			1.000

---- F1 = 0.000 diferencia de carga minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

En la figura 14 se muestra la asignación de los operarios escogida para este caso y que presenta los siguientes datos: tiempo de ciclo de 5,6 minutos, 3 unidad por ciclo, 3 operarios, 3 tipos de maquina (3 de cada tipo), que han sido obtenidos anteriormente.

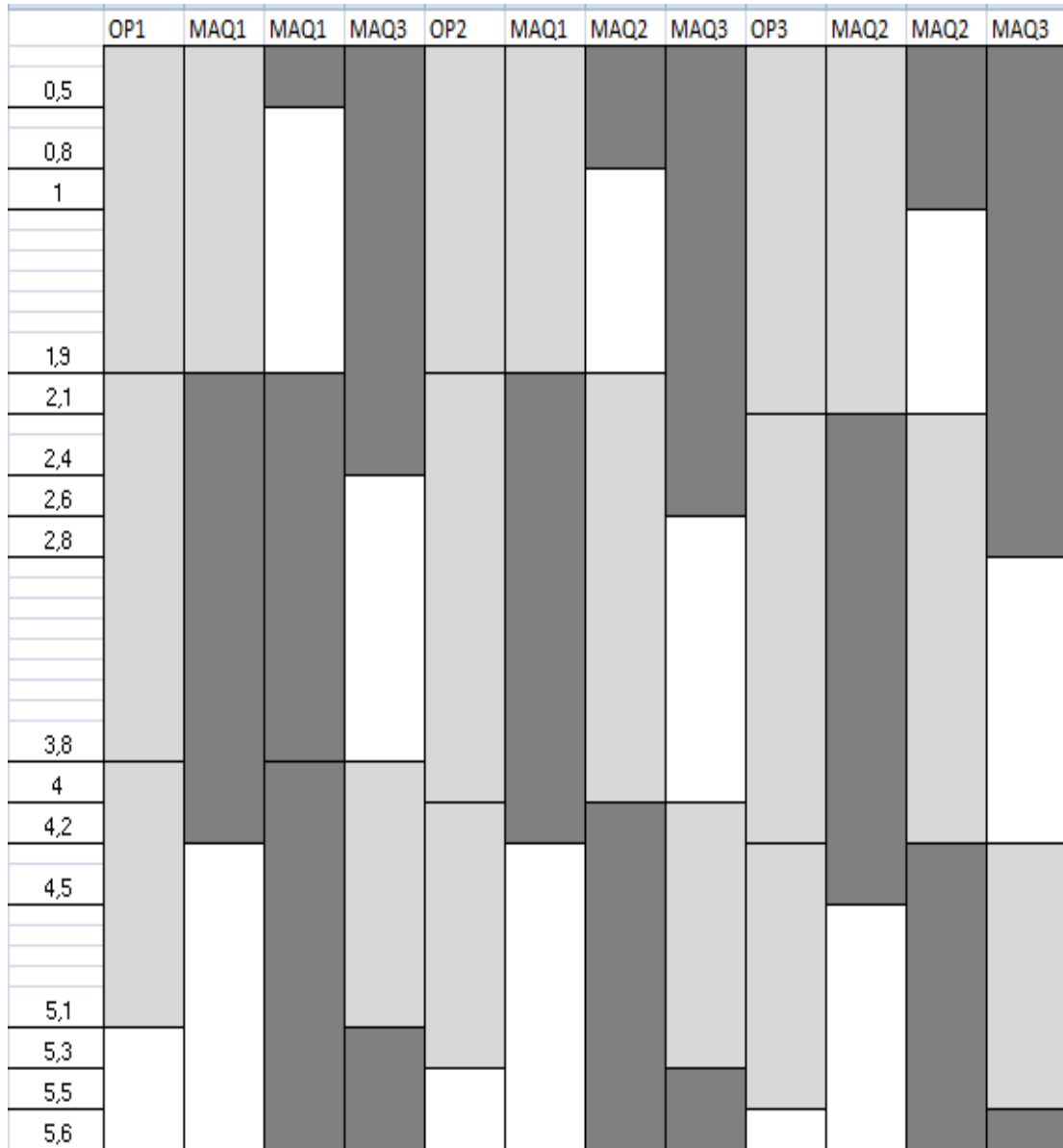
Figura 14. Asignación caso 5



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 15, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, la cual es de 0,4 minutos en donde el operario número 3 es que tiene la mayor carga de la línea y el operario 1 el tiene la menor carga.

Figura 15. Diagrama Hombre-máquina caso 5



Fuente: Autores

CASO 6

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 14 unidades por hora, número de tipo de máquinas 3 y la siguiente tabla 6 de tiempos.

Tabla 6. Tiempos caso 6

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
2,8	1,9
1,8	1,6
1,0	2,3

Fuente. Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 16.

Figura 16. Excel caso 6

DEMANDA	14	NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	3						
TIPO DE MAQUINA A	TIEMPO INTERNO DE LA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARI	NUMERO DE OPERARI			
1	2,8	1	1,9	12,585954	10,404	2			
2	1,8	2	1,6	17,869049					
3	1,0	3	2,3	18,362062					
4		4		0					
5		5		0					
6		6		0					
7		7		0					
8		8		0					
9		9		0					
10		10		0					
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE		TAKT TIME	4,33744	I	J	K		
1	2				2			1	1
2	1				3			2	2
3	1				2			3	
4	0								
5	0								
6	0								

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

----F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 8.675

----TC Tiempo de ciclo 8.675

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3
1	1.000	2.000	2.000
2	1.000		

---- WM Carga externa por maquina

	1	2	3
1	1.948	3.136	4.502
2	1.948		

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

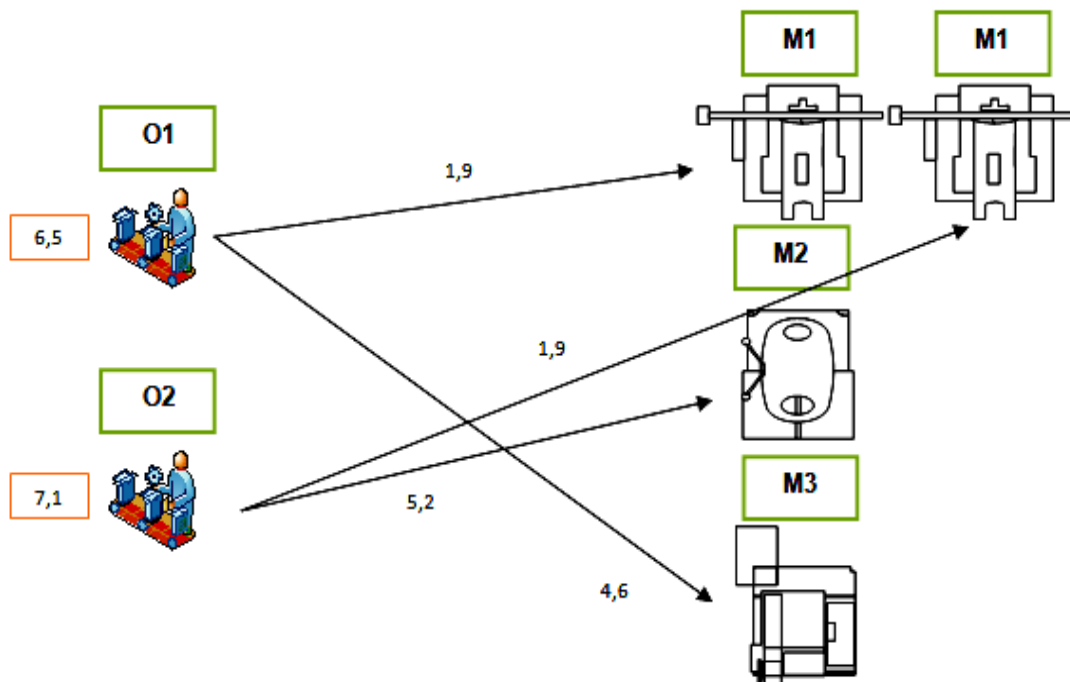
	k	
	1	2
1.1		1.000
1.2	1.000	
1.3		1.000
2.1	1.000	
2.2	1.000	
2.3	1.000	

---- F1 = 1.365 balance de carga a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

En la figura 17 se muestra la asignación de los operarios escogida para este caso y que presenta los siguientes datos: tiempo de ciclo de 8.7 minutos, 2 unidades por ciclo, 2 operarios, 3 tipos de máquina, que han sido obtenidos anteriormente.

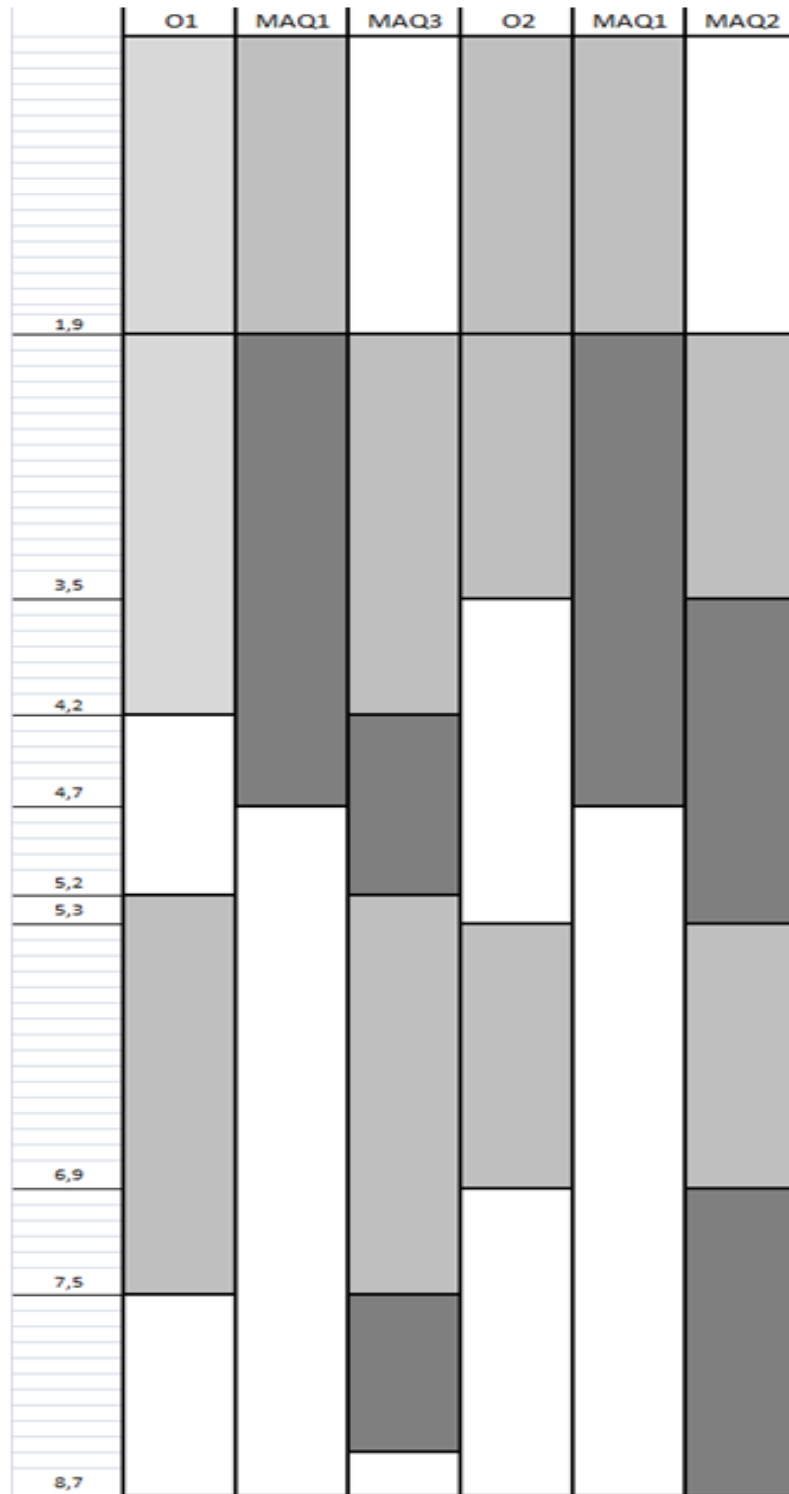
Figura 17. Asignación caso 6



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 18, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, la cual es de 1.4 minutos en donde el operario número 2 es que tiene la mayor carga de la línea y el operario 1 el tiene la menor carga.

Figura 18. Diagrama hombre-máquina caso 6



Fuente: Autores

CASO 7

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 31 unidades por hora, número de tipo de máquinas 4 y la siguiente tabla 7 de tiempos

Tabla 7. Tiempos caso 7

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
1,0	2,1
1,1	1,5
1,9	1,3
2,3	1,4

Fuente.

Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 19.

Figura 19. Excel caso 7

DEMANDA	31	NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	4						
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARI	NUMERO DE OPERARI			
1	1,0	1	2,1	19,449726	9,534919	4			
2	1,1	2	1,5	23,858028					
3	1,9	3	1,3	18,515954					
4	2,3	4	1,4	16,206646					
5		5		0					
6		6		0					
7		7		0					
8		8		0					
9		9		0					
10		10		0					
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA			TACKT TIME	1,9471		I	J	K
1	2			I	2		1	1	1
2	2			J	4		2	2	2
3	2			K	4		3	3	3
4	2						4	4	4
5	0								
6	0								

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

----F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 3.89

----TC Tiempo de ciclo 3.89

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3	4
1	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000

---- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3	4
1	2.082	1.453	1.328	1.430
2	2.082	1.453	1.328	1.430

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

	k			
	1	2	3	4
1.1		1.000		
1.2			1.000	
1.3	1.000			
1.4			1.000	
2.1	1.000			
2.2				1.000

2.3 1.000

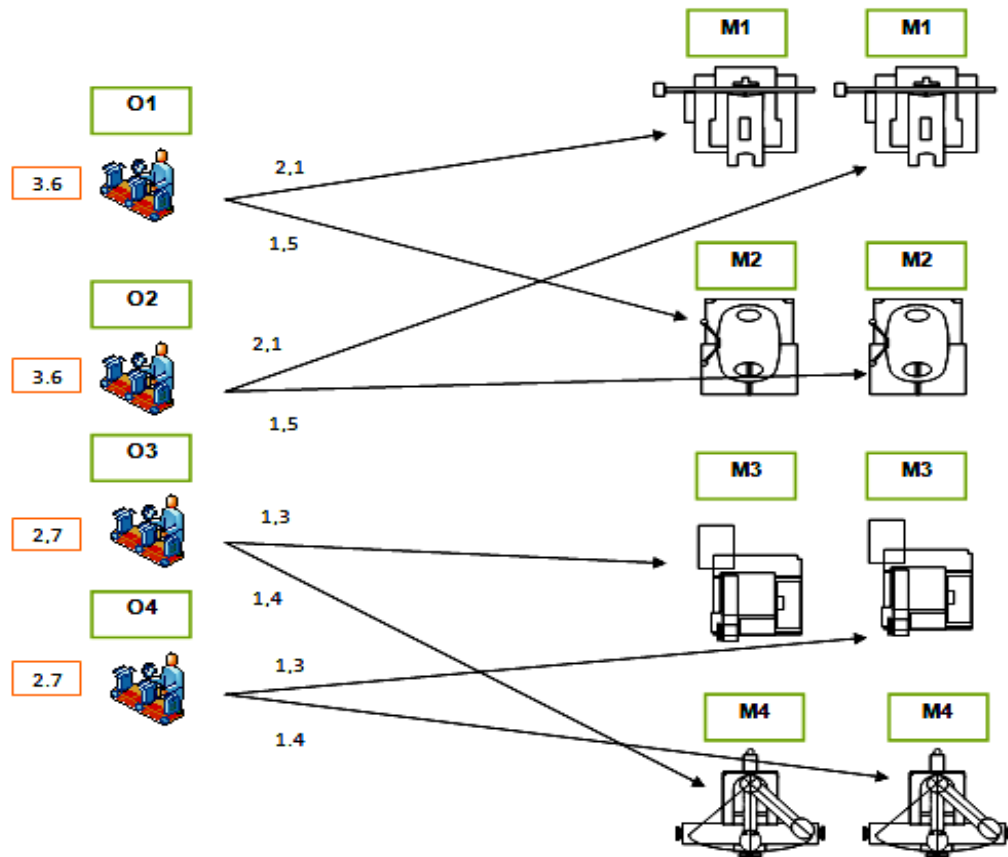
2.4 1.000

---- F1 = 0.526 balance de carga a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

En la figura 20 se muestra la asignación de los operarios escogida para este caso y que presenta los siguientes datos: tiempo de ciclo de 3.9 minutos, 2 unidades por ciclo, 4 operarios, 4 tipos de máquina, que han sido obtenidos anteriormente.

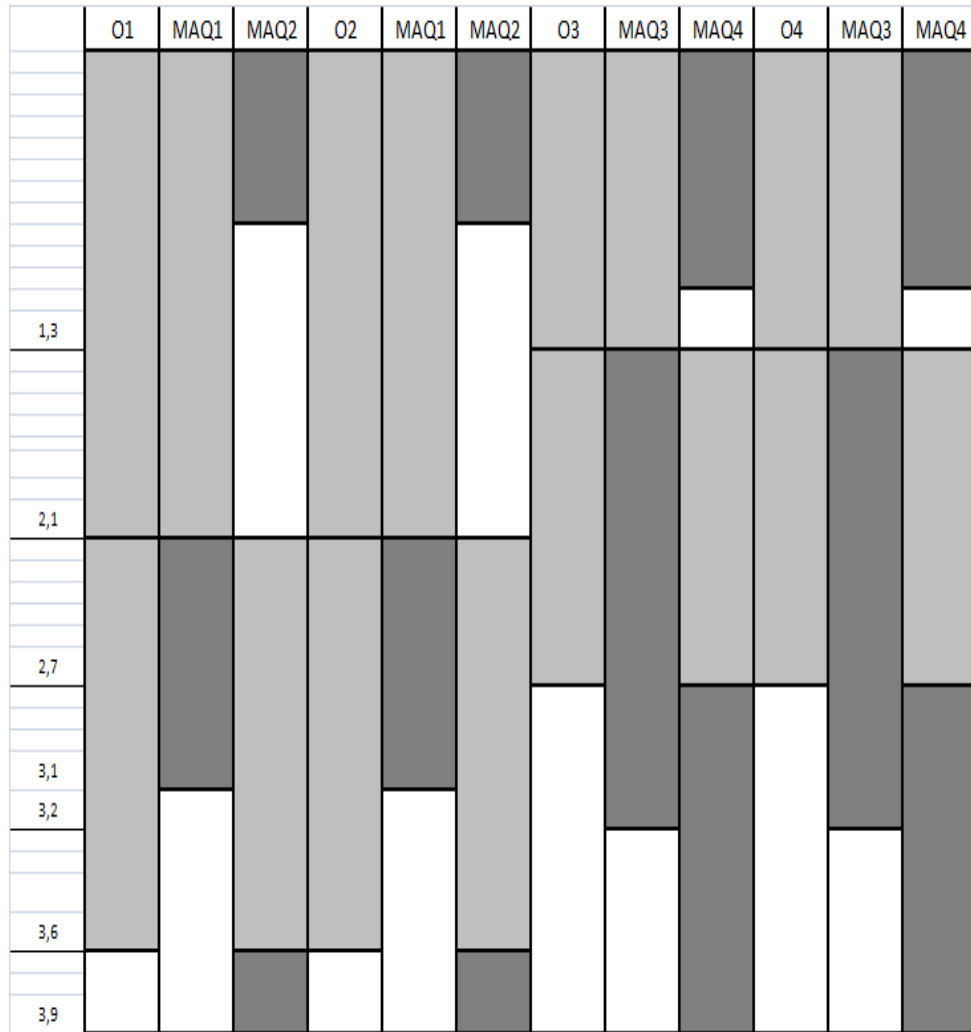
Figura 20. Asignación caso 7



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 21, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, la cual es de 0.4 minutos en donde el operario número 4 y 3 son los que tienen la mayor carga de la línea y los operarios 1 y 2 tienen la menor carga.

Figura 21. Diagrama hombre-máquina para caso 7



Fuente: Autores

CASO 8

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 50 unidades por hora, número de tipo de máquinas 3 y la siguiente tabla 8 de tiempos.

Tabla 8. Tiempos de caso 8

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
2,5	1,3
2,2	1,5
1,4	1,4

Fuente. Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 22.

Figura 22. Excel el caso 8

DEMANDA	50	NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	3
---------	----	-----------------------------	---

TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARI	NUMERO DE OPERARI
1	2,5	1	1,3	15,913195	15,114622	4
2	2,2	2	1,5	16,319698		
3	1,4	3	1,2	23,172605		
4		4		0		
5		5		0		
6		6		0		
7		7		0		
8		8		0		
9		9		0		
10		10		0		

TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA
1	4
2	4
3	3
4	0
5	0
6	0
7	0

TACKT TIME	1,1913
------------	--------

I	J	K
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4		4

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

----F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 8.33

----TC Tiempo de ciclo 8.33

---- QQ = 7.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3
1	2.000	2.000	2.000
2	2.000	2.000	2.000
3	2.000	2.000	3.000
4	1.000	1.000	

---- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3
1	2.536	3.014	2.389
2	2.536	3.014	2.389
3	2.536	3.014	3.584
4	1.268	1.507	

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

	k			
	1	2	3	4
1.1				1.000
1.2			1.000	
1.3				1.000
2.1	1.000			
2.2	1.000			
2.3				1.000
3.1		1.000		
3.2		1.000		
3.3			1.000	

4.1 1.000

4.2 1.000

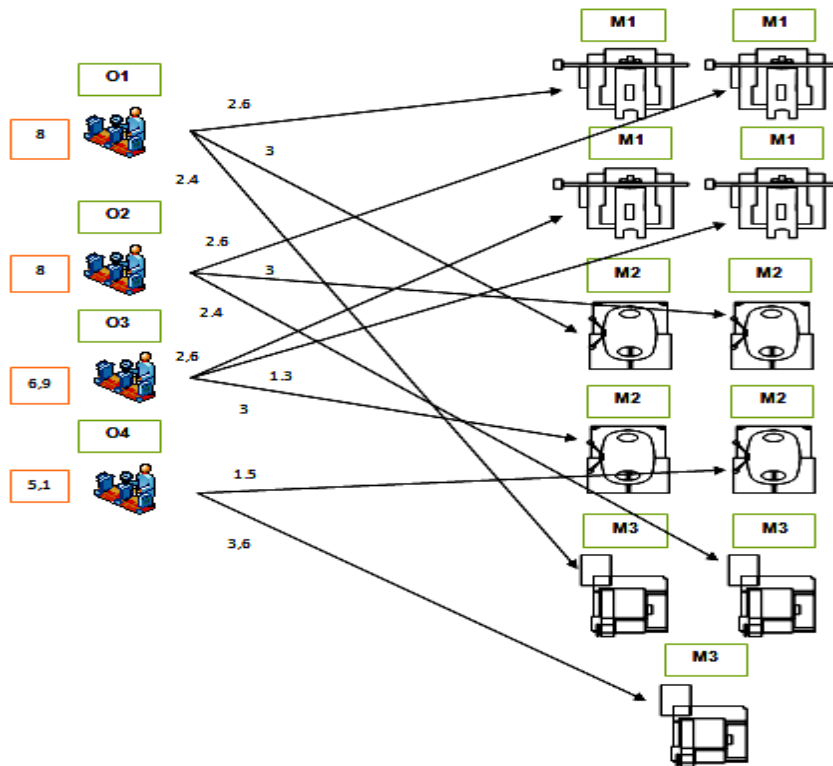
4.3 1.000

---- F1 = 0.716 balance de carga a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

En la figura 23, se muestra la asignación de los operarios escogida para este caso y que presenta los siguientes datos: tiempo de ciclo de 8.3 minutos, 7 unidades por ciclo, 4 operarios, 3 tipos de máquina, que han sido obtenidos anteriormente.

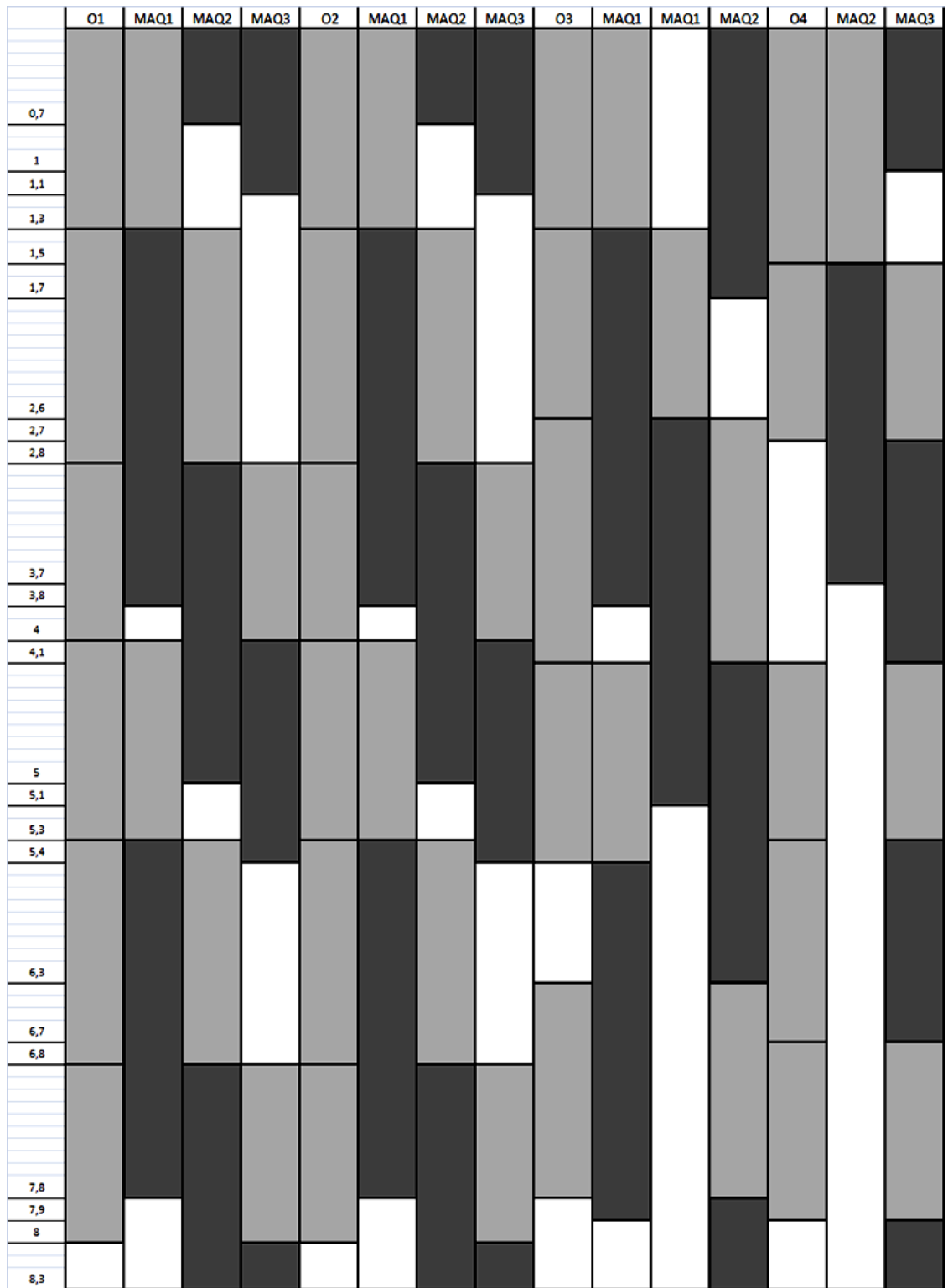
Figura 23. Asignación caso 8



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 24, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, la cual es de 2.9 minutos en donde el operario número 4 es el que tiene la mayor carga de la línea y los operarios 1 y 2 tienen la menor carga.

Figura 24. Diagrama Hombre-Máquina caso 8



Fuente: Autores

CASO 9

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 19 unidades por hora, número de tipo de máquinas 4 y la siguiente tabla 9 de tiempos.

Tabla 9. Tiempos caso 9

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
2,4	1,1
1,8	2,4
1,3	1,9
2,2	1,5

Fuente: Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 25.

Figura 25. Excel caso 9

DEMANDA	19	NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	4						
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR	NUMERO DE OPERAR			
1	2,4	1	1,1	17,159643	8,657105	3			
2	1,8	2	2,4	14,073563					
3	1,3	3	1,9	18,650649					
4	2,2	4	1,5	16,20367					
5		5		0					
6		6		0					
7		7		0					
8		8		0					
9		9		0					
10		10		0					
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA	TACKT TIME	3,09282	I	2	J	4	K	3
1	2								
2	2								
3	2								
4	2								
5	0								
6	0								
7	0								

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

----F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 6.18

----TC Tiempo de ciclo 6.18

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q. Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3	4
1	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000

---- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3	4
1	1.089	2.423	1.908	1.511
2	1.089	2.423	1.908	1.511

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

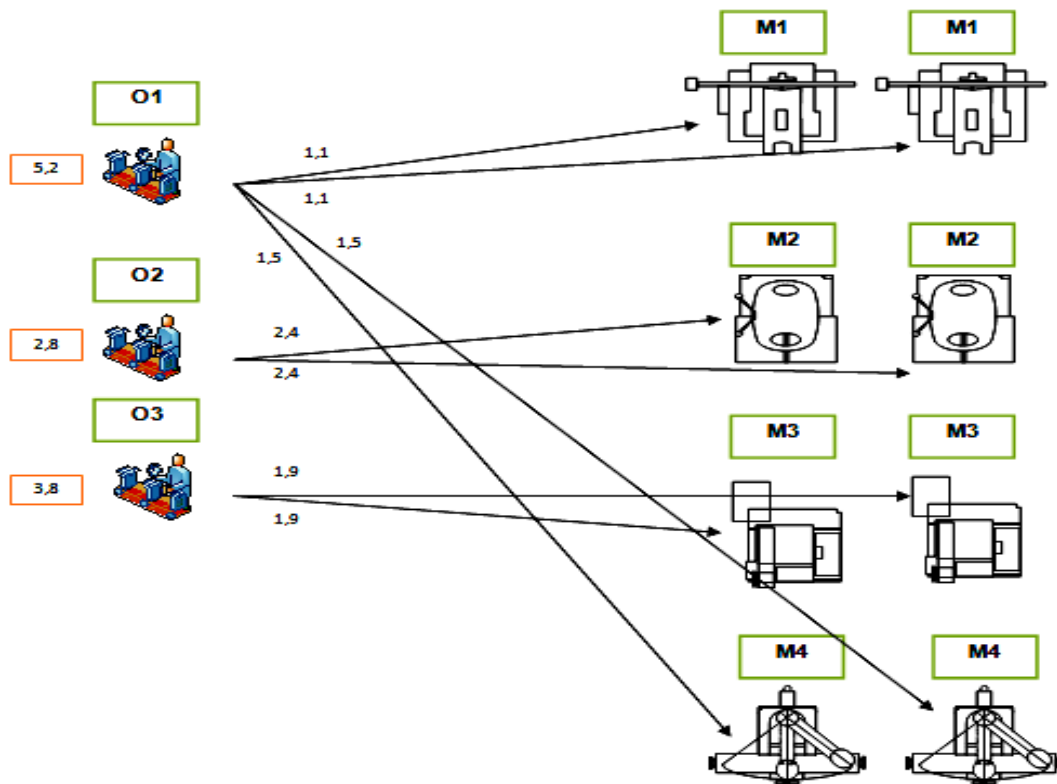
	k		
	1	2	3
1.1			1.000
1.2		1.000	
1.3	1.000		
1.4	1.000		
2.1	1.000		
2.2		1.000	
2.3			1.000
2.4			1.000

---- F1 = 0.337 balance de carga a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

En la figura 26 se muestra la asignación de los operarios escogida para este caso y que presenta los siguientes datos: tiempo de ciclo de 6.2 minutos, 2 unidades por ciclo, 3 operarios, 4 tipos de máquina, que han sido obtenidos anteriormente.

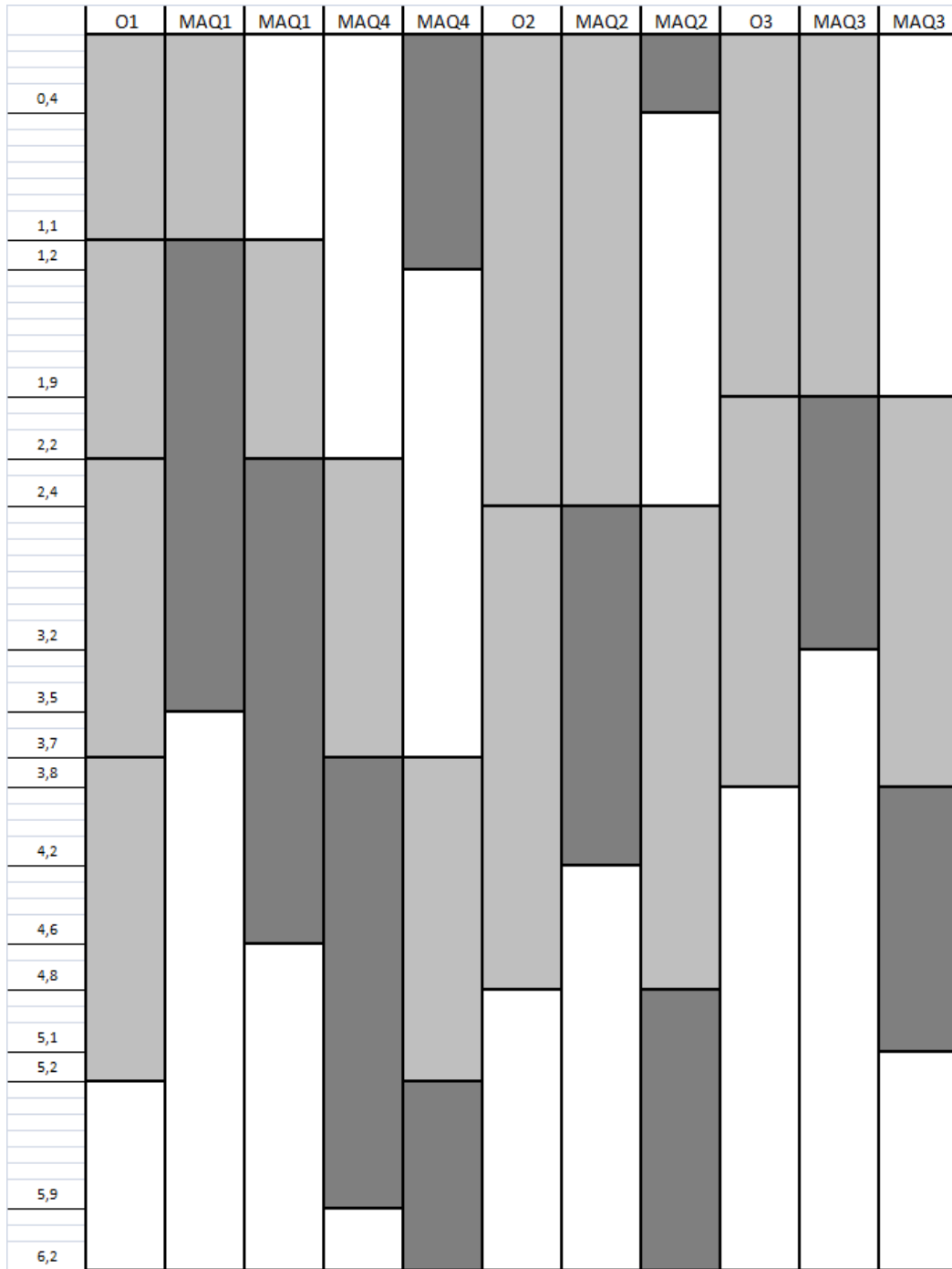
Figura 26. Asignación caso 9



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 27, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, la cual es de 2.9 minutos en donde el operario número 4 es el que tiene la mayor carga de la línea y los operarios 1 y 2 tienen la menor carga.

Figura 27. Diagrama Hombre-Máquina caso 9



Fuente: Autores

CASO 10

Valores generados aleatoriamente: Demanda de 21 unidades por hora, número de tipo de máquinas 5 y la siguiente tabla 10 de tiempos.

Tabla 10. Tiempos. Caso 10

TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)
1,5	1,8
1,8	2,3
1,2	2,0
1,7	1,5
2,6	1,1

Fuente. Autores

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos en Excel que se muestran en la figura 28.

Figura 28. Excel caso 10

DEMANDA	21	NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS	5						
TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARI	NUMERO DE OPERARI			
1	1,5	1	1,8	18,0597977	6,9400703	4			
2	1,8	2	2,3	14,7838224					
3	1,2	3	2,0	19,0069851					
4	1,7	4	1,5	18,9787207					
5	2,6	5	1,1	15,9872184					
6		6		0					
7		7		0					
8		8		0					
9		9		0					
10		10		0					
TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA	TACKT TIME	2,8203	I	2	J	5	K	4
1	2								
2	2								
3	2								
4	2								
5	2								
6	0								
7	0								

Fuente: Autores

- GAMS

Después de correr el modelo en GAMS, se obtuvieron los siguientes resultados:

----F Función objetivo de tiempo de ciclo a minimizar 5.64

----TC Tiempo de ciclo 5.64

---- QQ = 2.000 Unidades de producto por tipo de maquina

---- Q Unidades de producto a programar en la i-esima maquina tipo J

	1	2	3	4	5
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

---- WM Carga externa por cada tipo de maquina

	1	2	3	4	5
1	1.802	2.269	1.952	1.481	1.142
2	1.802	2.269	1.952	1.481	1.142

---- X 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario

	k			
	1	2	3	4
1.1		1.000		
1.2			1.000	
1.3				1.000
1.4		1.000		
1.5		1.000		
2.1	1.000			
2.2				1.000
2.3			1.000	

2.4 1.000

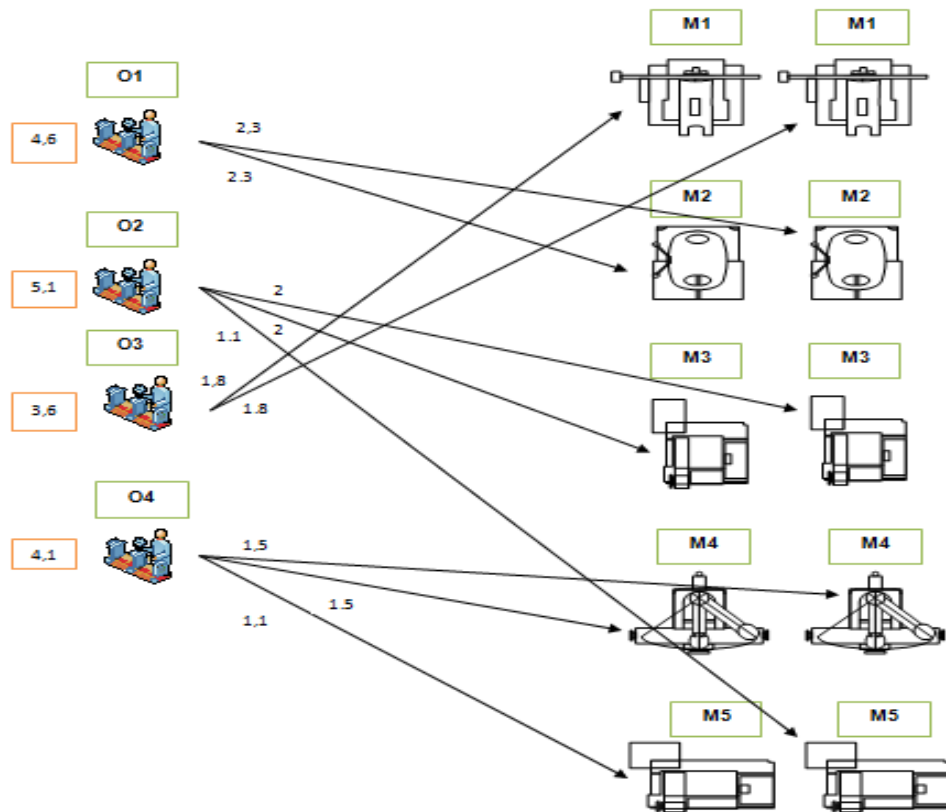
2.5 1.000

---- F1 = 0.203 balance de carga a minimizar

- Heurística de diagrama hombre-máquina

En la figura 29 se muestra la asignación de los operarios escogida para este caso y que presenta los siguientes datos: tiempo de ciclo de 5,6 minutos, 2 unidades por ciclo, 4 operarios, 5 tipos de máquina, que han sido obtenidos anteriormente.

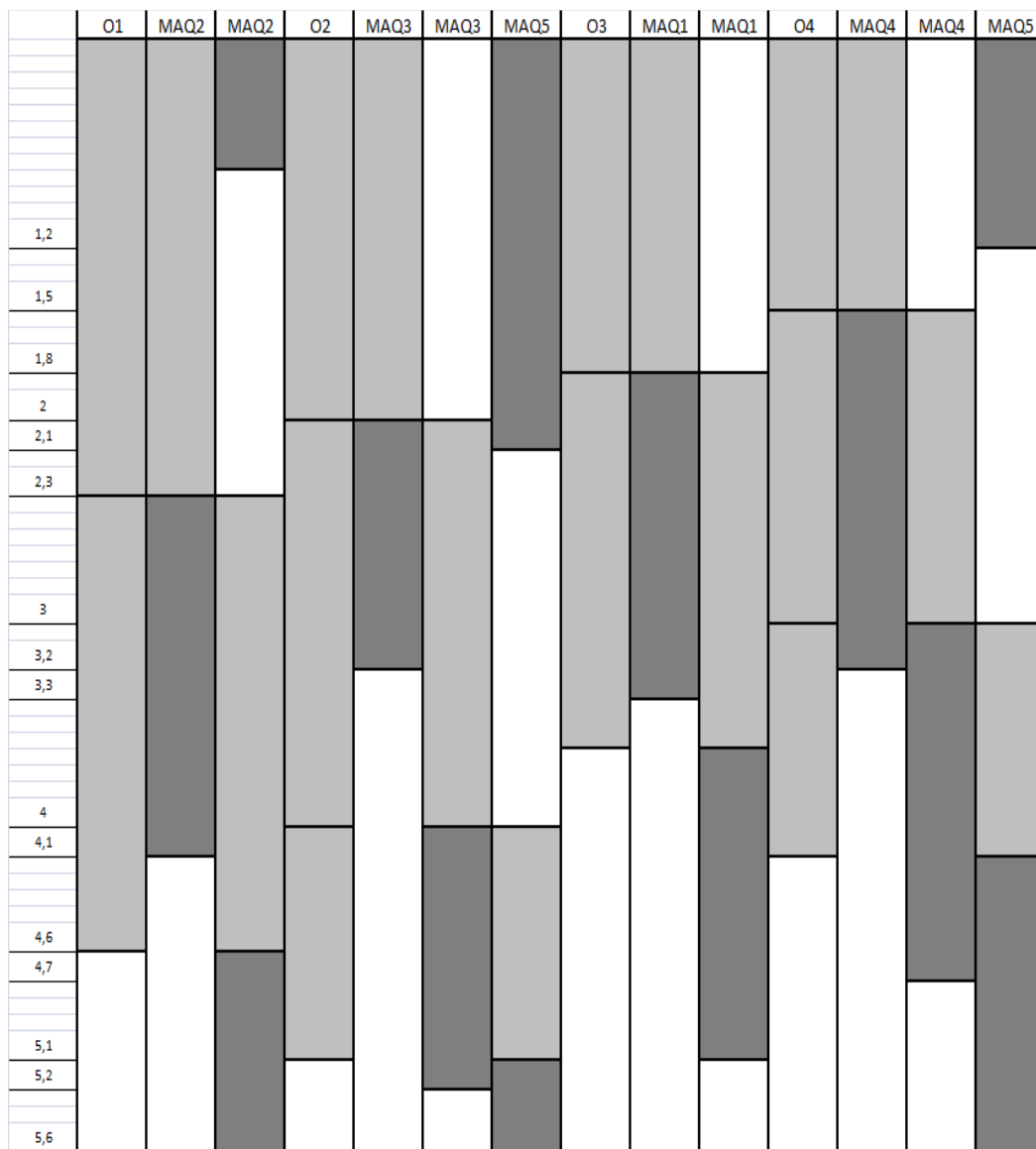
Figura 29. Asignación caso 10



Fuente: Autores

En el diagrama hombre-máquina que se muestra en la figura 30, se puede obtener la diferencia de carga de trabajo como se formuló en la función objetivo del balance de carga, la cual es de 1,5 minutos en donde el operario número 2 es el que tiene la mayor carga de la línea y el operario 3 tiene la menor carga.

Figura 30. Diagrama Hombre-Máquina caso 10



Fuente: autores

2012

ANEXO B: Manual para el manejo del modelo matemático: Balance de línea con máquinas semiautomáticas en GAMS y su vinculación con Excel



Jessica Andrea Pinto Pinzón
Silvana Daniela Reyes González



INTRODUCCIÓN

Este manual se hace con el fin de mostrar y aclarar el funcionamiento del modelo matemático de balance de línea de máquinas semiautomáticas en el programa GAMS 21.7 y su vinculación con EXCEL, a los estudiantes de la universidad Industrial de Santander interesados en seguir trabajando en este tema y profundizar para posteriores investigaciones en las que se realicen variaciones a las características del problema, se utilicen otros métodos de solución que optimicen los resultados primarios, búsqueda de posteriores aplicaciones prácticas en el sector real, publicaciones en artículos y proyectos de grado.

Este documento muestra paso a paso cómo funciona correctamente el programa tanto en GAMS como Excel, se explicará cómo se corre el programa, que cambios se deben hacer en las instrucciones GDXXRW para conectar GAMS con Excel y así extraer los datos del problema al programa; qué datos se encuentran en EXCEL y también, consejos que se deben tener en cuenta cuando se encuentre en Excel y en GAMS para que no se cometan errores al poner en marcha el modelo.

PASOS PREVIOS AL USO DEL PROGRAMA:

1. Crear una carpeta para colocar los archivos .txt de los sets i, j y k.
2. Guardar el archivo de Excel específico del caso que se va a correr en la carpeta Projdir.
3. Abrir este archivo de Excel, dirigirse al programador Visual Basic y cambiar las direcciones de donde se encuentran los archivos .txt de i, j, k para las instrucciones que se encuentran al comienzo y al final de la programación.
4. Cada vez que se quiera correr el modelo en GAMS, se debe guardar cambios y cerrar el archivo de Excel.

EXCEL

1. HABILITAR EL MACRO

Lo primero que se debe hacer es trabajar en Excel y abrir el archivo .xls. Hecho esto, aparecerá en la parte superior de la hoja de cálculo la siguiente imagen como se muestra en la figura 1, lo cual indica que el macro se encuentra deshabilitado.

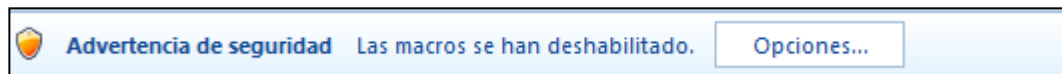


Figura 1.

Por tanto, se oprime **Opciones** como muestra la figura 1, y aparece un cuadro llamado alerta de seguridad de macro (figura 2), en el cual se da clic en la opción **Habilitar este contenido** y luego **Aceptar**. Dadas estas instrucciones ya queda habilitado el macro y ya se puede empezar a trabajar.

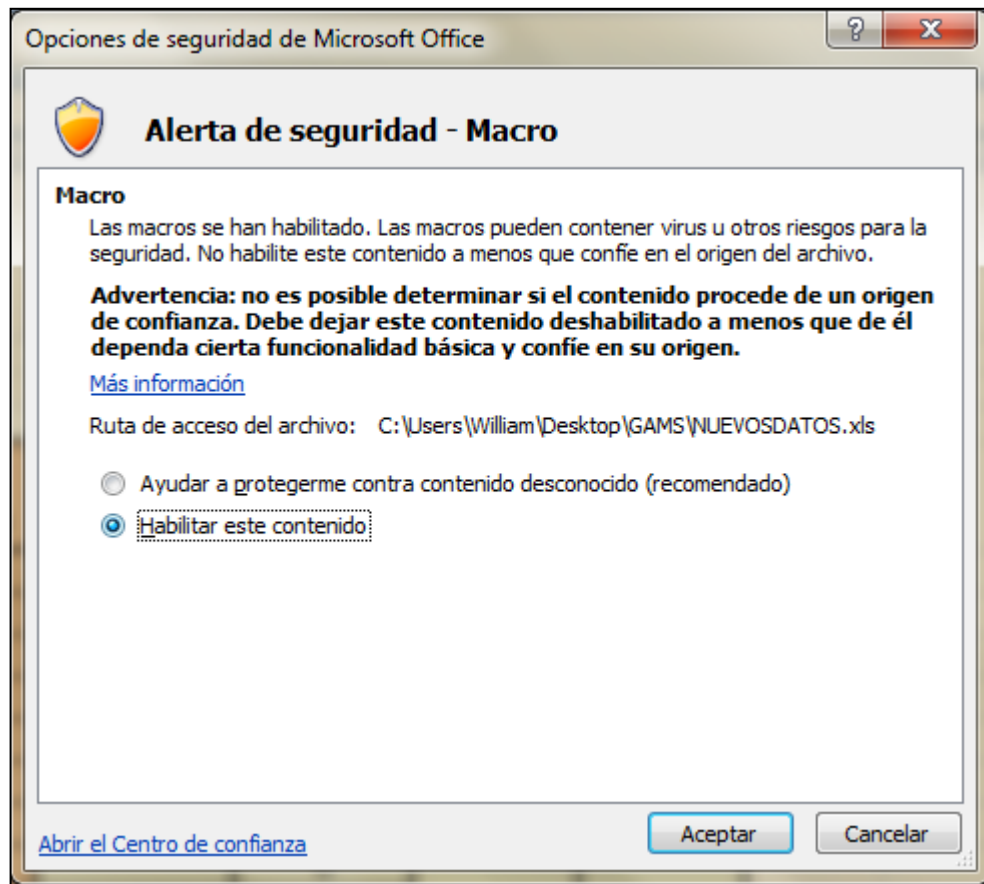


Figura 2.

2. INTRODUCIR DATOS DEL PROBLEMA EN EXCEL

En el archivo de Excel se encuentran unas casillas y una tabla para ingresar los datos necesarios para resolver el problema que son, la demanda (unidades/hora), número de tipos de máquinas y los tiempos internos y externos por cada tipo de máquinas (minutos). Estos datos se introducen en las casillas de color azul como se puede ver en la figura 3, cada dato en sus casillas correspondientes.

Cuando ya han sido introducidos los datos, la programación ya hecha en Excel calcula las capacidades de máquina y operario para hallar el número de máquinas necesarias por tipo y el número de operarios, respectivamente, y el takt time. Estos datos calculados se muestran en las casillas de color verde, como se ve en la figura 3.

Nota: Este ejemplo, se va a seguir llevando a lo largo del manual para una mejor comprensión de las instrucciones.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
3														
4			DEMANDA	14		NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS		3						
5														
6														
7														
8			TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARIO	NUMERO DE OPERARIOS					
9			1	2,8	1	1,9	12,585954	10,404002	2					
10			2	1,8	2	1,6	17,8690486							
11			3	1,0	3	2,3	18,3620621							
12			4		4		0							
13			5		5		0							
14			6		6		0							
15			7		7		0							
16			8		8		0							
17			9		9		0							
18			10		10		0							
19														
20														
21			TIPO DE MAQUINA	CANTIDAD DE MAQUINA										
22			1	2			TAKT TIME	4,3374		I	J	K		
23			2	1						1	1	1		
24			3	1						2	2	2		
25			4	0							3			
26			5	0										
27			6	0										
28			7	0										

Figura 3.

3. INTERPRETACIÓN TABLA DE ÍNDICES I,J,K

En la hoja de cálculo se encuentran dos tablas adicionales que son de ayuda para que los datos calculados se vinculen de una forma adecuada al programa en GAMS. En GAMS, hay una parte del modelo a definir que se llama SETS, que es como se le dice a los índices de las variables en las representaciones algebraicas de los modelos; por consiguiente en esta tabla se representa el índice I (número máximo de máquinas por tipo), J (número de tipos de máquinas) y K (número de operarios), como lo muestra la figura 4.

Como se puede observar, las casillas donde se encuentran estos datos son de color verde, lo que significa que se obtuvieron de cálculos hechos en Excel.

I	2
J	3
K	2

Figura 4.

4. ACTIVAR EL MACRO (SEGUNDA TABLA DE ÍNDICES)

La segunda tabla es un macro que se activa con control + s, que lo que hace es transformar los números mostrados en la tabla anterior (figura 4), en número de filas, ya que esto facilita que GAMS llene bien los SETS. GAMS cuenta las filas y luego este número lo convierte en el conjunto correspondiente para cada índice I, J, K en los SETS. En la figura 5, se muestra como aparece inicialmente la tabla con el macro sin activar y como aparece luego activado según los datos que se introduzcan.

I	J	K
1	1	1
2	2	2
	3	

Figura 5.

Nota: Cada vez que se realice un ejemplo diferente, se debe borrar la tabla que hace el macro, dejándola como se tenía inicialmente.

Cuando aparezca la tabla, ya se ha terminado el trabajo en Excel, entonces se guardan cambios y se cierra el archivo.

GAMS

1. CAMBIOS EN LAS INSTRUCCIONES GDXXRW (LENGUAJE DE VINCULACIÓN GAMS Y EXCEL).

Cuando se abre el archivo de GAMS llamado modelo final, se va a encontrar la programación del problema y unas instrucciones adicionales GDXXRW en SETS, PARAMETERS y SCALARS. Estas instrucciones ayudan a que los datos que se calcularon en el archivo de Excel se carguen en el modelo de GAMS en sus respectivos lugares y se pueda correr de una vez el modelo.

El cambio de instrucciones es necesario cada vez que se va a realizar un problema con datos diferentes o cuando se corre desde un ordenador diferente. A continuación se va a mostrar como es el proceso.

1.1 Cambio de instrucciones en los SETS:

Para extraer los datos que van en los SETS, en el archivo de Excel se encuentra un macro que realiza este trabajo y lo va guardando en un block de notas para cada índice; uno para I, otro para J y otro para K. Por tanto, con las instrucciones que se muestran en la figura 6, hace que el lea los datos de los respectivos blocks siguiendo la dirección de donde se encuentran guardados los archivos.

Si se llega a correr el modelo en otro ordenador es muy importante cambiar la dirección de donde se encuentran guardados ahora los archivos.

```
SETS
  I Indica el numero de maquinas existentes por cada tipo
/
$include C:\Users\William\Desktop\GAMS\i.txt
/;
SETS
  J Indica el numero de tipos de maquina
/
$include C:\Users\William\Desktop\GAMS\j.txt
/ ;
SETS
  K Indica la cantidad de operarios a asignar
/
$include C:\Users\William\Desktop\GAMS\k.txt
/;
```

Figura 6.

1.2 Cambio de las instrucciones en PARAMETERS:

Los parámetros que se consideraron necesarios en el modelo son los tiempos de trabajo interno y externo por tipo de máquina, denominados $L(j)$ Y $P(j)$, respectivamente.

En esta parte se realizan tres cambios; el primero es el cambio de dirección donde se encuentra guardado el archivo de Excel como se muestra subrayado en la figura 7.

```

Parameters
L(J)      Tiempo de trabajo interno de la maquina tipo J
P(J)      Tiempo de trabajo independiente de la maquina tipo J ;

$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gamsdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=L rng=C9:D11 rdim=1
$GDXIN NUEVOSDATOS.gdx
$LOAD L
$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gamsdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=P rng=E9:F11 rdim=1
$GDXIN NUEVOSDATOS.gdx
$LOAD P
$GDXIN

```

Figura 7.

El segundo cambio es el rango donde se encuentran los valores para cada parámetro en el archivo de Excel. Para dar un ejemplo, como se ve en la figura 8, el parámetro tiempo interno L(j) está en el rango de C9:D11 y el parámetro tiempo externo P(j) está en el rango E9:G11.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
3										
4			DEMANDA	14		NUMERO DE TIPOS DE MAQUINAS		3		
5										
6										
7										
8			TIPO DE MAQUINA	TIEMPO INTERNO DE LA MAQUINA (L)	TIPO DE MAQUINA	TIEMPO EXTERNO DE LA MAQUINA (P)	CAPACIDAD DE LA MAQUINA	CAPACIDAD POR OPERARIO	NUMERO DE OPERARIOS	
9			1	2,8	1	1,9	12,585954	10,404002	2	
10			2	1,8	2	1,6	17,8690486			
11			3	1,0	3	2,3	18,3620621			
12			4		4		0			
13			5		5		0			
14			6		6		0			
15			7		7		0			
16			8		8		0			
17			9		9		0			
18			10		10		0			
19										

Figura 8.

Y estos respectivos rangos se introducen en PARAMETERS en GAMS como se muestra subrayado en la figura 9.

Parameters	
L(J)	Tiempo de trabajo interno de la maquina tipo J
P(J)	Tiempo de trabajo independiente de la maquina tipo J ;
\$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gamsdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=L	<u>rng=C9:D11</u> rdim=1
\$GDXIN NUEVOSDATOS.gdx	
\$LOAD L	
\$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gamsdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=P	<u>rng=E9:F11</u> rdim=1
\$GDXIN NUEVOSDATOS.gdx	
\$LOAD P	
\$GDXIN	

Figura 9.

Y el tercer cambio, es respecto al nombre del archivo de Excel que se debe colocar en las instrucciones como se muestra subrayado en la figura 10.

Cuando se hace un cambio en el nombre del archivo, por ejemplo NUEVOSDATOS2, esta modificación se debe cambiar en todas las instrucciones de Excel donde se encuentre.

Parameters	
L(J)	Tiempo de trabajo interno de la maquina tipo J
P(J)	Tiempo de trabajo independiente de la maquina tipo J ;
\$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gamsdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=L	rng=C9:D11 rdim=1
\$GDXIN <u>NUEVOSDATOS</u> .gdx	
\$LOAD L	
\$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gamsdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=P	rng=E9:F11 rdim=1
\$GDXIN <u>NUEVOSDATOS</u> .gdx	
\$LOAD P	
\$GDXIN	

Figura 10.

1.3 Cambio de las instrucciones en SCALARS:

En esta parte sólo se debe colocar la dirección donde se encuentra guardado el archivo de Excel NUEVOSDATOS y colocar el nombre del archivo como se ha guardado, como se muestra subrayado en la figura 11.

<pre> SCALARS TT Takt time NOP Numero de operarios * vop tiempo de carga de trabajo minima por operario /0/ ; \$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gammdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=TT rng=H22 dim=0 \$GDXIN NUEVOSDATOS.gdx \$LOAD TT \$CALL GDXXRW.EXE C:\Users\William\Documents\gammdir\projdir\NUEVOSDATOS.xls par=NOP rng=H27 dim=0 \$GDXIN NUEVOSDATOS.gdx \$LOAD NOP \$GDXIN </pre>	
--	--

Figura 11.

2. INSTRUCCIÓN CUANDO HAY MÁQUINAS QUE NO EXISTEN

Como se observó en la figura 4, siguiendo el ejemplo que se lleva, la máquina 2 de la tipo 2 y la máquina 2 de la tipo 3, no existen. Cuando ocurren estos casos, hay una instrucción en GAMS, para decir en el modelo que estas máquinas no existen y así cuando se corra el modelo no las tome en cuenta; la instrucción se muestra en la figura 12 y se debe colocar después de la declaración de variables.

Si se cambian los datos del problema y ahora las máquinas que no existen son otras solamente se cambian los números i, j, es decir, $Q.FX("i","j")=0$; esto dice que la máquina i de la tipo j no existe. Cuando se coloca un asterisco antes de la instrucción como se ve en la figura quiere decir que no es válida no la toma en cuenta.

```

Q.FX("2","3")=0;
Q.FX("2","2")=0;
*Q.FX("4","5")=0;
*Q.FX("3","5")=0;
*Q.FX("4","6")=0;

```

Figura 12.

3. CORRER EL PROGRAMA Y BÚSQUEDA DE RESULTADOS

Por último se corre el programa para ver los resultados del problema. Esta acción se realiza haciendo clic en el botón **Run GAMS**, como se muestra en la figura 13.

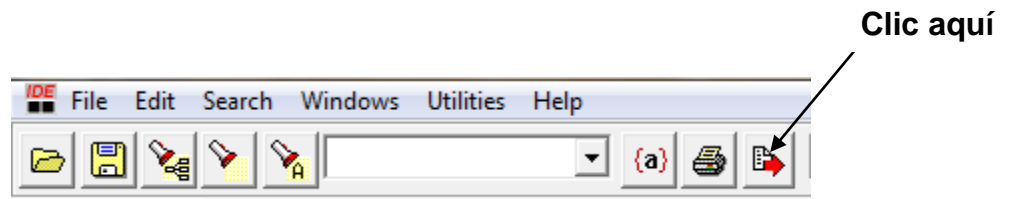


Figura 13.

Después de correr el programa, aparece una nueva pestaña donde se encuentran los resultados. En esa nueva hoja se buscan los displays que se colocaron en el modelo, que es para que se muestren los resultados que se necesitan. Para este ejemplo, los resultados que se obtienen de la primera parte del modelo se muestran en la figura 14, donde se muestra el valor de QQ (unidades de producto por tipo de máquina), $Q(i,j)$ (unidades de producto a programar en la i -ésima máquina tipo j) y $Wm(i,j)$ (carga externa por máquina).

```

General Algebraic Modeling System
Execution

---- 113 VARIABLE QQ.L = 2.000 Unidades de producto
      por tipo de maquina

---- 113 VARIABLE Q.L Unidades de proucto a programar en la i-esima maquina
      tipo J
      1 2 3
1 1.000 2.000 2.000
2 1.000

---- 113 VARIABLE WM.L Carga externa por maquina
      1 2 3
1 1.948 3.136 4.502
2 1.948

---- 113 VARIABLE TC.L = 8.675 Tiempo de ciclo
  
```

Figura 14.

En la parte de abajo de la hoja, se encuentran los resultados de la segunda parte del modelo como se muestra en la figura 15, donde se encuentra la asignación de máquinas a los operarios $X(i,j,k)$ y la función objetivo que es minimizar el balance de carga de los operarios.

Esta función objetivo debe tender a cero ya que esto significa que los trabajadores están trabajando por igual; en este caso dió un valor de 1.365, que es el resultado de la diferencia de la carga de trabajo máxima de un operario con la carga de trabajo mínima de un operario, pero en este ejemplo como solo hay 2 operarios, sería la diferencia entre las cargas de trabajo del operario 1 y 2.

Respecto a la asignación de los operarios hay que tener en cuenta las máquinas que no existen, ya que el programa las asigna a los operarios pero como máquinas imaginarias, igual el programa no realizó ningún cálculo con éstas máquinas, no las tuvo en cuenta. Teniendo en cuenta lo dicho, la asignación de las máquinas queda de la siguiente forma: el operario 1 con la máquina 1 tipo 2 y la máquina 2 tipo 1; y el operario 2 con la máquina 1 tipo 1 y la máquina 1 tipo 3.

```

General Algebraic Modeling System
Execution

---- 149 VARIABLE X.L 1 si la i-esima maquina tipo J es asignada al operario
      k
      1      2
1.1      1.000
1.2      1.000
1.3      1.000
2.1      1.000
2.2      1.000
2.3      1.000

---- 149 VARIABLE F1.L = 1.365 balance de carga a mi
      nimizar

```

Figura 15.

Esto es lo último que se realiza en GAMS, ya lo único que queda es que cuando se tengan todos los resultados se hagan unas buenas conclusiones del problema y se analicen los datos que se obtuvieron.

