

**PROPUESTA PARA EL BALANCE DE LÍNEA DE
MODELOS MIXTOS EN AMBIENTES *MAKE TO ORDER***

LUIS FELIPE DURANGO CRUZ

LUIS ALBERTO ORTIZ DORADO



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ESTADÍSTICA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2013**

**PROPUESTA PARA EL BALANCE DE LÍNEA DE
MODELOS MIXTOS EN AMBIENTES *MAKE TO ORDER***

LUIS FELIPE DURANGO CRUZ

LUIS ALBERTO ORTIZ DORADO

Director

JUAN PABLO OREJUELA MSC



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ESTADÍSTICA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2013**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Juan Pablo Orejuela MSC - Director

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, 8 de julio de 2013

AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a Dios porque me lo ha dado todo,
a mis padres por su apoyo incondicional,
a mis hermanos que también me han colaborado mucho,
a mis profesores por haber iluminado mi mente con la luz de sus conocimientos*

Luis Felipe Durango Cruz

*Le doy gracias a Dios por darme la oportunidad de estar en esta universidad,
a mis padres por apoyarme en todo el camino de mi carrera,
a mis familiares que me han apoyado de una u otra forma,
a todos mis compañeros porque de todos algo aprendí en algún momento
Y a nuestros excelentes profesores que nos han tratado de despertar ese gusto por el conocimiento y la
investigación.
También a todas las personas que han aportado un granito de arena para poder culminar este largo
recorrido en la universidad.*

Muchas gracias a todos, Dios los bendiga.

Luis Alberto Ortiz Dorado

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	11
1.1 OBJETIVO GENERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2. AMBIENTES DE MANUFACTURA	13
2.1.1 MAKE TO STOCK	13
2.1.2 MAKE TO ORDER.....	14
2.1.3 ASSEMBLY TO ORDER (ATO)	15
2.1.4 ENGINEERING TO ORDER (ETO)	15
3. LÍNEAS DE ENSAMBLE.....	18
3.1 HISTORIA DE LAS LÍNEAS DE ENSAMBLE.....	18
3.2 DEFINICIÓN DE LÍNEA DE ENSAMBLE	18
3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE ENSAMBLE	19
3.3.1 Según el Número de Modelos.....	20
3.3.2 Según el Sistema de Control	23
3.3.3 Según la Frecuencia de Instalación	25
3.3.4 Según el Nivel de Automatización de la Línea	26
3.3.5 Según el Tipo de Industria	27
4. PROBLEMA DE BALANCE DE LÍNEA DE ENSAMBLE (ALB)	29
4.1 PROBLEMAS SALBP (<i>SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM</i>)	32
4.1.1 Supuestos de los SALBP	32
4.1.2 Clasificación de los SALBP	33
4.1.3 Formulaciones Matemáticas para los SALBP	34
4.2 PROBLEMAS GALBP (<i>GENERALIZED ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM</i>)	35

4.2.1	Problemas UALBP (<i>Assembly U-Line Balancing Problem</i>)	36
4.2.2	Problemas MALBP (<i>Mixed Assembly Line Balancing Problem</i>)	37
4.2.3	Problemas RALBP (<i>Robotic Assembly Line Balancing Problem</i>)	37
4.2.4	Problemas MOALBP: (<i>Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem</i>).....	37
4.3	PROCEDIMIENTOS DE SOLUCIÓN PARA PROBLEMAS DE ALB	38
4.3.1	MÉTODOS EXACTOS.....	38
4.3.2	PROCEDIMIENTOS APROXIMADOS	39
5.	BALANCE DE LÍNEA DE ENSAMBLE DE MODELOS MIXTOS EN AMBIENTES MTO	41
5.1	FACTORES QUE AFECTAN EL PROBLEMA DE ALB EN AMBIENTES MTO.....	42
5.2	EL PROBLEMA DE LA SECUENCIACIÓN	44
5.3	INDICADORES DE DESEMPEÑO	45
5.4	METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN PARA LOS MALBP en ambientes mto	46
5.4.1	Reducción a Problema de Único Modelo	46
5.4.2	Balance Horizontal.....	48
5.4.3	Otras Metodologías.....	49
5.5	MODELOS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA	50
5.5.1	Modelo Matanachai & Yano (2001).....	50
5.5.2	Modelo Bukchin, et al. (2002)	53
6.	DESARROLLO METODOLÓGICO	56
6.1	MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO.....	57
6.1.1	Formulación Verbal.....	57
6.1.2	Supuestos.....	58
6.1.3	Notación de Índices	58
6.1.4	Notación de parámetros.....	58
6.1.5	Variables de Decisión	59
6.1.6	Función Objetivo.....	59

6.1.7	Restricciones	60
6.2	CASO DE ESTUDIO	62
6.2.1	Parámetros Generales	62
6.2.2	Participación de Cada Modelo	62
6.2.3	Cargas de Trabajo	63
6.2.4	Carga de Trabajo Total	63
6.2.5	Carga Promedio de la Línea	63
6.2.6	Relaciones de Precedencia	64
6.2.7	Relaciones de Asignación	65
6.3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN EN LINGO	65
6.4	RESULTADOS	66
6.4.1	Configuración inicial	66
6.4.2	Configuración Propuesta	69
6.4.3	Beneficios Obtenidos con la Configuración Propuesta	73
6.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	74
6.5.1	Escenarios con Diferentes Tiempos de Duración de Cada Tarea	74
6.5.2	Escenarios con Diferente Participación de Cada Modelo en el <i>Mix</i> de Demanda	76
6.5.3	Escenarios con Diferente Número de Estaciones	77
6.6	SIMULACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN	79
6.6.1	Configuración Inicial	80
6.6.2	Configuración Propuesta	80
7.	CONCLUSIONES	82
	ANEXOS	85
	ANEXO 1. MODELO PROPUESTO PARA EL ALB DE MODELOS MIXTOS	85
	ANEXO 2. ALGORITMO EN LINGO DEL MODELO PROPUESTO	86
	ANEXO 3. MODELO PARA EL MÉTODO DE REDUCCIÓN A ÚNICO MODELO	88

ANEXO 4. ALGORITMO EN LINGO DEL MODELO DE REDUCCIÓN A ÚNICO MODELO	89
8. BIBLIOGRAFÍA.....	91

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Comparación entre los ambientes de manufactura.....	16
Tabla 2. Clasificación de las líneas de ensamble según su sistema de control	23
Tabla 3. Versiones de los SALBP	33
Tabla 4. Tiempo de duración de la tarea k para modelo j	63
Tabla 5. Conjunto de predecesoras inmediatas de la tarea k	65
Tabla 6. Asignación de tareas a las estaciones en la configuración inicial de la línea.....	66
Tabla 7. Carga de trabajo de la tarea k para el modelo j en la estación i con la configuración inicial.....	67
Tabla 8. Tiempo ocioso de cada modelo en la configuración inicial	68
Tabla 9. Sobreutilización para la <i>variación entre las estaciones</i> OUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial	68
Tabla 10. Subutilización para la <i>variación entre las estaciones</i> UUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial	68
Tabla 11. Sobreutilización para la <i>variación dentro de las estaciones</i> OUW_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial	69
Tabla 12. Subutilización para la <i>variación dentro de las estaciones</i> UW_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial	69
Tabla 13. Asignación de tareas a las estaciones en la configuración propuesta para la línea ...	70
Tabla 14. Carga de trabajo de la tarea k para el modelo j en la estación i con la configuración propuesta.....	70
Tabla 15. Tiempo ocioso de cada modelo en la configuración propuesta.....	71
Tabla 16. Sobreutilización para la <i>variación entre las estaciones</i> OUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta.....	72
Tabla 17. Subutilización para la <i>variación entre las estaciones</i> UUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta	72
Tabla 18. Sobreutilización para la <i>variación dentro de las estaciones</i> OUW_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta.....	72

Tabla 19. Subutilización para la variación entre las estaciones UUW_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta	73
Tabla 20. Desviación absoluta y variación de los tiempos de proceso para las dos configuraciones de la línea	73
Tabla 21. Desempeño de cada estación en la simulación de la configuración inicial	80
Tabla 22. Desempeño de cada modelo en la simulación de la configuración inicial	80
Tabla 23. Desempeño de cada estación en la simulación de la configuración propuesta.....	81
Tabla 24. Desempeño de cada modelo en la simulación de la configuración propuesta	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Línea de ensamble de modelos mixtos con 4 tipos de modelos	10
Figura 2. Concepto de línea de ensamble.....	19
Figura 3. Clasificación de las líneas de ensamble investigadas	20
Figura 4. Línea de ensamble de modelo único.....	21
Figura 5. Línea de ensamble de modelos mixtos	21
Figura 6. Línea de ensamble de múltiples modelos	22
Figura 7. Ejemplo de diagrama de precedencia	30
Figura 8. Ejemplo de línea de ensamble balanceada	30
Figura 9. Línea de ensamble en U	36
Figura 10. Ejemplo de diagrama de precedencia de dos modelos	43
Figura 11. Esquema del desarrollo metodológico.....	56
Figura 12. Diagrama de precedencia combinado para los tres modelos	64
Figura 13. Estabilidad de las cargas de trabajo según la duración p_{ij} del modelo j en la estación i obtenida con el balance tradicional	67
Figura 14. Estabilidad de las cargas de trabajo según la duración p_{ij} del modelo j en la estación i obtenida con el balance horizontal.....	71
Figura 15. Variación entre las estaciones en escenarios con diferentes valores para la duración de cada tarea d_{ijk}	75
Figura 16. Variación dentro de las estaciones en escenarios con diferentes valores para la duración de cada tarea d_{ijk}	75
Figura 17. Variación entre las estaciones en escenarios con diferente participación m_j de cada modelo.....	76
Figura 18. Variación dentro de las estaciones en escenarios con diferente participación m_j de cada modelo	77
Figura 19. Variación dentro de las estaciones en escenarios con diferente número de estaciones I	78

Figura 20. Variación entre las estaciones en escenarios con diferente número de estaciones /	
.....	79

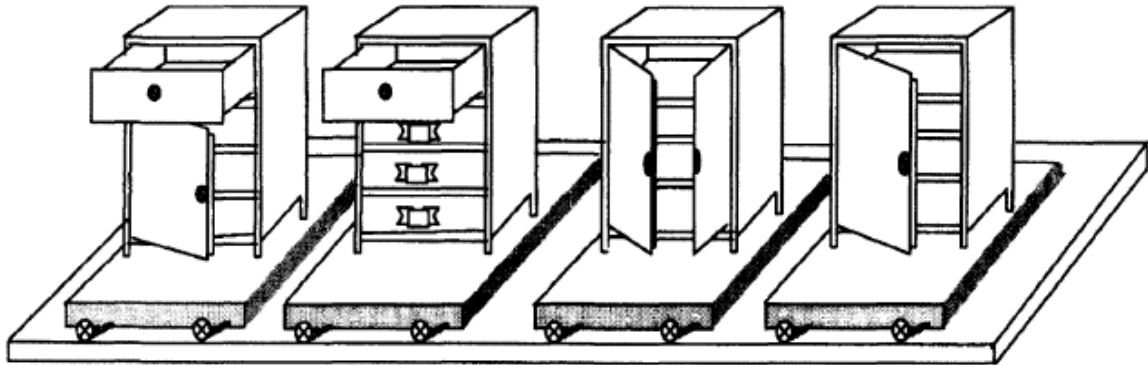
INTRODUCCIÓN

Para responder a los patrones de demanda modernos es indispensable que las empresas ofrezcan un amplio portafolio de productos que puedan ser elaborados en bajas cantidades y con pequeños *lead time*, por lo tanto es necesario que sus sistemas productivos sean lo suficientemente flexibles como para producir cualquier combinación de productos que fuese requerida por sus clientes, pero al mismo tiempo el sistema debe tener altos indicadores de eficiencia. En estos casos se pueden utilizar líneas de ensamble para aprovechar la ventaja de la eficiencia, pero añadiendo nuevas técnicas de balanceo que permitan tener un mayor grado de flexibilidad para elaborar diferentes productos.

Las líneas de ensamble convencionales fueron diseñadas para producir grandes cantidades de un único modelo, éstas son ideales para las empresas que compiten en mercados tradicionales de consumo masivo y deben fabricar altos volúmenes de bienes estandarizados, ya que permiten alcanzar altos indicadores de productividad aprovechando al máximo la utilización de los recursos. Sin embargo, los mercados globalizados despiertan en los clientes diferentes tipos de gustos que se renuevan constantemente, por esta razón los nuevos productos tienen ciclos de vida muy cortos, lo cual requiere cambios en las líneas de ensamble tradicionales. Una buena alternativa para tener sistemas de producción flexibles y al mismo tiempo alcanzar un alto grado de eficiencia es la implementación de líneas de ensamble de modelos mixtos dentro de ambientes de manufactura tipo *Make To Order* (MTO). A estos ambientes llegan órdenes de trabajo de manera aleatoria, donde cada una de ellas tiene diferentes especificaciones en las características del producto. Para las empresas que se desenvuelven en este tipo de entornos, el objetivo de balancear la línea de ensamble requiere ir más allá de la meta convencional de balancear la carga de trabajo uniformemente a través de las estaciones, para ello es necesario considerar otros factores que no se tienen en cuenta en las técnicas tradicionales de balance de línea, los cuales serán objeto de estudio en esta investigación.

El concepto de modelos mixtos hace referencia a una familia de productos que se compone por un conjunto de productos que se diferencian entre sí por características menores, pero cuyas funciones principales son básicamente las mismas. En el ejemplo de la Figura 1, se tienen varios tipos de muebles que se elaboran a partir de un modelo base, el cual se personaliza según los requerimientos del cliente. A pesar que estos productos se diferencian entre sí solamente por pequeños atributos específicos personalizables, se desea que el proceso productivo sea similar para todos ellos, por lo tanto es razonable pensar que estos productos pueden ser ensamblados en una misma línea, ya que los tiempos de alistamiento al pasar de un modelo a otro son despreciables. Otro ejemplo de esto es un mismo modelo de un automóvil con diferentes características en las puertas, el *sunroof*, el aire acondicionado, los vidrios, etc. El proceso de elaboración de un modelo mixto parte de un subensamble base a partir del cual se empiezan a personalizar ciertos atributos para producir un modelo final acorde con las preferencias del cliente (Boysen, et al., 2008).

Figura 1. Línea de ensamble de modelos mixtos con 4 tipos de modelos



Fuente: Sarker & Pan (2001)

El objeto de esta investigación es elaborar una propuesta para balancear las cargas de trabajo en las líneas de ensamble de modelos mixtos.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Cuando se les ofrece a los clientes la posibilidad de personalizar sus productos, el sistema productivo debe estar preparado para ello. Precisamente el hecho de que los productos no sean completamente homogéneos hace que el tiempo de proceso de una misma tarea pueda variar por cada uno de éstos, por lo tanto el tiempo de ciclo en las estaciones de la línea de ensamble dependerá en gran medida del modelo específico que esté siendo ensamblado en ese momento (Boysen, et al., 2008)

Si una línea que debe producir modelos mixtos ha sido balanceada con técnicas tradicionales, se pueden evidenciar problemas, ya que probablemente ésta no se encuentre en capacidad para producir de manera eficiente una determinada secuencia de órdenes de trabajo. Si una estación trabaja en varios modelos que requieren un alto tiempo de proceso, seguido uno de otro, el tiempo de ciclo podría ser excedido, produciendo una sobrecarga de trabajo que debe ser compensada por alguna medida correctiva tal como detener la línea, usar operarios auxiliares, retirar productos en proceso o forzar al operario para que aumente el ritmo de producción (Wild, 1972). En ningún caso estas medidas son deseadas ya que pueden ocasionar costos adicionales o deterioros en la calidad del producto. Tales sobrecargas podrían evitarse si se encuentra una secuencia de trabajo en la cual los modelos que requieren altos tiempos en una estación se alternan con los que requieren menos tiempo, esto conllevaría a un problema de *scheduling* a corto plazo (Boysen, et al., 2008), sin embargo si se balancean las cargas de trabajo dentro de cada estación para todos los modelos el *scheduling* será un problema trivial, porque así una secuencia que sea eficiente en una estación, también lo será en todas las demás. De hecho, la magnitud de la sobrecarga por sí sola es una medida de eficiencia para la línea de ensamble.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para el balance de línea de modelos mixtos en ambientes MTO para obtener cargas de trabajo estables.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los ambientes MTO para identificar los factores que afectan a las líneas de ensamble en estos entornos.
- Proponer un modelo matemático para balancear la carga de trabajo por cada producto en la línea de ensamble.
- Aplicar el modelo en un caso de estudio para validar sus resultados.

2. AMBIENTES DE MANUFACTURA

Las diferentes estrategias logísticas y de producción que se implementan en las industrias se pueden clasificar dentro de algún ambiente de manufactura. Según el ambiente se establecen los lineamientos para desarrollar las operaciones de dichas estrategias. Los ambientes de manufactura están clasificados así:

- *Make to Stock* (MTS),
- *Make to Order* (MTO),
- *Assembly to Order* (ATO), y
- *Engineering to Order* (ETO).

Algunos de los aspectos que se deben tener en cuenta a la hora establecer un ambiente de manufactura son el volumen de producción requerido y la vida útil del producto, el número de modelos a producir y variaciones en el diseño, la calidad de las partes y su consistencia el proceso de ensamble, el diseño del producto y las características de sus procesos.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los ambientes de manufactura, profundizando en MTO de acuerdo con los objetivos de esta investigación.

2.1.1 MAKE TO STOCK

Los ambientes MTS se caracterizan por la fabricación continua de productos para su posterior almacenamiento en espera de que sean requeridos por su comprador. En este tipo de ambiente de producción el cliente no tiene como influir en el diseño del producto, solo participa en la toma de la decisión de adquirir o no adquirir el producto, pero después que el producto ya se encuentra terminado (Wang, 2011).

Un ambiente MTS requiere que los productos estén diseñados y estandarizados previamente. En este tipo de ambientes se requieren operarios con un alto grado de especialización, dado que el flujo de productos es similar y por tanto se pueden estandarizar los procesos, es por esto que los equipos que se requieren son costosos ya que son muy especializados.

Según Machuca, et al. (1995) en estos ambientes se fabrican grandes lotes de pocos productos un poco diferentes pero técnicamente homogéneos, usando las mismas instalaciones. Se trata de productos cuyo proceso de producción en las estaciones de trabajo requiere de una secuencia similar de operaciones, aunque alguno de ellos pueda saltar alguna que no sea necesaria por lo que dichas estaciones se disponen en línea, una tras otra. Tras fabricar un lote de un producto, se procede a alistar las máquinas y se fabrica un lote distinto y así sucesivamente.

En estos ambientes la maquinaria es altamente especializada, generando una alta inversión en capital, así como una mayor automatización y homogeneidad de los procesos que en los

demás ambientes. La especialización del trabajo es también mayor que en los demás ambientes, gracias a esto se logra disminuir los costos variables por el aprovechamiento de las economías de escala, aunque se pierde flexibilidad. También suelen haber equipos con altos costos fijos y además que incurren en altos costos de alistamiento. Es necesario elaborar lotes de gran volumen para lograr un costo unitario bajo, siendo la principal razón por la cual en este ambiente se fabrica para almacenar en inventario.

Uno de los problemas principales en la planificación y el control de la producción está relacionado con la administración de los inventarios y la gestión de demanda. Por lo tanto los productos son fabricados con base en pronósticos de demanda. El problema aquí es predecir estas demandas con tal precisión que se evite el exceso de inventarios y/o la pérdida de ventas debido a la falta de existencias (Imaoka, 2008).

2.1.2 MAKE TO ORDER

Cuando la demanda de un producto es difícil de pronosticar con precisión, éste no se puede fabricar con base en pronósticos y tener la certeza de que será vendido oportunamente. Las empresas que producen con base en pronósticos corren el riesgo de incurrir en algunos casos, en los costos que conlleva un exceso de inventarios, por otra parte, también existe la posibilidad de que la demanda supere la oferta y se dejen de percibir ingresos por ventas perdidas o se tenga que obligar al cliente a esperar demasiado tiempo por su producto. Una manera para afrontar este tipo de situaciones es iniciar el proceso de producción solamente después de haber recibido la orden del cliente. Los ambientes manufactura que funcionan así son conocidos como MTO (Wang, 2011).

Los sistemas MTO tienen ciertas ventajas que benefician a las empresas, por ejemplo, la eliminación de inventarios de productos terminados y así sus costos de obsolescencia (Nicholas, 1997). Sin embargo, este beneficio viene acompañado con un aumento en el tiempo de respuesta para satisfacer los pedidos del cliente, además del costo por mantener alta la capacidad de producción para adaptarse a las variaciones de la demanda (Hopp & Spearman, 2000). Precisamente un factor importante en los ambientes MTO es la capacidad disponible. Con una demanda altamente variable, existen periodos donde la fábrica tendrá tiempos ociosos y otros en los cuales un gran número de pedidos tendrán que esperar para ser procesados por falta de capacidad. Por este motivo, es necesario programar la producción para mantenerse dentro del límite de capacidad, en algunos casos esto obliga a las empresas a enfrentarse con el problema para aceptar y programar de forma selectiva los pedidos de clientes con el objetivo de maximizar el beneficio económico global (Spengler, et al., 2007).

Otro factor importante que causa problemas dentro del sector industrial en general es de los tiempos de alistamiento, es frecuente en muchas empresas que los procesos de producción requieran altos tiempos de alistamiento, esto tiene un gran impacto negativo en la productividad de los ambientes MTO donde se producen pocas cantidades de cada tipo de producto, a diferencia de las plantas que operan en ambientes MTS las cuales generalmente fabrican grandes volúmenes. En muchos casos el problema del tiempo de alistamiento es más realista que el problema del costo de alistamiento, pero también es menos susceptible de análisis

(Wang, 2011). Al considerar los tiempos y los costos de alistamiento dentro de un marco con demanda estocástica se generan dificultades adicionales en el problema, por una parte los lotes pequeños son deseables porque permiten producir frecuentemente varios tipos de productos para responder a las variaciones de la demanda, pero también estos lotes incrementan la frecuencia con que deben hacerse los alistamientos, lo cual no sólo reduce la capacidad disponible para la producción y dificulta el cumplimiento oportuno de la demanda, sino que también incrementa los costos de alistamiento.

Desde el punto de vista de la gestión de las materias primas pueden existir diferentes estrategias, por ejemplo, en algunos casos, las materias primas se mantienen almacenadas en inventario y el proceso de ensamble de las partes empieza en el momento que un cliente realiza su pedido, en otros casos, el proceso se empieza con la obtención de las materias primas.

Los productos que tienden a ser fabricados en ambientes MTO, a menudo responden a requerimientos específicos de un cliente en particular, por lo tanto se espera un comportamiento intermitente o errático en los patrones de demanda de cada uno de éstos. Cada pedido potencial tiende a ser por un número diferente de unidades y generalmente requiere de diferentes métodos y tiempos a través de las estaciones de trabajo. Esto hace que las empresas se diferencien entre sí por el grado de personalización que se permite alcanzar con el producto, algunas no ofrecen esta posibilidad pero otras cubren la personalización total, la personalización de medidas, etc.

2.1.3 ASSEMBLY TO ORDER (ATO)

Este ambiente tiene muchas similitudes con MTO, la flexibilidad es moderada entre media y baja, los productos que son fabricados en este ambiente se caracterizan por estar previamente diseñados, pero a diferencia de MTO el proceso no arranca desde cero, ya que sus partes constitutivas se compran listas para ser ensambladas y sólo es hasta que el cliente define las últimas características del producto el ensamble se lleva a cabo.

2.1.4 ENGINEERING TO ORDER (ETO)

El supuesto básico en ETO es que el proceso es único e irrepetible, en el que el cliente define prácticamente todas las características del producto, incluido su diseño más básico. Los proyectos no pueden ser iniciados, sino que tienen que esperar todas las instrucciones del cliente para producirse.

La diferencia básica de ETO y MTO es que en el último las características del producto están prácticamente definidas y sólo se definen los detalles para mandarlo a producir, mientras que en ETO se trata de diseñar un producto para una necesidad específica del cliente.

De acuerdo a lo expuesto en este capítulo se puede concluir que los ambientes MTO son apropiados para la implementación de líneas de ensamble de modelos mixtos. La flexibilidad que se requiere en estos ambientes se puede obtener implementando líneas de modelos mixtos, ya que en éstas se puede fabricar cualquier combinación de modelos que pertenezcan a una misma familia en la cual los tiempos de alistamientos al pasar de uno a otro sean despreciables. Además de esto, las líneas de modelos mixtos se ven favorecidas en los ambientes MTO, ya que en estos los operarios deben ser polivalentes, es decir, que estén capacitados para desarrollar cualquier tarea diferente que se requiera en cada producto. Otro aspecto que favorece a las líneas de modelos mixtos es que los productos que se fabrican en ambientes MTO, tienen un diseño ya definido y estandarizado previamente al igual que todo su proceso de producción, esto hace que la etapa del diseño no exista por lo tanto los pedidos de los clientes podrían empezar a fabricarse inmediatamente o tan pronto como la programación lo defina.

Tabla 1. Comparación entre los ambientes de manufactura

	MAKE TO STOCK	ASSEMBLY TO ORDER	MAKE TO ORDER	ENGINEERING TO ORDER
TIPO DE CLIENTE	Mercado masivo	Clientes individuales	Clientes individuales	Exclusivo
TIPO DE PRODUCTO	Estandarizado	Semi-personalizado	Personalizado	Único
DEMANDA DEL PRODUCTO	Estable	Fluctuante	Fluctuante	Errática
VARIEDAD DE PRODUCTOS	Baja	Media	Alta	Muy alta
VOLUMEN DE DEMANDA	Alto	Media	Media – baja	Muy bajo
COSTO UNITARIO	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
INVERSIÓN	Alta	Baja	Baja	Moderada
EQUIPOS DE PRODUCCIÓN	Especializados	Variados	Multipropósito	Variados
INVENTARIO DE PRODUCTO TERMINADO	Muy alto	Bajo	Bajo	Muy bajo

	MAKE TO STOCK	ASSEMBLY TO ORDER	MAKE TO ORDER	ENGINEERING TO ORDER
FLEXIBILIDAD	Muy poca	Moderada	Moderada	Total
TAREA PRIMARIA	Ensamble	Ensamble	Fabricación	Contratos especializados
HABILIDAD DE LOS OPERARIOS	Gama de habilidades limitada	Gama de habilidades moderada	Amplia gama de habilidades	Expertos
VENTAJAS	Eficiencia, velocidad, bajo costo	Baja inventario producto terminado	Flexibilidad, calidad	Trabajo por encargo y a la medida
DESVENTAJAS	Inversión de capital	Alto inventario de materias primas	Costoso y lento	Clientela pequeña y no repetidora

Fuente: basado en Machuca, et al. (1995)

3. LÍNEAS DE ENSAMBLE

3.1 HISTORIA DE LAS LÍNEAS DE ENSAMBLE.

Originalmente las líneas de ensamble fueron desarrolladas para la producción masiva de bienes estandarizados aplicando el principio de la división del trabajo para incrementar la productividad, haciendo más eficiente el uso de los recursos y la especialización de la mano de obra (Shtub & Dar-El, 1989), (Scholl, 1999). Desde los tiempos de Smith (1776) se ha sabido que la división del trabajo permite entrenar las habilidades necesarias de los trabajadores y de esta manera aumentar la productividad, además de que el grado máximo de la división del trabajo se obtiene mediante la organización de la producción como un sistema de línea de ensamble (Smith, 1776). El principio de la división del trabajo ayudó a los trabajadores a hacer una sola tarea bien hecha, en lugar de ser responsable de muchas. Este sistema permitió dividir las operaciones complejas en procedimientos sencillos, capaces de ser ejecutados por obreros no especializados, dando como resultado la capacidad para obtener grandes volúmenes de producción a bajo costo. Con estos desarrollos de la era industrial en el siglo XX se logró que muchas personas obtuvieran productos hasta entonces sólo al alcance para las clases privilegiadas. En la época de la revolución industrial la producción en masa ya estaba organizada en sistemas de líneas de ensamble. Según Salveson (1955) la primera línea de ensamble fue introducida por Eli Whitney durante la Revolución Francesa para la fabricación de mosquetes, aunque el ejemplo más popular es la introducción de la línea de ensamble en 1913 en la planta de producción Highland-Park de Henry Ford en John R-Street, donde era fabricado el famoso modelo T.

Hoy en día los sistemas de producción en línea siguen existiendo porque el principio de aumentar la productividad mediante la división del trabajo es universal. Aunque el ejemplo más conocido de las líneas de ensamble es el de la industria automotriz, casi todos los bienes de uso masivo son elaborados mediante la producción en masa donde se requieren líneas de ensamble en varias etapas de los procesos, como por ejemplo la fabricación de cafeteras, tostadoras, muebles, lavadoras, neveras productos de la industria electrónica como radio televisores y computadoras se organiza en sistemas de línea de ensamble.

3.2 DEFINICIÓN DE LÍNEA DE ENSAMBLE

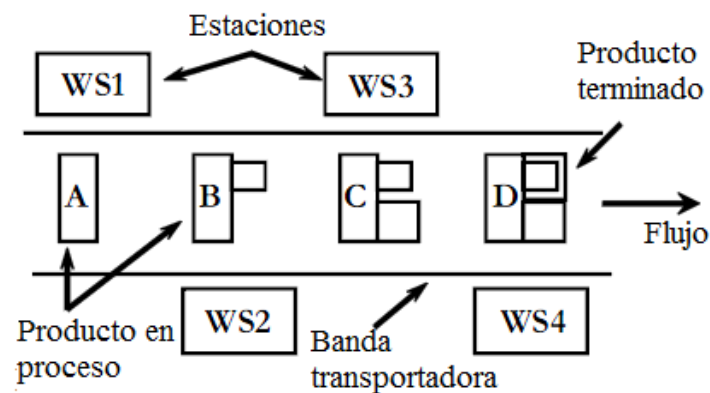
En la literatura existen varias definiciones sobre el concepto de línea de ensamble, sin embargo no difieren sustancialmente entre sí, a continuación se citan algunas de estas definiciones:

- Scholl & Becker (2004): una línea de ensamble consta de un determinado número de estaciones de trabajo organizadas a lo largo de una banda transportadora, en la cual las órdenes de trabajo son liberadas consecutivamente y se desplazan por cada estación

donde se desarrollan ciertas operaciones de manera repetida para cumplir con un tiempo de ciclo establecido.

- Rekiek & Dechambre (2006): una línea de ensamble es una serie de estaciones de trabajo organizadas como se muestra en la Figura 2, (de WS1 a WS4) conectadas por una banda transportadora, donde cada estación realiza una o más tareas sobre el producto en proceso (A, B y C) hasta obtener el producto terminado (D). Las tareas son realizadas por un conjunto de robots y/o trabajadores capacitados que utilizan ciertas herramientas. Después de un lapso de tiempo llamado tiempo de ciclo, se mueve la banda transportadora, colocando así cada producto frente a la estación siguiente en la línea. El producto (D) que se completa en la última estación sale de la línea. Las operaciones que tienen tareas predecesoras se someten a ciertas restricciones de precedencia, es decir, sólo se pueden realizar después de que todas sus tareas predecesoras se han completado.

Figura 2. Concepto de línea de ensamble



Fuente: Rekiek & Dechambre (2006)

- Boysen, et al. (2007): las líneas de ensamble son un sistema de producción orientado al flujo con estaciones alineadas en serie, donde se desarrollan operaciones productivas y las piezas visitan cada estación y son movidas a lo largo de la línea usualmente por algún sistema de transporte como por ejemplo una banda transportadora.

3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE ENSAMBLE

Boysen, et al. (2008) presentan una clasificación para las líneas de ensamble de acuerdo con los siguientes criterios:

- el número de modelos que se ensamblan,
- el sistema de control de la línea,
- la frecuencia de instalación,
- el nivel de automatización y
- el tipo de negocio.

En la Figura 3 se presenta el esquema de clasificación de estos criterios.

Figura 3. Clasificación de las líneas de ensamble investigadas

NÚMERO DE MODELOS	• modelo único • modelos mixtos • múltiples modelos
SISTEMA DE CONTROL	• con ritmo • sin ritmo desincronizada • sin ritmo sincronizada
FRECUENCIA	• instaladas por primera vez • reconfiguradas
NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN	• líneas manuales • líneas automáticas
TIPO DE INDUSTRIA	• producción de automóviles • otros

Fuente: Boysen, et al. (2008)

A continuación se describe detalladamente cada una de estas clasificaciones.

3.3.1 Según el Número de Modelos

Esta clasificación se basa en la variedad de los productos que son elaborados en la línea. Hay tres tipos de líneas según el número de modelos, éstas son:

- Líneas de modelo único,
- líneas de modelos mixtos y
- líneas de múltiples modelos.

3.3.1.1 Líneas de Ensamble de Modelo Único

Éstas son las líneas de ensamble tradicionales, las cuales son implementadas para producir grandes volúmenes de un solo producto como se ilustra en la Figura 4. Si más de un modelo es ensamblado sobre la misma línea, pero no ocurren variaciones significantes en los tiempos de alistamiento y de procesamiento de cada tarea, la línea también puede ser considerada como de modelo único. Debido a la homogeneidad en la producción de estos sistemas existe un alto grado división del trabajo, por lo tanto los operarios tienen un alto grado de especialización.

Figura 4. Línea de ensamble de modelo único



Fuente: Z.X. Guo et al. (2006)

Según Rekiek & Dechambre (2006) es factible utilizar una línea de ensamble de modelo único cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- La demanda del producto es constante y permite amortizar los costos de instalación y operación de la línea,
- el producto debe entregarse en un corto tiempo y los retrasos son penalizados,
- el producto tiene diferentes características que los productos que son elaborados en otras líneas,
- las fallas durante la producción son muy costosas, y
- la elaboración del producto requiere máquinas pesadas y/o voluminosas.

3.3.1.2 Líneas de Ensamble de Modelos Mixtos

Estas líneas están diseñadas para producir familias de productos en las cuales los tiempos de alistamiento al pasar de un modelo a otro son lo suficientemente pequeños como para ser despreciados, de esta manera se puede ensamblar un determinado *mix* de modelos en una misma línea con cualquier secuencia tal y como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Línea de ensamble de modelos mixtos



Fuente: Z.X. Guo et al. (2006)

Según Rekiek & Dechambre (2006) la utilización de este tipo de líneas de ensamble es recomendable en los siguientes casos:

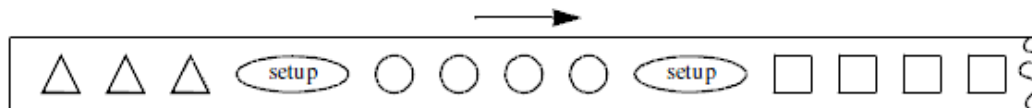
- El tiempo de ciclo es mayor que un minuto,
- el costo de implementar una línea de ensamble por cada producto no es viable económicamente,
- el producto no necesariamente tiene que ser entregado en un tiempo pequeño,
- cada modelo es similar a los demás que integran la familia de productos,
- la elaboración todos los productos requieren los mismos recursos, y
- los tiempos de alistamiento son lo suficientemente pequeños como para ser despreciados.

Usualmente los productos que son elaborados en estas líneas tienden a tener tareas y relaciones de precedencia muy similares, debido a su alto grado de homogeneidad. A pesar del grado de homogeneidad entre los modelos, existen variaciones en los tiempos de proceso de una misma tarea, por ejemplo en la industria automotriz, la instalación de un parabrisas eléctrico requiere una carga de trabajo diferente que la instalación de uno manual, por lo tanto el tiempo de ciclo en las estaciones de la línea de ensamble dependerá en gran medida del modelo específico que esté siendo ensamblado en ese momento (Boysen, et al., 2008).

3.3.1.3 Líneas de Ensamble de Modelos Múltiples

Los productos elaborados en líneas de ensamble de modelos múltiples carecen de cierto grado de homogeneidad en sus respectivos procesos productivos lo que impide alternar libremente las secuencias de producción debido a los altos tiempos de alistamiento en que se debe incurrir para pasar de un modelo a otro. Para disminuir estos costos la producción se organiza en lotes como se muestra en la Figura 6, esta situación conduce a un problema de dimensionamiento para determinar el tamaño más conveniente de cada lote y después decidir su secuencia de producción (Burns & Daganzo, 1987; Dobson & Yano, 1994). En los casos donde los tamaños de lote son muy grandes se podría realizar un ALB por separado para cada modelo dado que los tiempos de alistamiento entre los lotes serían relativamente pequeños en comparación con la carga total de trabajo. Por otra parte, si se hace un solo balance para toda la línea considerando todos los modelos, la sumatoria de los tiempos de alistamiento puede ser reducida considerablemente, lo que a su vez permite una fabricación de lotes más pequeños generando un sistema más flexible (Boysen, et al., 2008).

Figura 6. Línea de ensamble de múltiples modelos



Fuente: Scholl (2006)

Aunque los productos que se elaboran en las líneas de modelos múltiples son diferentes, se requiere que exista un determinado grado de similitud en sus procesos de manufactura ya que los diferentes modelos se fabrican mediante el uso de los mismos recursos de maquinaria, herramientas y operarios. Si el ALB se determina por separado para cada modelo, los recursos compartidos podrían requerir de trasladados a otras estaciones y ser reinstalados cada vez que el sistema de producción inicie la fabricación de un nuevo lote, esto aumentaría los tiempos y los costos de alistamiento (Boysen, et al., 2008).

Según Rekiek & Dechambre (2006) los factores que caracterizan a las líneas de ensamble de modelos múltiples son los siguientes:

- La demanda de los productos tiene variaciones ligeras,
- Los productos deben ser entregados en un corto tiempo

- El ensamble de algunos modelos requiere maquinaria pesada y/o voluminosa.
- El tiempo de alistamiento de la línea es corto

Este tipo de líneas conduce a los operarios a cambiar considerablemente de tarea con cada nuevo lote. Esto requiere una menor especialización del trabajo y puede resultar en el aumento de los costos de aprendizaje asociados a la adaptación constante de los operarios a sus nuevas tareas.

3.3.2 Según el Sistema de Control

Esta clasificación se basa en el ritmo con el cual viajan las piezas de trabajo a través de las estaciones. Si la línea utiliza una banda transportadora que se mueve continuamente a una velocidad constante se considera como una línea con ritmo (*paced*), en caso contrario es considerada como línea sin ritmo (*unpaced*). Por otra parte si todas las estaciones de la línea entregan las piezas de trabajo simultáneamente se considera como una línea sincronizada, pero si cada estación las entrega independientemente se considera como no sincronizada (véase Tabla 2). De acuerdo con estos criterios existen tres tipos de líneas (Boysen, et al., 2008):

- Líneas de ensamble con ritmo (*paced*),
- líneas de ensamble sin ritmo no sincronizadas, y
- líneas de ensamble sin ritmo sincronizadas.

Tabla 2. Clasificación de las líneas de ensamble según su sistema de control

	Tipo de sincronización	
	Las piezas se entregan simultáneamente	Las piezas no se entregan simultáneamente
Tipo de ritmo		
Desplazamiento continuo	Línea con ritmo	—
Desplazamiento no continuo	Línea sin ritmo sincronizada	Línea sin ritmo no sincronizada

Fuente: autores

3.3.2.1 Líneas de Ensamble con Ritmo (*Paced Line*)

Estas líneas suelen tener una banda transportadora que se desplaza continuamente a velocidad constante, es decir, que hay un tiempo de ciclo común predeterminado que se cumple obligatoriamente en todas las estaciones. Este ritmo es sostenido por la banda transportadora, lo que obliga a los operarios a terminar sus tareas antes de que la pieza de trabajo haya llegado al final de su respectiva estación. También se considera como líneas con ritmo aquellas que utilizan un sistema de transporte intermitente, donde la pieza de trabajo se

detiene completamente en cada estación, pero tan pronto como se cumple el tiempo de ciclo automáticamente pasa a la siguiente estación (Boysen, et al., 2008).

Si el movimiento de las piezas es continuo, la longitud de la línea debe definirse con base en el número de estaciones y el tiempo de ciclo. La longitud de una estación podría estar sujeta a restricciones técnicas, por ejemplo, por necesidades de espacio de maquinaria asignada.

3.3.2.2 Líneas de Ensamble Sin Ritmo No Sincronizadas (*Unpaced Asynchronous*)

En este tipo de líneas las piezas de trabajo siempre abandonan una estación de trabajo para pasar a la siguiente tan pronto como todas las operaciones que se deben ejecutar allí se hayan completado, después la estación continúa trabajando en una nueva pieza, a menos que la estación anterior no haya entregado su respectivo producto, por este motivo se les llama no sincronizadas, ya que cada estación tiene un tiempo de ciclo independiente al de las demás. Para contrarrestar este efecto se almacenan unidades temporales de producto en proceso entre las estaciones conocidas como buffer con el fin de minimizar los tiempos de espera, ya que esto ayuda a que el flujo de piezas se incremente. Sin embargo al decidir sobre la instalación de los buffer se debe considerar el equilibrio entre sus costos y el beneficio que esperado por incrementar el flujo.

Los buffer únicamente se pueden utilizar para compensar las desviaciones ocasionales de los tiempos de proceso, ya que si una estación siempre es más rápida que su predecesora, el buffer de almacenamiento pronto alcanzará su máxima capacidad hasta agotarse y perder su funcionalidad (Buzacott, 1971; Buxey, et al., 1973). Por lo tanto, el uso de líneas sin ritmo no sincronizadas con buffer sólo tiene sentido, si los tiempos de las estaciones están sujetos a variaciones que pudieran surgir a partir de tiempos de tareas estocásticos y/o averías de máquinas que pueden ocurrir incluso en el caso de tener tiempos de tareas determinísticos. El estudio de las líneas no sincronizadas ha revelado un atributo interesante conocido como "fenómeno tazón" (Hillier & Boling, 1966; Hillier & So, 1991), según el cual el flujo de una línea se puede mejorar asignando cargas de trabajo más pequeñas a las estaciones del centro que a las del principio y a las del final de la línea. El mismo concepto también se aplica para decidir sobre la ubicación del buffer, si se almacena un buffer en el centro de la línea o en las estaciones de cuello de botella se puede incrementar su flujo (Conway, et al., 1988).

3.3.2.3 Líneas de Ensamble Sin Ritmo Sincronizadas (*Unpaced Synchronous*)

En las líneas de ensamble con movimientos sincronizados todas las piezas de trabajo son transportadas a la siguiente estación en el mismo instante, para lograr esto todas las estaciones esperan hasta que la estación más lenta termine todas sus operaciones, y sólo en aquel instante las piezas de trabajo se transportan a la siguiente estación. A diferencia de las líneas no sincronizadas, en este caso los buffer son innecesarios.

Si los tiempos de las tareas son determinísticos, las líneas sincronizadas sin ritmo pueden ser tratadas como líneas con ritmo de movimiento intermitente, ya que el tiempo de ciclo de la línea

está sometido por la estación más lenta. A diferencia de las líneas de ensamble con ritmo, una línea sin ritmo puede avanzar si las operaciones se desarrollan de una manera inesperada más rápidamente que el tiempo estándar y no necesita esperar que transcurra un intervalo de tiempo fijo. Es por eso que una línea sincronizada sin ritmo puede alcanzar un mayor rendimiento que las líneas con ritmo (Boysen, et al., 2008).

3.3.3 Según la Frecuencia de Instalación

Este criterio se basa en las modificaciones que han sido realizadas sobre la configuración de la línea. Existen dos clasificaciones según este criterio que son las siguientes:

- Líneas instaladas por primera vez, y
- líneas reconfiguradas

3.3.3.1 Instaladas por primera vez

Siempre que se planea la instalación de un sistema de ensamble por primera vez, y los implementos no han sido comprados todavía, las estaciones de trabajo se analizan como entidades abstractas, a las cuales pueden asignarse un cierto número de tareas. Normalmente lo único que ya está determinado es el producto con todos sus atributos y variantes. Por lo general antes de planear la configuración inicial de una línea de ensamble el proceso de producción no se ha establecido claramente aún. En el momento en el que se planea la instalación por primera vez de una línea de ensamble para un nuevo producto, los pronósticos de ventas pueden presentar considerables imprecisiones, por este motivo no es conveniente plantear una solución pensando en minimizar de los costos de producción para un tiempo de ciclo dado, en lugar de esto, es necesario plantear varios escenarios considerando los costos de inversión y los ingresos previstos de acuerdo a un volumen de ventas (Boysen y Fliedner, 2006)

3.3.3.2 Líneas Reconfiguradas

Una reconfiguración se hace necesaria cuando hay un cambio sustancial en la estructura del programa de producción, ocasionado por ejemplo, por un cambio permanente en la demanda de los productos. En una reconfiguración, las estaciones ya tienen recursos asignados y una ubicación física en la planta. Como las estaciones ya están instaladas, el objetivo de minimizar el número de estaciones tiene una mayor complicación, por lo tanto el problema consiste en encontrar una solución factible para reasignar las tareas, teniendo un número de estaciones y un tiempo de ciclo determinados. Como componente de la función objetivo se propone a menudo la distribución de la carga de trabajo entre las estaciones tan uniformemente como sea posible (Rekiek et al, 2002). Con la reconfiguración de una línea se puede mejorar la calidad del producto, que podría deteriorarse al pasar por las estaciones que tienen cargas de trabajo relativamente altas.

3.3.4 Según el Nivel de Automatización de la Línea

- Líneas de ensamble manuales, y
- líneas de ensamble automáticas.

3.3.4.1 Líneas de Ensamble Manuales

Las líneas de ensamble manuales son comunes en los procesos productivos donde las piezas de trabajo son frágiles o se necesita que éstas sean inspeccionadas o manipuladas con frecuencia, ya que los robots industriales pueden carecer de la precisión necesaria para ejecutar tales labores (Bi & Zhang, 2001). A pesar de los grandes avances tecnológicos en la automatización de procesos industriales, aún existen muchos sistemas de ensamble que dependen parcial o completamente de la mano de obra. En los países donde los salarios son bajos, la mano de obra también puede ser una alternativa rentable para sustituir las maquinarias automáticas que suelen ser costosas (Boysen, et al., 2008).

Los tiempos de las operaciones manuales presentan a menudo altas desviaciones estocásticas, debido a que el desempeño de los humanos depende en una gran medida de factores como el entorno de trabajo, la motivación o el cansancio mental y físico (Tempelmeier, 2003). La falta de motivación y el bajo nivel de satisfacción causados por la alta repetitividad de las operaciones son considerados como una desventaja importante de la producción manual (Shtub & Dar-El, 1989). Otro factor importante que influye en el trabajo manual es la experiencia individual de cada trabajador, es por ello que los efectos de aprendizaje tienen una especial importancia, ya que podrían dar lugar a variaciones sustanciales en los tiempos de tarea. La calidad de los productos es también de especial importancia cuando las operaciones se realizan manualmente. Bajo la labor manual, la calidad sufre deficiencias a menudo cuando los operarios están sobrecargados de trabajo y tienen que forzarse a aumentar el ritmo. Debido a la complejidad para hacer una cuantificación es muy difícil realizar un estudio detallado de todos los factores físicos y mentales mencionados con el fin de incluirlos en modelos matemáticos de ALB.

3.3.4.2 Líneas de Ensamble Automáticas

Las líneas totalmente automatizadas se implementan principalmente en ambientes de trabajo de alguna manera hostiles para los seres humanos, como por ejemplo en los talleres de pintura de la industria automotriz. También se pueden implementar líneas automatizadas cuando los robots industriales son capaces de realizar tareas de forma más económica y con una mayor precisión por ejemplo, tareas de envasado de botellas. La gran precisión de las máquinas especializadas justifica el supuesto de considerar tiempos de tareas determinísticos lo cual implica que cada tarea requiere su propia máquina o herramienta. Otras particularidades surgen simplemente por el hecho de que las tareas sean realizadas por máquinas; por ejemplo, las restricciones de espacio e incompatibilidad de tareas que no pueden ser desarrolladas en una misma estación (Boysen, et al., 2008).

3.3.5 Según el Tipo de Industria

- Industria automotriz, y
- otras industrias

3.3.5.1 Industria Automotriz

Las líneas de ensamble en la industria automotriz tienen especial atención en la literatura, pues es en este tipo de industria donde se encuentran sus primeros casos exitosos de implementación. El ensamble final de vehículos se realiza principalmente en líneas con ritmo, de modelos mixtos con una participación considerable de mano de obra, a pesar de este nivel relativamente alto de labor manual, se puede considerar tiempos de trabajo determinísticos (Meyr, 2004).

Las líneas de ensamble de automóviles tienen una serie de características muy particulares, la mayoría de las cuales están relacionadas con el hecho de que los subensambles son relativamente grandes. Como consecuencia de ello, una estación se puede subdividir en lugares de trabajo paralelos, donde los operadores trabajan simultáneamente sobre la misma pieza de trabajo (Akagi, et al., 1983). Este fenómeno es común en todas las industrias relacionadas con la producción de camiones, autobuses y vehículos pesados (Lee, et al., 2001).

En las líneas de ensamble de la industria automotriz es común que los subensambles de producto en proceso requieran una posición particular con el fin de realizar una tarea, por ejemplo, levantar el chasis, con el fin de trabajar por debajo de éste. Como consecuencia de ello, algunas tareas pueden ser incompatibles con determinadas estaciones (Kim, et al., 2000). Otra particularidad en la producción de automóviles es que algunas de las tareas se llevan a cabo a través de más de una estación, por ejemplo, un reproductor de CD puede ser instalado por un trabajador que permanece en el interior del coche, mientras que visita varias estaciones (Falkenauer, 2005).

Desde que se introdujeron las líneas de ensamble en la fabricación del Modelo T de Ford hasta la actualidad la mayor parte de las fábricas de automóviles desarrollan su producción en líneas de ensamble, y el principal problema siempre ha sido decidir sobre la asignación de las tareas a las estaciones de trabajo.

3.3.5.2 Otras Industrias

Existen otras industrias que no han sido estudiadas a fondo y que justifican un análisis con la misma profundidad que la producción de automóviles (Boysen, et al., 2008). Éstas son las siguientes:

- Industria electrónica,
- producción de bicicletas,

Industria Electrónica

La mayoría de los trabajos de investigación que tratan aplicaciones prácticas sobre este tema se derivan de la industria de electrodomésticos. Cuando el producto en proceso es lo suficientemente grande, como en la producción de productos de línea blanca (neveras, estufas, etc.), podrían instalarse estaciones de trabajo paralelas como en la industria automotriz.

Como los dispositivos electrónicos por lo general se componen de un número de subensambles electrónicos que necesitan ser armados, a menudo se utilizan las líneas de ensamble auxiliares que se surten de una línea principal (Hautsch, et al., 1972; Lapierre, et al., 2006). Una posible estrategia para tal configuración es balancear primero la línea principal y usar el tiempo de ciclo resultante como parámetro de entrada para el balance de las líneas auxiliares. Esta estrategia es discutible, sin embargo, ésta puede dar como resultado un óptimo global. En estos escenarios los operadores pueden trabajar en tareas tanto en la línea principal y las líneas auxiliares en sus puntos de conexión (Lapierre & Ruiz, 2004).

Producción de Bicicletas

Bautista & Pereira (2002) consideran la fabricación de bicicletas como un modelo de línea única con un ritmo y de trabajo principalmente manual. Además de las restricciones de asignación, los cambios de posición de las piezas en proceso necesitan ser considerados especialmente, dependiendo de una tarea en particular las bicicletas deben ser giradas alrededor del eje x o del eje y. Estas operaciones para el cambio de posición requieren de tiempo adicional, por otra parte esto significa fatiga física para el operario. Esto podría modelarse con tiempos de proceso que pueden incrementarse dependiendo de la secuencia de las tareas. En su caso de estudio, optaron por minimizar el número de cambios de posición en la función objetivo.

De acuerdo con la clasificación para las líneas de ensamble presentada en este capítulo, se puede decir que este trabajo de investigación está enfocado en las líneas de ensamble que se clasifican en los siguientes criterios:

- Según el número de modelos: modelos mixtos.
- Según el sistema de control: sin ritmo no sincronizadas (*unpaced asynchronous*)
- Según la frecuencia de instalación: tanto para la instalación por primera vez como para reconfiguraciones.
- Según el nivel de automatización: líneas manuales
- Tipo de industria: tanto en la industria automotriz como en otras.

4. PROBLEMA DE BALANCE DE LÍNEA DE ENSAMBLE (ALB)

El problema característico las líneas de ensamble es decidir cómo asignar las tareas en las estaciones de la línea. Este problema es clásico en la investigación de operaciones y es conocido como balance de líneas de ensamble (ALB) porque como su nombre lo indica consiste en encontrar un balance de las cargas de trabajo entre las estaciones. En primer lugar hay que determinar el conjunto de tareas individuales que tienen que ser realizadas en la línea para elaborar el producto y las relaciones de precedencia que existen entre ellas, después se debe resolver el problema planteando algún método para asignar las tareas a las diferentes estaciones de tal modo que se optimice uno o varios indicadores de desempeño (Capacho, 2007), tales indicadores pueden ser el número de estaciones, el tiempo de ciclo, la eficiencia, el tiempo ocioso, el costo de operación, etc.

En el ámbito científico el problema de ALB es investigado para desarrollar modelos de optimización que sirvan como soporte para la toma de decisiones en el proceso de diseño de sistemas de ensamble. Desde la primera formulación matemática de ALB realizada por (Salveson, 1955) los esfuerzos académicos se han enfocado en el problema de la configuración, es decir, la asignación de tareas a las estaciones. Para resolver este problema han sido desarrollados muchos modelos de optimización matemática y métodos heurísticos desde diferentes enfoques.

Desde la introducción de las líneas de ensamble por parte de Henry Ford el problema de ALB ha sido de mucha importancia para la industria, por tal razón éste ha sido estudiado por muchos autores en las últimas décadas lo cual hace que sea fácil encontrar una vasta literatura académica sobre este tema, en las publicaciones sobre ALB los autores buscan apoyar los procesos de configuración de las líneas de ensamble mediante modelos de optimización y heurísticos. Sin embargo, encuestas realizadas en los años 70 (Chase, 1974) y 80 (Schöniger & Spingler, 1989) revelaron que sólo un pequeño porcentaje de compañías estaban usando un algoritmo matemático para planear sus configuraciones de línea en aquel tiempo y probablemente esta tendencia se mantiene en la actualidad.

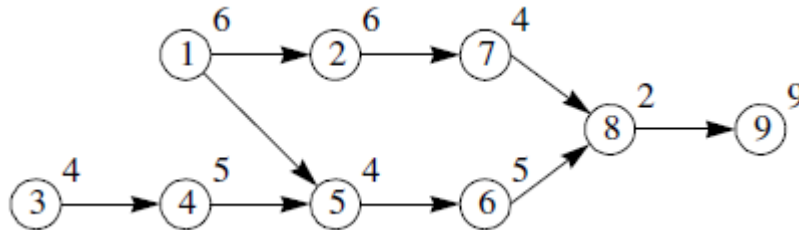
De acuerdo con las condiciones específicas de cada caso pueden existir diferentes tipos de restricciones para balancear la línea, las más comunes son las restricciones de precedencia entre las tareas.

Restricciones de Precedencia

Según el diseño y las características de cada producto, el proceso de elaboración tiene que respetar su orden de realización las tareas, por lo tanto éstas no pueden desarrollarse en secuencias arbitrarias, pues están sujetas a restricciones de precedencia. De acuerdo con Boysen, et al. (2007) las relaciones de precedencia de cualquier conjunto de tareas pueden ser resumidas visualmente por medio de un gráfico de precedencia. Los gráficos de precedencia

contienen un nodo por cada tarea, el valor del nodo es igual a tiempo de ejecución y los arcos representan las relaciones de precedencia directas e indirectas. La Figura 7 muestra un ejemplo de un gráfico de precedencia con $k = 9$ tareas y tiempos entre 2 y 9 unidades de tiempo.

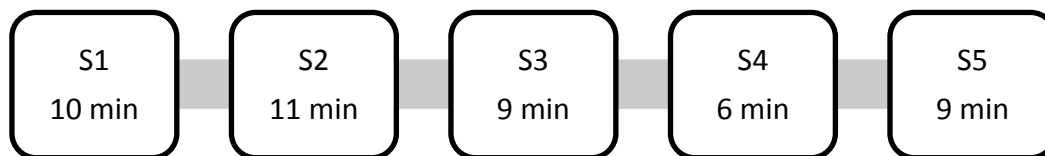
Figura 7. Ejemplo de diagrama de precedencia



Fuente: Boysen, et al. (2007)

Para solucionar el problema de la Figura 7 se debe asegurar que la asignación de tareas a las estaciones no viole las relaciones de precedencia. El conjunto de tareas S_i asignadas a la estación i constituyen la carga de trabajo asociada a dicha estación, la sumatoria de los tiempos de tarea $t(S_i) = \sum_{k \in S_i} t_k$ es llamada tiempo de estación, donde t_k es el tiempo de duración de la tarea k . En el ejemplo de la Figura 7, una solución factible para balancear la línea con un tiempo de ciclo $c = 11$ y $m = 5$ estaciones se presenta en la Figura 8, ésta consiste en la siguiente asignación de cargas a cada estación $S_1 = [1,3]$, $S_2 = [2,4]$, $S_3 = [5,6]$, $S_4 = [7,8]$ y $S_5 = [9]$ (Boysen, et al., 2007).

Figura 8. Ejemplo de línea de ensamble balanceada



Fuente: Autores

Un ejemplo por el cual ocurren las restricciones de precedencia, son las diferentes alternativas de procesamiento, de esto puede ocurrir cuando la transformación llevada a cabo por una tarea particular impide la realización de un procedimiento automatizado, mientras que una operación manual sigue siendo posible (Scholl & Becker, 2006).

Restricciones de Compatibilidad entre tareas

Según Bukchin & Tzur (2000), la asignación de tareas a las estaciones es influenciada por la selección de los equipos, por lo tanto tal selección determina los tiempos en las respectivas estaciones así como los costos de inversión. Las restricciones de asignación en estos casos necesitan considerar que algunas tareas sólo se pueden desarrollar en un determinado conjunto de máquinas calificadas, o en otros casos todas las tareas no pueden desarrollarse en la misma máquina. El intercambio de las herramientas automatizadas también requiere de un tiempo determinado que en ocasiones depende de la secuencia de producción y de las herramientas utilizadas (Wilhelm, 1999).

Restricciones de Espacio

Eventualmente, el lugar donde se ubican las máquinas puede ser limitado en tamaño, por lo que la capacidad disponible se convierte en un factor limitante para la asignación de tareas a una estación (Pinnoi & Wilhelm, 1997). Las limitaciones de espacio se observan cuando una máquina debe ser reubicada. El espacio en una estación puede ser limitado, de modo que dos tareas que requieran una máquina de gran tamaño no puedan ser asignadas a la misma estación (Scholl & Becker, 2006).

CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE BALANCE DE LÍNEA

De acuerdo con Baybars (1986), la investigación del balance línea se encuentra clasificada en dos grandes grupos de problemas, el primero de ellos son los problemas sencillos, debido al gran número de supuestos que se utilizan para simplificarlos, éstos han sido llamados Problemas Simples de Balance de Línea (*Simple Assembly Line Balancing Problem*, SALBP). Los problemas siguientes son conocidos como Problemas Generales de Balance de Línea (*Generalized Assembly Line Balancing Problem*, GALBP), éstos intentan suprimir los supuestos que limitan a los SALBP para extender el problema incorporando aspectos prácticos relevantes como líneas en U, estaciones paralelas, o procesos alternativos. A pesar de estos esfuerzos, aún existe una amplia brecha entre la teoría académica y la práctica (Becker & Scholl, 2006).

Según Boysen, et al. (2007) en los SALBP se asume que el tiempo de ciclo en todas las estaciones es igual a un valor c , es decir, se trata de líneas con ritmo, ya que todas las estaciones empiezan sus operaciones en el mismo instante y liberan las piezas a una misma tasa de producción. Este campo de investigación ha sido llamado SALBP de acuerdo con la revisión ampliamente aceptada de Baybars (1986), debido a los numerosos supuestos que se usan para simplificar este tipo de problemas. Las investigaciones posteriores han intentado ampliar el alcance del problema integrando aspectos relevantes como líneas en U, estaciones paralelas o procesos alternativos (Becker & Scholl, 2006), estas nuevas investigaciones se conocen GALBP, sin embargo aún existe una amplia brecha entre los estudios teóricos y su aplicación práctica.

Entre todos los problemas de ALB el más conocido y más estudiado es el SALBP. Aunque éste es muy limitado para reflejar la complejidad del balance de línea en el mundo real, sin embargo,

recoge los aspectos principales y es legítimamente considerado como el problema fundamental de ALB (Boysen, et al., 2007). De hecho, la gran variedad de problemas más complejos son extensiones directas de los SALBP o por lo menos tienen alguna relación.

A continuación se presenta un análisis detallado de la clasificación SALBP y GALBP.

4.1 PROBLEMAS SALBP (*SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM*)

El problema fundamental de ALB denominado SALBP, consiste en lo siguiente: dados un conjunto de tareas que requieren de diferentes tiempos de proceso, un conjunto de restricciones de precedencia entre las tareas, y un conjunto de estaciones de trabajo, se debe asignar cada tarea a una estación de trabajo de tal manera que no se violen la restricción de precedencia y la asignación sea óptima (o en su defecto factible). El criterio de optimización puede ser el número de estaciones, el tiempo de ciclo, la eficiencia, los costos, etc.

4.1.1 Supuestos de los SALBP

Según Boysen, et al. (2007) y de acuerdo con Baybars (1986), Scholl (1999) y Becker & Scholl (2006) el estudio de todos los problemas SALBP se basa en el siguiente conjunto de supuestos:

- S-1: Producción masiva de bienes homogéneos.
- S-2: Todas las tareas se desarrollan de una forma predeterminada (no existen formas alternativas para el proceso).
- S-3: La línea de ensamble es de tipo *paced* y tiene un tiempo de ciclo fijo de acuerdo con la producción deseada.
- S-4: La línea es en serie, sin líneas alimentadoras ni paralelas.
- S-5: El orden de ejecución de las tareas está sujeto a las restricciones de precedencia.
- S-6: El tiempo de ejecución de todas las tareas se considera determinístico.
- S-7: No existen otras restricciones de asignación de tareas diferentes a las de precedencia.
- S-8: Una tarea no puede dividirse para ser desarrollada en dos o más estaciones.
- S-9: Todas las estaciones están equipadas con la misma capacidad de maquinarias y operarios.

Una de las restricciones más fuertes de los SALBP para su aplicación en problemas de ALB en el mundo real está causada por los supuestos S-2 y S-9. En la vida real, una misma tarea podría ser realizada de diferentes modos y/o con diferentes recursos. Bajo los supuestos S-2 y S-9 que limitan a las tareas a ser realizadas de una única forma y a cada estación a estar igualmente equipada, no sería necesario hacer un análisis para la asignación de los recursos a las estaciones (maquinaria, hombres, materiales y/o herramientas). Como consecuencia, el problema SALBP se reduce únicamente a la asignación de tareas. Tan pronto como los supuestos S-2 y S-9 sean omitidos, la solución para este problema debe también decidir sobre la asignación de los recursos necesarios a las estaciones, junto con las respectivas tareas.

4.1.2 Clasificación de los SALBP

De acuerdo con Scholl (1999), respecto de la función objetivo los problemas SALBP se encuentran clasificados en las cuatro versiones:

- Problema SALBP-1
- Problema SALBP-2
- Problema SALBP-E
- Problema SALBP-F

En la Tabla 3 se presentan los criterios con los cuales se clasifican cada una de estas versiones.

Tabla 3. Versiones de los SALBP

	Tiempo de ciclo	
	Dado	Minimizar
Núm. de estaciones		
Dado	SALBP-F	SALB-2
Determinar	SALBP-1	SALB-E

Fuente: Becker & Scholl (2006)

4.1.2.1 Problema SALBP-1

Consiste en asignar las tareas a las estaciones para cumplir con un tiempo de ciclo determinado, intentando minimizar el número de estaciones. Al minimizar el número de estaciones se está asegurando al mismo tiempo que se minimice la sumatoria del tiempo ocioso de cada una de ellas.

4.1.2.2 Problemas SALBP-2

Consiste en asignar las tareas a un número de estaciones determinado, intentando minimizar el tiempo de ciclo, al igual que en el SALBP-1 se garantizan tiempos ociosos mínimos.

4.1.2.3 Problemas SALBP-E

En este tipo de problemas tanto el tiempo de ciclo c como el número de estaciones I son variables de decisión, entonces el objetivo en este caso es maximizar la eficiencia E de la línea.

El indicador de eficiencia se define como la fracción productiva del tiempo total de operación de la línea, es decir, la sumatoria del tiempo de operación en cada estación t_{sum} dividida entre el número de estaciones I por el tiempo de ciclo de la línea c .

$$E = t_{sum} / (I * c) \quad (5.1)$$

4.1.2.4 Problemas SALBP-F

En este tipo de problema no se busca encontrar el valor óptimo de algún indicador, sólo se limita a encontrar un balanceo factible para un número de estaciones y un tiempo de ciclo determinados (Becker & Scholl, 2006).

4.1.3 Formulaciones Matemáticas para los SALBP

Existen varias formulaciones matemáticas para los SALBP, en particular para el SALBP-1, las cuales han sido utilizadas como una referencia para desarrollar otros modelos.

Capacho (2007) presenta el siguiente modelo básico de programación matemática para los SALBP-1 y los SALBP-2.

Índices

k tareas

i estaciones

Conjuntos

IP_k conjunto de predecesoras de la tarea k

SK conjunto de tareas $\{1, \dots, K\}$

SI conjunto de estaciones $\{1, \dots, I\}$

Parámetros

K número de tareas ($k = 1, \dots, K$)

I número de estaciones ($i = 1, \dots, I$)

t_k tiempo de proceso de la tarea k

c tiempo de ciclo (parámetro para los SALBP-1 y variable de decisión para los SALBP-2)

Variables de Decisión

y_i 1, si al menos una tarea es asignada a la estación i ; 0, de lo contrario

x_{ki} 1, si la tarea k es asignada a la estación i ; 0, de lo contrario

4.1.3.1 Modelo Matemático para los SALBP-1

Este modelo de optimización matemática asigna las tareas a las estaciones de trabajo minimizando el número de estaciones, dado un tiempo de ciclo c . La función objetivo (5.2) es la encargada de minimizar el número de estaciones de trabajo. El conjunto de restricciones (5.3) garantiza que cada tarea k sea asignada a una sola estación de trabajo. El conjunto de restricciones (5.4) asegura que la suma de los tiempos de procesamiento de las tareas asignadas a la estación de trabajo i no supere el tiempo de ciclo c . El conjunto de restricciones (5.5) impone las relaciones de precedencia. Y por último el conjunto de relaciones (5.6) hacen que el modelo matemático utilice las estaciones de trabajo en orden lexicográfico (es decir, que las estaciones sean utilizadas ordenadamente desde la primera hasta la última estación de trabajo disponible).

$$\text{MIN } z = \sum_{i=1}^I y_i \quad (5.2)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ki} = 1 \quad \forall k \quad (5.3)$$

$$\sum_{k=1}^K t_k * x_{ki} \leq c * y_i \quad \forall i \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^I i * x_{hi} \leq \sum_{i=1}^I i * x_{ki} \quad \forall k \in SK; \forall h \in IP_k \quad (5.5)$$

$$y_i \geq y_{j+1} \quad \forall i = 1, \dots, I - 1 \quad (5.6)$$

4.1.3.2 Modelo Matemático para los SALBP-2

En el modelo para los SALBP-2 la función objetivo es la (5.7) donde el tiempo de ciclo es la variable a optimizar. La formulación de este modelo es similar a la formulación de los SALBP-1. Sin embargo, como el número de estaciones es un parámetro dado, la restricción (5.4) se sustituye por la (5.8) ya que todas las variables que definen la utilización de las estaciones de trabajo y_i son iguales a 1.

$$\text{MIN } z = c \quad (5.7)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ki} = 1 \quad \forall k \quad (5.3)$$

$$\sum_{k=1}^K t_k * x_{ki} \leq c \quad \forall i \quad (5.8)$$

$$\sum_{i=1}^I i * x_{hi} \leq \sum_{i=1}^I i * x_{ki} \quad \forall k \in SK; \forall h \in IP_k \quad (5.5)$$

4.2 PROBLEMAS GALBP (GENERALIZED ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM)

Los GALBP son problemas en los cuales es necesario modificar o eliminar uno o varios de los supuestos básicos de los SALBP (Becker & Scholl, 2006). En este tipo de problemas se

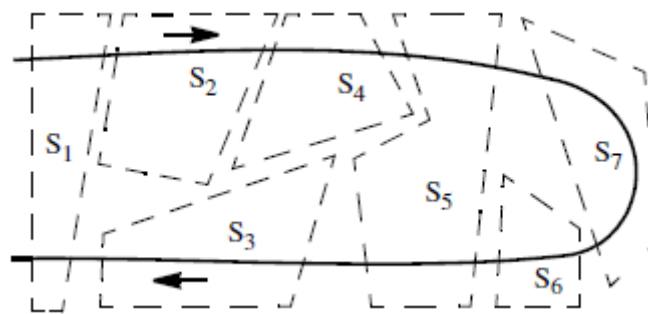
involucran modelos mixtos, estaciones en paralelo, procesamiento alternativo, y tiempos de proceso variables, entre otros. Los GALBP están clasificados en los siguientes grupos:

- Problema de Balance de Líneas de Ensamble en U (UALBP)
- Problema de Balance de Líneas de Ensamble de Modelos Mixtos (MALBP)
- Problema de Balance de Líneas de Ensamble Robóticas (RALBP)
- Problema de Balance de Líneas de Ensamble Multi-Objetivo (MOALBP)

4.2.1 Problemas UALBP (*Assembly U-Line Balancing Problem*)

Los UALBP fueron introducidos y modelados inicialmente por Miltenburg & Wijngaard (1994), en este tipo de problemas se estudian las líneas de ensamble que tienen forma de U como se muestra en la Figura 9. En este tipo de líneas las estaciones están ubicadas de tal manera que los operadores pueden tener a su alcance dos piezas de trabajo a la vez en diferentes posiciones de la línea, esta configuración se considera más flexible que las líneas tradicionales en serie, ya que hay un mayor número de posibilidades para asignar las tareas, la razón de esto es que las tareas pueden asignarse a ciertas estaciones aun cuando sus sucesoras ya han sido asignadas a estaciones anteriores, mientras que con las líneas en serie una tarea debe ser asignada obligatoriamente antes que sus sucesoras.

Figura 9. Línea de ensamble en U



Fuente: Becker & Scholl (2006).

En el ejemplo de la Figura 9, en la estación S1 se ejecutan las primeras tareas sobre una pieza de trabajo que está comenzando su proceso productivo en ese ciclo y las últimas tareas de otra pieza de trabajo que se está terminando en el mismo ciclo. Las estaciones que se ocupan de la misma pieza de trabajo en dos ciclos diferentes se denominan estaciones crossover (estaciones S1 y S5 en la Figura 9) (Becker & Scholl, 2006).

La clasificación para los UALBP, es análoga a la clasificación de los SALBP, y se tienen las siguientes versiones del problema:

- Problema UALBP-1: dado el tiempo de ciclo, minimizar el número de estaciones.
- Problema UALBP-2: dado el número de estaciones, minimizar el tiempo de ciclo.

- Problema UALBP-E maximizar la eficiencia de la línea, encontrando el tiempo de ciclo y el número de estaciones óptimos.

4.2.2 Problemas MALBP (*Mixed Assembly Line Balancing Problem*)

Este problema surge cuando se tiene una variedad de productos y los diferentes modelos del producto se entremezclan para ser ensamblados en la misma línea. Por lo tanto, después de definir la asignación de las tareas a las estaciones de trabajo, se deben determinar la secuencia de producción para el *mix* de modelos (Becker & Scholl, 2006) ya que dentro de este contexto estos dos problemas son interdependientes. Primero se resuelve el problema del balance, el objetivo es distribuir de manera uniforme a través de las estaciones la carga de trabajo del *mix* de modelos que se fabrican. El procedimiento es similar al procedimiento de los SALBP, pero en este caso se asume un *mix* de modelos estable y definido para el cual la carga de trabajo combinada se balancea para el turno de trabajo completo (Macaskill, 1972; Thomopoulos, 1970). Después se debe encontrar una secuencia de producción para responder a las órdenes de producción que se van a procesar en cada turno específico.

Las siguientes versiones de estos problemas también son análogas a los SALBP:

- Problema MALBP-1: dado el tiempo de ciclo, minimizar el número de estaciones.
- Problema MALBP-2: dado el número de estaciones, minimizar el tiempo de ciclo.
- Problema MALBP-E maximizar la eficiencia de la línea, encontrando el tiempo de ciclo y el número de estaciones óptimos.

El problema MALBP es más difícil que los casos de un solo modelo, porque debe hacerse un balance horizontal (Merengo, et al., 1999) con el fin de evitar las ineficiencias operativas como sobrecargas de trabajo o tiempos ociosos. Cuanto mejor funcione el balance horizontal, es posible encontrar mejores soluciones para el problema de secuenciación en el corto plazo.

4.2.3 Problemas RALBP (*Robotic Assembly Line Balancing Problem*)

En este tipo de problemas, se consideran las líneas de ensamble robotizadas, se desea optimizar la ejecución de las tareas en la línea, considerando tanto la asignación de las tareas a cada una de las estaciones como la destinación de cada uno de los robots a las diferentes estaciones (Capacho, 2007).

4.2.4 Problemas MOALBP: (*Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem*)

Este tipo de problemas consideran varios objetivos de optimización simultáneamente, por ejemplo, minimizar el número de estaciones, el costo del ensamble, y además maximizar la eficiencia. De acuerdo con Rekiek, et al. (2002) la mayoría de los GALBP pueden ser catalogados como problemas multiobjetivo.

4.3 PROCEDIMIENTOS DE SOLUCIÓN PARA PROBLEMAS DE ALB

En la literatura han sido desarrollados muchos procedimientos para solucionar los problemas de ALB, entre ellos se distinguen los métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos. Los métodos exactos aunque buscan la solución óptima, generalmente tienen una limitación debido al tamaño de los problemas, ya que en casos con un número considerable de estaciones y/o tareas los tiempos computacionales de cálculo para encontrar la solución óptima tienden a ser extremadamente grandes, por lo tanto, los métodos exactos sólo se pueden aplicar a casos relativamente pequeños. Debido a su naturaleza NP-hard, son pocos los métodos exactos que son aplicables a los casos reales, en particular para los SALBP-1. Los métodos aproximados, es decir, los heurísticos y metaheurísticos se han desarrollado con el fin de superar esta limitación, y su objetivo es proporcionar soluciones factibles que sean lo más cercanas posible a la solución óptima (Capacho, 2007).

4.3.1 MÉTODOS EXACTOS

Programación Lineal Entera Mixta

Generalmente los modelos de Programación Lineal Entera Mixta (*Mixed Integer Linear Programming, MILP*) han sido usados para describir formalmente los problemas de balance de línea. En las situaciones que pueden representarse con modelos lineales, sólo tienen sentido aquellas soluciones en las que todas o algunas de las variables de decisión sean números enteros, si todas las variables de decisión deben ser enteras se tiene un Modelo de Programación Lineal Entera (*Integer Linear Programming, ILP*), y si sólo algunas variables deben ser enteras, siendo las demás reales o binarias se trata de un Modelo MILP. La opción de utilizar variables enteras o binarias amplía notablemente las posibilidades de modelación matemática, sin embargo esto genera una mayor complejidad en la resolución del modelo debido a que la solución óptima no necesariamente se encuentra en los vértices de la región factible para las variables enteras del modelo, ya que en cualquier caso los vértices de la región factible no suelen ser números enteros. En consecuencia la solución óptima se encontrará dentro de la región factible, por lo que el método simplex empleado de forma directa muy probablemente no proporcionará la solución óptima.

A diferencia de un modelo MILP, el número de soluciones de un modelo ILP es normalmente finito, por lo que podría plantearse la posibilidad de encontrar la solución mediante la exploración de todas las soluciones posibles. Sin embargo el número de soluciones a explorar para un problema mediano puede ser muy elevado, en principio, para un problema con n variables enteras se debe explorar 2^n soluciones (excluyendo algunas que se descartan con las restricciones). Por ejemplo para $n = 30$ se tendrían $2^{30} = 1.073'741.924$ soluciones posibles. Por esto se han desarrollado metodologías que permiten explorar de manera más eficiente que la exploración de todas las soluciones posibles. Gran número de estas metodologías emplean la lógica de ramificación y corte (*Branch and Cut, B&C*) y son utilizadas por la mayoría de software que resuelven modelos lineales, siendo que ya muy poco se usa la ramificación y acotamiento (*Branch and bound, B&B*).

4.3.1.1 Ramificación y Acotamiento – Branch and bound (B&B)

El método B&B es una técnica de enumeración desarrollada por Little, et al. (1963), que encuentra la solución óptima mediante la exploración de subconjuntos de soluciones factibles. Luego forma subregiones mediante la ramificación del rango de soluciones y utiliza un proceso de acotamiento para determinar los límites inferior y superior de la solución óptima dentro de cada subregión utilizando diferentes estrategias de búsqueda.

Entre los métodos de B&B más efectivos desarrollados para resolver los SALBP se encuentran el FABLE propuesto por Johnson (1988), el EUREKA por Hoffmann (1992), y SALOME de Scholl & Klein (1997).

4.3.1.2 Programación Dinámica (DP)

Los procedimientos de DP básicamente transforman el problema en un proceso de decisión multietapa reduciéndolo en subproblemas más pequeños, que a su vez se solucionan de forma recursiva, y después, las soluciones óptimas de los subproblemas se utilizan para construir la solución óptima del problema original. El primer procedimiento de programación dinámica fue desarrollado por Jackson (1956) y modificado por Held, et al. (1963). El principal inconveniente de estos procedimientos son sus grandes requerimientos de memoria computacional, sin embargo esta limitación fue mejorada con los procedimientos propuestos por Schrage & Baker (1978), Lawler (1979) y Kao & Queyranne (1982). Aunque esta última propuesta ha dado como resultado una mayor eficiencia computacional, el tiempo y los requisitos de almacenamiento sigue siendo el mayor inconveniente de este tipo de procedimientos. Sin embargo las comparaciones computacionales realizadas por Scholl & Klein (1999) han revelado que el procedimiento de B&B supera a la DP.

4.3.2 PROCEDIMIENTOS APROXIMADOS

Existen una gran variedad de métodos aproximados propuestos en la literatura para resolver problemas de ALB por ejemplo, los propuestos por Talbot, et al. (1986), Amen (2000), Amen (2001), Scholl & Voss (1996). La Mayoría de estos son métodos constructivos, procedimientos de enumeración y técnicas de mejoramiento. Entre estos se distinguen dos grupos principales:

- Métodos heurísticos, y
- métodos metaheurísticos.

4.3.2.1 Métodos Heurísticos

Una metodología común es el enfoque *greedy* (constructivo), donde en cada etapa de este procedimiento se elige un elemento de la solución de acuerdo con un criterio determinado, hasta que se obtiene una solución completa. Otro método más simple genera soluciones aleatoriamente, luego evalúa cada una de ellas y mantiene la mejor de todas las soluciones obtenidas (Silver, 2002). Básicamente, los métodos constructivos se basan en reglas de prioridad, la mayoría de los cuales consideran el número de predecesores y sucesores, y los

tiempos de procesamiento de las tareas. Una de las primeras propuestas heurísticas es la de Helgeson & Birnie (1961) conocida como *Ranked Positional Weight* (RPW), en que las tareas se clasifican en orden descendente de acuerdo con el peso posicional (es decir, la suma del tiempo de trabajo y los tiempos de procesamiento de todas sus sucesoras). Otras reglas de prioridad conocidas incluyen el tiempo de tarea máximo, el número máximo de sucesoras totales, la mínima primera y última estación de trabajo y holgura mínima (Capacho, 2007).

4.3.2.2 Métodos Metaheurísticos

El caer en un óptimo local es una desventaja principal de los métodos heurísticos clásicos. Por lo tanto, en los últimos años un grupo de métodos, conocido como metaheurísticas, se han desarrollado para superar tal limitación. El concepto de la metaheurística fue introducido por Glover (1996). Este tipo de procedimientos se basan en métodos constructivos para encontrar una solución inicial (o una población de soluciones iniciales) y algoritmos de búsqueda local para encontrar una solución vecina mejorada. Sin embargo estos permiten explorar soluciones de menor calidad con el fin de evitar la convergencia prematura a una solución óptima local.

5. BALANCE DE LÍNEA DE ENSAMBLE DE MODELOS MIXTOS EN AMBIENTES MTO

La implementación de líneas de ensamble de modelos mixtos en ambientes MTO es una estrategia utilizada en las últimas décadas para afrontar la creciente variedad de productos que se demanda por parte de los clientes. Bajo estos enfoques de producción basados en sistemas de ensamble modernos, las tradicionales líneas de ensamble de grandes longitudes son remplazadas por sistemas modulares semiautónomos compuestos por líneas de ensamble pequeñas (Bukchin, et al., 1997; Burbidge, 1989). Según Bukchin, et al. (2002) estas líneas constan máximo de entre cinco y diez estaciones de trabajo, lo cual simplifica el sistema en cuanto a los siguientes aspectos:

- Hay pocas operaciones,
- bajos niveles de producto en proceso, y
- no suele haber sistema de banda transportadora

En estas líneas de ensamble se requiere que los operarios sean más versátiles y tengan más habilidades que los operarios que en las líneas tradicionales. Por lo tanto, se debe asegurar que cada uno de ellos esté capacitado para desarrollar cualquier operación en la línea, este requerimiento es necesario debido al tamaño reducido de estas líneas y a la relativa baja carga de trabajo que recae sobre éstas. Además de esto, como ya se ha mencionado, en los ambientes MTO la secuencia de la llegada de los diferentes modelos a la línea depende directamente de los pedidos de los clientes (Bukchin, et al., 2002). Por esto se recomienda el uso de máquinas multipropósito con herramientas intercambiables que permitan variar las secuencias de producción y obtener tiempos de alistamiento despreciables a bajos costos, esto hace que las líneas de ensamble sean eficientes para bajos volúmenes de producción (Mather, 1989) y permite adoptar estrategias modernas como la personalización masiva (Pine, 1993).

Uno de los principales problemas que se presentan en los ambientes MTO es definir las prioridades para el despacho de los pedidos, es decir, el orden en el cual los trabajos deben ser programados a través de cada estación de trabajo. Para resolver esta situación se han diseñado muchos métodos, la experiencia ha demostrado que la priorización de los despachos es un mecanismo relativamente débil para el control de las colas en los puestos de trabajo, si se usa este método solo, tendrá poco efecto en la reducción de las colas largas y su alta variabilidad. Una mejor opción es la liberación controlada de trabajos, esto implica mantener en inventario los trabajos pendientes antes de iniciar el proceso, y sólo se liberan si con ello no se generan colas que violen algunas normas preestablecidas. Esto a su vez reduce el inventario de producto en proceso (WIP). Sin embargo, la planificación debe ampliarse a una visión sistémica para asegurar que la línea sólo realice trabajos que sean rentables de producir y entregar la satisfacción al cliente. Para planear la liberación de trabajos acumulados y las políticas de aceptación de pedidos, se necesita saber cómo se comportan las diferentes redes de colas en todos los procesos. Este problema se puede intentar de resolver mediante la

aplicación de modelos analíticos o con el uso de la simulación. Algunos de los modelos de análisis que existen se basan en el trabajo de Jackson (1956), quien sostuvo que un sistema de redes conjuntas puede ser analizado exactamente como las colas individuales cuando las llegadas se producen con una distribución Poisson y los tiempos de servicio están distribuidos exponencialmente.

5.1 FACTORES QUE AFECTAN EL PROBLEMA DE ALB EN AMBIENTES MTO

En los ambientes MTO deben producirse modelos diferentes de un producto en lotes relativamente pequeños y entregarlos al cliente en un corto lead time. Por lo tanto la flexibilidad es una ventaja competitiva esencial que deben tener estas líneas de ensamble para responder a las exigencias de estos ambientes. El ALB en ambientes MTO se basa en los principios básicos de los MALBP, el problema consiste en asignar las tareas de los diferentes modelos a las estaciones con el objetivo de optimizar algún parámetro determinado (Bukchin, et al., 2002).

De acuerdo con Bukchin, et al. (2002) las características de las líneas de ensamble en ambientes MTO se pueden resumir en las siguientes consideraciones:

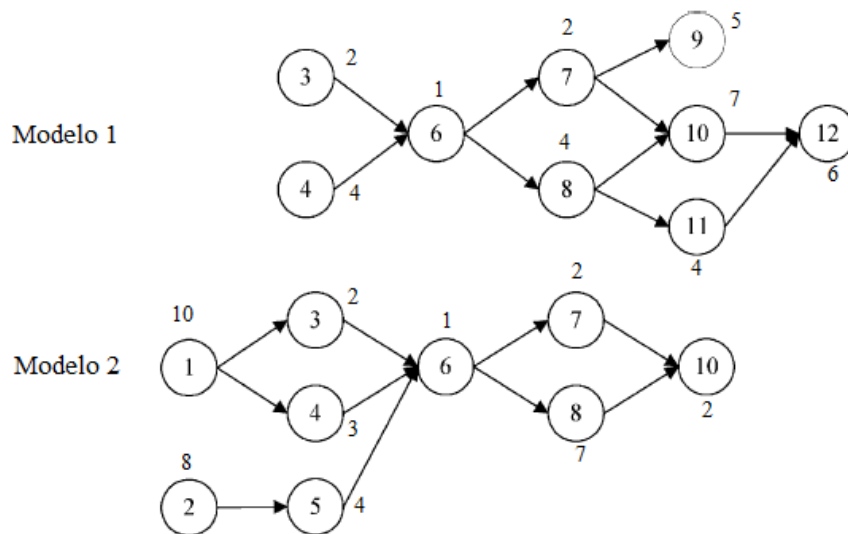
- C-1: se producen familias de productos, en donde los modelos son muy similares entre sí, por lo tanto se puede asumir que no hay contradicciones entre las relaciones de precedencia de las tareas en los diferentes modelos, por lo que todas estas relaciones pueden describirse en un único diagrama.
- C-2: la duración de las tareas se puede considerar con tiempos determinísticos y éstos pueden variar dependiendo del tipo de modelo que esté siendo ensamblado. (por ejemplo en la industria automotriz, la instalación de un parabrisas eléctrico requiere una carga de trabajo diferente que la instalación de uno manual).
- C-3: Los productos se desplazan a través de líneas sin ritmo no sincronizadas, lo cual significa que los tiempos de estación no están limitados a un tiempo de ciclo general de línea, por lo que pueden ocurrir bloqueos en las estaciones
- C-4: La línea de ensamble es capaz de operar sin interrupciones por causas externas, es decir que siempre hay materias primas disponibles para ingresar a la primera estación y siempre hay espacio disponible para sacar el producto terminado.
- C-5: La secuencia de llegada de las órdenes de trabajo a la línea está determinada por los pedidos de los clientes, aunque en algunos casos puede haber cierta flexibilidad.
- C-6: una misma tarea que sea común en varios modelos podría desarrollarse en diferentes estaciones dependiendo del modelo.

La consideración C-6 ha sido ampliamente discutida en la literatura, de acuerdo con Scholl (1995) en las líneas de ensamble de modelos mixtos una tarea que es común para varios modelos debe desarrollarse en una única estación, sin embargo, Bukchin, et al. (2002) aseguran que el sistema debe ser más flexible en este sentido, y se debe permitir que algunas tareas comunes se puedan asignar a varias estaciones dependiendo del tipo de modelo, sin embargo, asignar las tareas comunes de varios modelos en una única estación tiene las siguientes ventajas:

- Especialización: La división del trabajo entre los operarios, donde cada uno realiza una pequeña parte del trabajo, esto implica que el contenido de trabajo en cada estación siempre es el mismo (en la medida de lo posible).
- Aprendizaje: cada operario desarrolla número pequeño de tareas para mejorar su rendimiento y así el efecto de aprendizaje se logra más rápidamente.
- Costo de los equipos: la asignación de tareas comunes a una misma estación elimina la necesidad de duplicar los equipos.

A pesar de lo anterior, existe una gran desventaja al asignar las tareas comunes a la misma estación, la cual es que se genera una fuerte interdependencia entre los modelos lo que resulta en soluciones de menor calidad para el problema de ALB. Por ejemplo, considerando los diagramas de precedencia de los dos modelos presentados en la Figura 10, las tareas comunes a los dos modelos son 3, 4, 6, 7, 8, 10. Si cada una de éstas se asigna a la misma estación para todos los modelos, la asignación de la tarea 6 podría presentar algunos problemas debido a que la carga de trabajo de todas sus predecesoras es mayor en el modelo 2, mientras que en el modelo 1 la carga de trabajo es mayor para sus sucesoras. Asumiendo que la tarea 6 está asignada a la misma estación para ambos modelos, la solución del balanceo podría generar altísimos tiempos ociosos. En el modelo 1 el tiempo ocioso es generado en las estaciones que preceden a la estación en la cual se asigne la tarea 6, y en el modelo 2 se generaría en las sucesoras de esta estación. Sin embargo, si el proceso de ensamble de los dos modelos se balancea por separado, probablemente la tarea 6 se trate de asignar en una estación al inicio de la línea para el primer modelo, y en una estación del final para el segundo modelo. Aunque hay que señalar que la asignación de la tarea 6 (o cualquier otra tarea) a dos estaciones diferentes podría depender de otros factores adicionales diferentes a la relaciones de precedencia (Bukchin, et al., 2002).

Figura 10. Ejemplo de diagrama de precedencia de dos modelos



Fuente: adaptado de Bukchin, et al. (2002)

Queda demostrado que en estos casos la asignación de las tareas comunes a una misma estación no siempre es lo más conveniente (sólo debe hacerse en algunos casos especiales). La asignación de tareas comunes a diferentes estaciones puede requerir diferentes operarios para desarrollar la misma tarea, y como consecuencia cada operario tendrá un número más grande de tareas bajo a cargo. En una línea de ensamble tradicional el aprendizaje es más mecánico mientras que en las líneas de ambientes MTO éste se basa en la comprensión y el entendimiento del proceso de ensamble por parte de cada miembro del equipo.

En los ambientes MTO la llegada de pedidos es un proceso estocástico en el tiempo donde cada uno de éstos requiere ser procesado de acuerdo con sus especificaciones, cada pedido entra al sistema de producción y viaja por los centros de trabajo según lo indique su hoja de ruta. Una vez que se haya liberado cada trabajo, por lo general éste debe estar en cola junto con otros trabajos que esperan su turno para iniciar su proceso de producción. Después que el proceso de un pedido en una estación de trabajo se haya completado, es transportado a la siguiente estación, donde se une de nuevo a una cola de trabajos pendientes por procesar. El lead time de manufactura de cada pedido es por lo tanto la sumatoria de los tiempos de alistamiento y los tiempos de procesamiento en cada centro de trabajo, además de todos los tiempos de espera en las colas. Es bien sabido que en los ambientes MTO una orden puede gastar hasta un 90% del tiempo total de su producción en esperas entre estaciones de trabajo. Se ha reportado que los lead times de manufactura son a menudo largos y poco confiables casi en su totalidad debido a la gran cantidad de tiempo en las colas, (Stommel, 1976; Stalk & Hout, 1992).

5.2 EL PROBLEMA DE LA SECUENCIACIÓN

Al resolver el MALBP con técnicas tradicionales usualmente se obtiene un flujo desigual de los productos a lo largo de la línea y una carga de trabajo desbalanceada en las estaciones para las órdenes individuales que se liberan. Por lo tanto una segunda etapa en este proceso es necesaria para determinar la secuenciación del *mix* de modelos que se va a liberar en la línea, y así minimizar los inconvenientes causados por la obstrucción en las estaciones debido a las variaciones en el contenido del trabajo entre los diferentes modelos. Debido a que el tiempo de ejecución de cada tarea puede variar para cada modelo, el tiempo de ciclo en las estaciones de la línea dependerá en gran medida del modelo específico que esté siendo ensamblado en ese momento (Boysen, et al., 2008). Si varios modelos que generan una alta carga de trabajo pasan de manera consecutiva uno tras otro por una misma estación, el tiempo de ciclo de la línea podría ser excedido ocasionando una sobrecarga de trabajo, la cual debe ser compensada por alguna medida reactiva como detener la línea, usar operarios auxiliares, retirar productos en proceso, o forzar al operario para que aumente la velocidad de producción (Wild, 1972), en ningún caso estas medidas son deseadas ya que pueden producir efectos negativos en la calidad del producto. Tales sobrecargas pueden evitarse si se encuentra una secuencia donde los modelos que causan altas cargas de trabajo en una estación se alternan con otros que requieran menos tiempo. Esto conlleva a un problema de secuenciación de corto plazo (Yano & Bolat, 1989; Sumichrast & Russell, 1990; Sumichrast, et al., 1992; Tsai, 1995; Merengo, et al., 1999). En este contexto los problemas de ALB y de secuenciación son

interdependientes. Mientras el ALB decide sobre la asignación de tareas a las estaciones y determina la carga de trabajo por modelo en cada una de ellas, la secuencia de producción para un determinado *mix* de productos, se planea con base en tener sobrecargas de trabajo mínimas. De hecho la cantidad de sobrecarga por sí misma es una medida de la eficiencia alcanzada por el balanceo de la línea. Sin embargo un enfoque simultáneo para el problema de balanceo y secuenciación sólo es viable bajo condiciones muy especiales teniendo en cuenta que la planeación de ambos problemas usualmente tienen marcos de tiempo completamente diferentes. Las decisiones pertinentes al ALB son un problema con un horizonte de planeación a medio plazo que dura varios meses, por lo que los *mix* de modelos que serán ensamblados en cada turno de trabajo normalmente no se conocen en ese momento (Boysen, et al., 2008).

Según Merengo, et al. (1999) para simplificar la planeación del proceso de secuenciación, el ALB debe entre otras cosas, hacer que todos los modelos tengan el mismo tiempo de ciclo en cada estación, garantizando que las sobrecargas nunca ocurran, haciendo del problema de secuenciación algo trivial. Por lo tanto en esta investigación se intenta lograr este objetivo para balancear las líneas de modelos mixtos de tal modo que cualquier secuencia que se programe en la línea tenga un buen desempeño y así el *scheduling* no tendrá mucha relevancia.

5.3 INDICADORES DE DESEMPEÑO

Bukchin (1998) examina la calidad de los siguientes cinco indicadores de desempeño propuestos por varios autores para los MALBP:

- Variación en las estaciones (Thomopoulos, 1970)
- Tiempo ocioso (Macaskill, 1972)
- Coeficiente de variación de estación (Fremerey, 1991)
- Variabilidad de modelos (Bukchin, 1998)
- Cuello de botella (Bukchin, 1998)

Los experimentos realizados por Bukchin (1998) indican que el indicador del cuello de botella es significativamente superior a los demás cuando las líneas son relativamente cortas, según sus experimentos este indicador presenta una alta correlación con el *throughput* de la línea.

Cuellos de Botella

El indicador del cuello de botella es un indicador de rendimiento del tiempo de ciclo de la línea, el cual es inverso al *throughput*. Éste se calcula estimando el valor esperado del tiempo de operación en la estación donde está el cuello de botella, se obtiene mediante la suma de los productos de la probabilidad de que cada modelo ensamblado en cada estación sea el tiempo más grande de la línea (cuello de botella) por el tiempo de ensamble del modelo en la estación (Bukchin, 1998).

La probabilidad de que el modelo l ensamblado en la estación k tenga el tiempo de estación p_{kl} más grande de la línea es:

$$Pr(\text{modelo } l \text{ pase por la estación } k) Pr(p_{kl} \geq \max_{i, i \neq k}(t_i)) \quad (5.1)$$

Donde t_i es el tiempo de ensamble actual del modelo ensamblado en la estación i . Bajo el supuesto de interdependencia entre los tiempos de estación se tiene que:

$$Pr(p_{kl} \geq \max_{i, i \neq k}(t_i)) = \prod_{i, i \neq k} Pr(p_{kl} \geq t_i) \quad (5.2)$$

Y si α_j es la probabilidad de que el modelo j sea el siguiente en ingresar a la línea, se asuma que α_j también es la probabilidad de que el modelo j esté en la estación i . Por lo tanto:

$$Pr(p_{kl} \geq t_i) = \sum_{j=1}^J \alpha_j \beta_{ij} \quad (5.3)$$

donde,

$$\beta_{ij} = 1, \text{ si } p_{ij} < p_{kl}; 0, \text{ de lo contrario}$$

Finalmente el valor esperado del indicador de cuello de botella quedaría formulado con la siguiente expresión:

$$E(TBD) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Pr(p_{ij} \text{ sea el cuello de botella}) * p_{ij} \quad (5.4)$$

5.4 METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN PARA LOS MALBP EN AMBIENTES MTO

Según Scholl & Becker (2006) el estudio de los problemas MALBP generalmente se basa en algunos de los mismos supuestos que se consideran para los SALBP. Además de esto, también es necesario conocer el tiempo de ejecución t_{jk} de la tarea k para el modelo j y también, la participación m_j de cada modelo j en el *mix* de producción, donde $\sum_{j=1}^J m_j = 100\%$ (Scholl, 1999).

De acuerdo con Scholl & Becker (2006) existen dos enfoques para modelar y resolver los MALBP:

- Reducción a problema de único modelo, o
- Balanceo horizontal.

5.4.1 Reducción a Problema de Único Modelo

Para simplificar los problemas MALBP se puede hacer una transformación sencilla de los datos de los modelos mixtos a una versión de los SALBP, esto consiste en calcular los tiempos promedio $\bar{t}_k = \sum_{j=1}^J m_j * t_{jk}$ para las tareas $k = 1 \dots K$, (Macaskill, 1972; McMullen & Frazier, 1997; Scholl, 1999). Al calcular los tiempos promedio de las tareas y remplazarlos, el problema de los modelos mixtos queda transformado en un SALBP. Resolviendo el problema resultante

se garantiza que el tiempo de ciclo es suficiente para realizar todas las tareas en promedio. Sin embargo, aún encontrando la solución óptima para el modelo resultante, podrían ocurrir ineficiencias considerables cuando se opere la línea, esto sucede debido a las variaciones en los tiempos de cada estación $\tau_{ji} = \sum_{k \in S_i} t_{jk}$ de los modelos $j = 1, \dots, J$, donde S_i es el conjunto de tareas asignadas a la estación i . Estas ineficiencias están representadas en los siguientes indicadores:

- Sobrecargas de trabajo,
- tiempos ociosos.

Sobrecargas de Trabajo.

Cada vez que un operador de una estación que no es capaz de completar las tareas asignadas antes de que la pieza de trabajo salga de la estación (debido a una longitud restringida de la estación o debido a la velocidad de la banda transportadora), se produce una sobrecarga de trabajo, estas sobrecargas pueden compensarse aplicando alguna de las siguientes medidas:

- Detener la línea hasta que las operaciones inconclusas se completen. Sin embargo, como consecuencia una estación puede bloquear el proceso de producción de todas las demás estaciones y la tasa de producción se reduciría.
- Continuar con el proceso sin interrupciones, mientras las tareas incompletas y todas sus sucesoras quedan inconclusas. Después éstas se llevarán a cabo fuera de línea por operarios auxiliares mientras el proceso continúa con una pieza de trabajo que ha sido procesada anteriormente y ha esperado en un buffer.
- Las estaciones que tienden a exceder el tiempo de ciclo se les aumenta una capacidad adicional mediante el empleo de operadores adicionales que aumentan el ritmo de trabajo, pero también se aumentan los costos.

Aun escogiendo cualquiera de las anteriores medidas, las sobrecargas de trabajo son ineficientes y costosas para las compañías y por lo tanto deben ser minimizadas. Desafortunadamente, la magnitud de las sobrecargas de trabajo que realmente se producen no se puede calcular inmediatamente para las soluciones de balance, ya que tales sobrecargas dependen de los programas de producción los cuales son desconocidos en el corto plazo y de sus correspondientes secuencias de producción. Por lo tanto, es necesario obtener soluciones de balance en las cuales las potenciales sobrecargas de trabajo se minimicen.

Tiempo Ocioso

Al igual que en los problemas con líneas de un solo modelo, en los MALBP el tiempo ocioso se produce cuando una estación ha terminado su trabajo sobre una pieza y tiene que esperar hasta que llegue la siguiente. Este tiempo ocioso sólo es constante cuando se ensambla un solo modelo en la línea, cuando se producen varios modelos, los tiempos ociosos son diferentes en cada ciclo y dependen directamente de la secuencia de

producción. Al igual que las sobrecargas de trabajo, los tiempos ociosos también pueden ser conocidos de antemano, y se debe tratar de minimizarlos.

Al eliminar el supuesto de que una misma tarea tiene que ser asignada a una única estación para todos los modelos, el MALBP queda descompuesto en n independientes casos SALBP. Sin embargo, la asignación de una misma tarea a diferentes estaciones no suele ser deseada debido a los requerimientos de instalaciones adicionales, pérdida de especialización, control de la producción e ineficiencias de configuración. Sólo en los casos donde se producen por lotes múltiples modelos, la asignación de una misma tarea a varias estaciones puede ser útil.

Mediante la imposición de un tiempo de ciclo para cada modelo se obtiene un problema más restringido (Deutsch, 1971), es decir, los tiempos de cada modelo en todas las estaciones no deberían superar el tiempo de ciclo de la línea. Sin embargo, esto puede conducir a una baja eficiencia de la línea, ya que los efectos de compensación entre los modelos no podrían ser aprovechados. Debido a estas restricciones todos los modelos se demorarían el mismo tiempo en cada estación, por lo tanto el problema de la secuenciación sería sencillo de resolver.

5.4.2 Balance Horizontal

Para ayudar a minimizar los tiempos de ciclo, el ALB puede intentar minimizar la variación en los tiempos de estación para todos los modelos τ_{ij} , esto se conoce como balance horizontal (Boysen, et al., 2008). Con la intención de realizar el balance horizontal, en la literatura se proponen varios componentes para las funciones objetivo, dado el número I de estaciones y el tiempo de ciclo c .

Funciones objetivo para el balance horizontal

Thomopoulos (1970) propone la función objetivo (5.5), la cual minimiza la suma de las diferencias absolutas entre el tiempo promedio por estación $\bar{\tau}_j = (\sum_{k=1}^K t_{jk})/I$ del modelo j y sus tiempos τ_{ji} en la estación i .

$$\text{MIN } \psi_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |\tau_{ij} - \bar{\tau}_j| \quad (5.5)$$

Decker (1993) propone la función objetivo (5.6) que minimiza la desviación máxima del tiempo en una estación de cualquier modelo con respecto del tiempo promedio por modelo en las estaciones:

$$\text{MIN } \psi_2 = \max\{|\tau_{ij} - \bar{\tau}_j| \mid \forall i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J\} \quad (5.6)$$

Una tercera función objetivo es la (5.7), propuesta por Domschke, et al. (1996) en la cual se minimiza la suma del tiempo resultante de las violaciones al tiempo de ciclo de todos los modelos en todas las estaciones, es decir que considera sólo la sobrecarga de trabajo potencial:

$$\text{MIN } \psi_3 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \max\{0, \tau_{ij} - c\} \quad (5.7)$$

5.4.3 Otras Metodologías

Askin & Zhou (1997) presentan un modelo de programación no lineal entera para una extensión de los MALBP orientado a la selección de equipos y a los costos con estaciones paralelas, y para resolver el problema proponen un procedimiento basado en la regla de prioridad usando el tiempo promedio de duración de las tareas en los modelos.

Sparling & Miltenburg (1998) describen y analizan un problema de balance de una línea en U de modelos mixtos y establecen un procedimiento de solución basado en B&B. También se formula el problema de balance combinado con el de secuenciación y se resuelve con un algoritmo genético propuesto por Miltenburg (2002). Otro algoritmo genético adicional para problemas combinados de ALB y *scheduling* es propuesto por Kim, et al. (2006).

En otro método heurístico, Merengo, et al. (1999) intenta utilizar el balance horizontal como objetivo primario, mientras que la minimización del número de estaciones (MALBP-1) se toma como objetivo secundario a diferencia de la mayoría de los otros métodos mencionados anteriormente.

Bukchin & Rubinovitz (2002) proponen un enfoque de solución para los MALBP-1 en tres etapas usando diferentes funciones objetivo. La primera etapa consiste en resolver el SALBP-1 para el promedio de los tiempos de tarea de los modelos determinando el número de estaciones y la asignación de las tareas que son comunes a todos los modelos. En la segunda etapa se reasignan las tareas que son específicos para cada modelo preservando las asignaciones realizadas antes y optimizando la función objetivo utilizada para el balance horizontal. La tercera etapa es un procedimiento de búsqueda local para cambiar la asignación de las tareas comunes y la aplicación de la etapa 2 nuevamente para completar la solución mediante la asignación de tareas específicas como se describió anteriormente.

Pastor, et al. (2002) consideran los MALBP-2 con una función objetivo adicional que trata de aumentar la uniformidad de las tareas en las estaciones. El problema se resuelve utilizando las reglas de prioridad basadas en la heurística de búsqueda tabú.

Vilarinho & Simaria (2002) consideran y modelan los MALBP-1 con la asignación adicional de restricciones y estaciones paralelas. Como objetivo secundario se minimizan los indicadores de ineficiencias verticales y horizontales. Como procedimiento de solución proponen un enfoque simulado de dos etapas.

Karabati & Sayin (2003) consideran los MALBP-2 con una secuencia de producción dada que contiene varias unidades de cada modelo. En cada ciclo, el tiempo de la estación más lenta (teniendo en cuenta los modelos que se realizan en el programa de producción actual en todas las estaciones), define el tiempo de ciclo realizado. El objetivo es minimizar la suma de los tiempos de ciclo realizada por la secuencia de producción. El problema se modela con una programación lineal binaria y se resuelve mediante un procedimiento modificado basado en la regla de prioridad.

Kim, et al. (2000) consideran un problema combinado de balance de línea de modelos mixtos y de secuenciación que se basa en evitar la necesidad de usar operarios auxiliares y lo resuelven con diferentes algoritmos genéticos. (Bock, et al., 2006) también consideran un problema de balance de línea combinado con la secuenciación incorporando diferentes extensiones del problema que se resuelve mediante un enfoque de computación paralela.

5.5 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA

5.5.1 Modelo Matanachai & Yano (2001)

Matanachai & Yano (2001) proponen un modelo de programación matemática, en el cual se considera el *balance de línea tradicional* minimizando la variación de las cargas de trabajo promedio de todos los modelos en cada estación con respecto de la carga promedio por estación, también se incluye la variación entre las estaciones (*between-station diversity*) propuesta por Thomopoulos (1970) más conocida como balance horizontal y se incorpora un nuevo componente a la función objetivo que ayuda a alcanzar una mejor estabilidad de las cargas de trabajo a corto plazo conocido como variación dentro de las estaciones (*within-station diversity*), el cual se explica más adelante en este capítulo.

5.5.1.1 Supuestos

Los supuestos que se consideran son los siguientes:

- Se utiliza un solo diagrama de precedencia para todos los modelos, aunque no todas las tareas se requieran en todos los modelos.
- Cada tarea es desarrollada (para todos los modelos que la requieren) en una única estación.
- El número de estaciones está predeterminado. El modelo puede ser probado con diferentes números de estaciones para determinar la mejor alternativa.

5.5.1.2 Parámetros:

n	número de estaciones
N	número de tareas
Γ	número de modelos
m_γ	fracción de trabajos que son del modelo tipo γ
$I_{\gamma j}$	1, si el modelo tipo γ requiere la tarea j ; 0, de lo contrario
t_j	tiempo de procesamiento de la tarea j

w_j carga de trabajo de la tarea j , expresada como una fracción del tiempo de ciclo (es decir, la duración promedio ponderada de cada tarea)

$$w_j = t_j \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} m_{\gamma} I_{\gamma j} \quad (5.8)$$

W_i carga de trabajo de la estación i

T carga de trabajo total de las tareas

$$T = \sum_{j=1}^N w_j \quad (5.9)$$

ρ utilización promedio de la línea por estación

$$\rho = \frac{T}{n} \quad (5.10)$$

$\bar{t}_{\gamma}$ tiempo de procesamiento promedio por estación para el modelo tipo γ

$$\bar{t}_{\gamma} = (\sum_{j=1}^N I_{\gamma j} t_j) / n \quad (5.11)$$

P_j conjunto de predecesoras inmediatas de la tarea j

5.5.1.3 Variables de decisión

X_{ij} 1, si la tarea j es asignada a la estación i ; 0, de lo contrario.

5.5.1.4 Función Objetivo

La función objetivo está compuesta por tres factores:

- El balance tradicional,
- la variación entre las estaciones (balance horizontal), y
- la variación dentro de las estaciones.

A continuación se explica detalladamente cada uno de éstos:

Balance tradicional

El primer componente de la función objetivo es la expresión (5.12), ésta considera el concepto balance de línea tradicional que se encarga de minimizar la sumatoria de la desviación absoluta de los tiempos promedio de tarea en cada estación con respecto de la utilización promedio de la línea.

$$\sum_{i=1}^n |(\sum_{j=1}^N w_j X_{ij}) - \rho| \quad (5.12)$$

Variación dentro de las estaciones

El segundo componente de la función objetivo es la expresión (5.13), ésta representa la variación de los tiempos de proceso de todos modelos dentro de cada estación, este concepto se conoce como variación dentro de las estaciones. El objetivo es minimizar la sumatoria de la desviación absoluta de la carga generada por cada tipo de trabajo en cada estación con respecto de la carga promedio de la línea.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \left| \left(\sum_{j=1}^N I_{\gamma j} t_j X_{ij} \right) - \rho \right| \quad (5.13)$$

Matanachai & Yano (2001) introducen esta idea para reducir la variación de los tiempos de proceso de los diferentes modelos dentro de cada estación. Si esta variación es pequeña, cualquier secuencia tendrá bajas sobrecargas de trabajo y la línea de ensamble estará preparada para cualquier cambio en el *mix* de demanda. Sin embargo esto podría hacer que la carga de trabajo global esté balanceada en menor medida y se aumente levemente el tiempo de ciclo, pero con el beneficio de reducir la sobrecarga de trabajo.

Variación entre las estaciones

El tercer componente de la función objetivo es expresión (5.14), la cual representa la desviación de la carga de trabajo a través de las estaciones por cada modelo, este efecto es la variación entre estaciones conocida como balance horizontal. El objetivo es minimizar la sumatoria de la desviación absoluta del tiempo de proceso de cada tipo de modelo en cada estación con respecto de su propio tiempo de proceso promedio por estación.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \left| \left(\sum_{j=1}^N I_{\gamma j} t_j X_{ij} \right) - \bar{t}_{\gamma} \right| \quad (5.14)$$

Thomopoulos (1970) hizo notar el beneficio de balancear la carga de trabajo a través de las estaciones para cada modelo. Si la carga de trabajo para cada modelo está balanceada a través de las estaciones, el problema de secuenciación es mucho más fácil de resolver porque así una secuencia que sea eficiente para una estación, también lo será para las demás. Sin embargo cuando varias tareas son comunes en muchos modelos y se requiere que cada tarea sea asignada a una sola estación se dificulta el balance de las cargas para cada modelo (Matanachai & Yano, 2001).

Finalmente la expresión para la función objetivo es la siguiente:

(5.15)

$$\text{MIN } F = \Omega \sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^N w_j X_{ij} - \rho \right| + \sum_{i=1}^n \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \left| \sum_{j=1}^N I_{\gamma j} t_j X_{ij} - \rho \right| + \sum_{i=1}^n \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \left| \sum_{j=1}^N I_{\gamma j} t_j X_{ij} - \bar{t}_{\gamma} \right|$$

El primer término de esta función está sopesado por Ω , lo cual permite ajustar la influencia de éste en toda la función. Se observa que el primer término contiene n términos, mientras que los otros contienen $n\Gamma$ términos, y cada valor absoluto es una pequeña fracción. En consecuencia,

si Γ es grande, el segundo y el tercer término dominarían la función, esta es la razón principal para sopesar el primer término con Ω . En los escenarios donde la utilización de la línea es alta, sería mejor usar un valor de $\Omega > \Gamma$ a fin de mantener la utilización máxima de la estación cerca del promedio, lo cual facilita la secuenciación. Por otra parte si el balanceo de las cargas de trabajo no es tan importante en un sistema con pocas cargas, se pueden usar valores pequeños de Ω .

5.5.1.5 Restricciones

La restricción (5.16) garantiza que la carga de trabajo asignada a cada estación no exceda su capacidad:

$$\sum_{j=1}^N w_j X_{ij} < 1 \quad \forall i \quad (5.16)$$

La restricción (5.17) asegura que cada tarea sea desarrollada en una sola estación:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (5.17)$$

La restricción (5.18) asegura que se cumplan las relaciones de precedencia:

$$X_{ij} \leq \sum_{v=1}^i X_{vr} \quad \forall i, j; \forall r \in P_j \quad (5.18)$$

5.5.2 Modelo Bukchin, et al. (2002)

El modelo propuesto por Bukchin, et al. (2002) busca maximizar el flujo de la línea y se basa en la clasificación de las tareas en dos conjuntos E y E^c . El conjunto E contiene las tareas en el cual cada una tiene que ser asignada a la misma estación para todos los modelos que las requieren, estas tareas por lo general son aquellas que están asociadas con requerimientos de equipos de alto costo, al asignar una tarea de estas en diferente estación para cada modelo, se incurriría en costos adicionales para duplicar las máquinas por cada estación diferente donde se realice. Por ejemplo, considerando el conjunto $E = \{2, 4\}$, la tarea 2 tiene que ser asignada a la misma estación para todos los modelos, y así mismo la tarea 4, pero no necesariamente la tarea 2 y 4 quedarán en la misma estación. Adicionalmente el conjunto E^c contiene el resto de tareas, es decir, las que sí pueden asignarse a diferentes estaciones por cada modelo. Este conjunto principalmente incluye tareas manuales o que requieren herramientas de bajo costo, las cuales pueden ser duplicadas en cada estación sin incrementar considerablemente los costos.

5.5.2.1 Supuestos

- Los diagramas de precedencia de todos los tipos de modelos pueden ser agrupados en un único diagrama de precedencia combinado.
- Cada tarea del diagrama de precedencia agrupado es desarrollada al menos por un modelo.

- La duración de las tareas es conocida y puede variar dependiendo de cada tipo de modelo
- El sistema de control de la Línea es sin ritmo no sincronizado.
- La primera estación nunca estará ociosa y la última estación nunca estará bloqueada.
- La política de producción en la línea es MTO.
- Las tareas que son comunes en varios modelos pueden ser restringidas para ser asignadas a una misma estación para todos los modelos.

5.5.2.2 Parámetros

d_{jk} duración de la tarea k en el modelo j

p_{ij} duración del modelo j en la estación i

$\underline{P}$ conjunto de los tiempos de duración de los modelos en las diferentes estaciones
 $\underline{P} = \{p_{ij}\}$

IP_k conjunto de las predecesoras inmediatas de la tarea k

E conjunto de tareas, en el cual cada tarea tiene que ser asignada a una misma estación para todos los modelos

M la gran M

x_{ijk} 1, si la tarea k del modelo j es asignada a la estación i ; 0, de lo contrario

TP flujo de la línea

5.5.2.3 Función objetivo

$$MAX\{TP = f(\underline{P})\}$$

Maximizar el flujo de la línea TP es equivalente a minimizar el valor esperado cuello de botella $E(TBD)$ (que se presentó en la sección 5.3 de este capítulo), con esto, a la vez se minimiza el tiempo esperado entre salidas de productos terminados de la línea.

$$MIN E(TBD) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Pr(p_{ij} \text{ sea el cuello de botella}) * p_{ij}$$

5.5.2.4 Restricciones

El primer conjunto de restricciones garantiza que cada tarea sea asignada a una sola estación.

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} = 1 \quad \forall j, k$$

El segundo conjunto de restricciones garantiza que se cumplan las relaciones de precedencia que se han definido para las tareas

$$X_{ijk} \leq \sum_{l=1}^I x_{ijl} \quad \forall j, k, l, h \in IP_k$$

El tercer conjunto de restricciones sirve para obtener el tiempo de proceso de cada modelo en cada estación

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^K X_{ijk} d_{jk} \quad \forall i, j$$

El cuarto conjunto de restricciones asegura que la tarea que pertenece al conjunto E sea asignada a una única estación para todos los modelos que la requieren.

$$M(1 - X_{ijg}) - \sum_{f=1}^J \sum_{l \neq i} X_{ifg} \geq 0 \quad \forall g \in E, i, j$$

5.5.2.5 Consideraciones

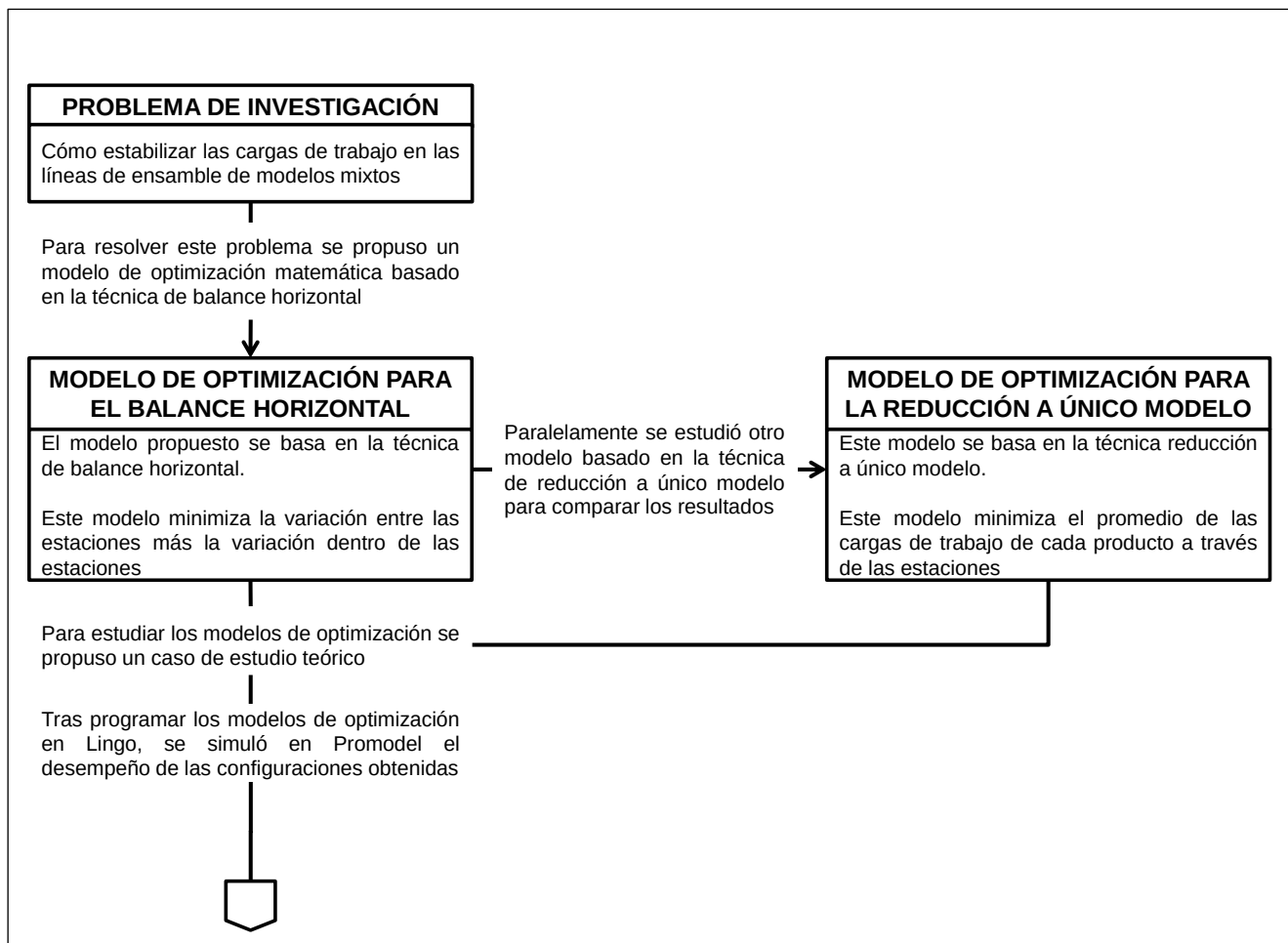
La función objetivo consiste en maximizar el *throughput*, la cual consta de dos componentes: el procedimiento de balance, es decir, la asignación de las tareas a las estaciones, y la secuencia de llegada de modelos a la línea. Debido a la política asumida MTO, la secuencia de entrada de órdenes de trabajo está distribuida aleatoriamente, de acuerdo con los patrones de demanda, en otras palabras, la probabilidad de que cada modelo sea el siguiente en ingresar a la línea es igual a la demanda periódica promedio de este modelo dividida entre la demanda total de todos los modelos. El propósito es utilizar una función objetivo para maximizar el *throughput* como una solución para el balance, para una demanda constante de cada modelo. La evaluación de varias funciones objetivo es necesaria para evaluar el rendimiento de la línea, y para comparar las soluciones factibles. La falta de un método exacto para evaluar el *throughput* de la línea en tales ambientes, sugiere la necesidad de un estudio de simulación para evaluar explícitamente el flujo, por otra parte, cuando se evalúan diferentes soluciones se puede encontrar más rápida y fácilmente una buena medida de desempeño que usando una simulación. En este caso la calidad de la medida de desempeño tiene gran importancia.

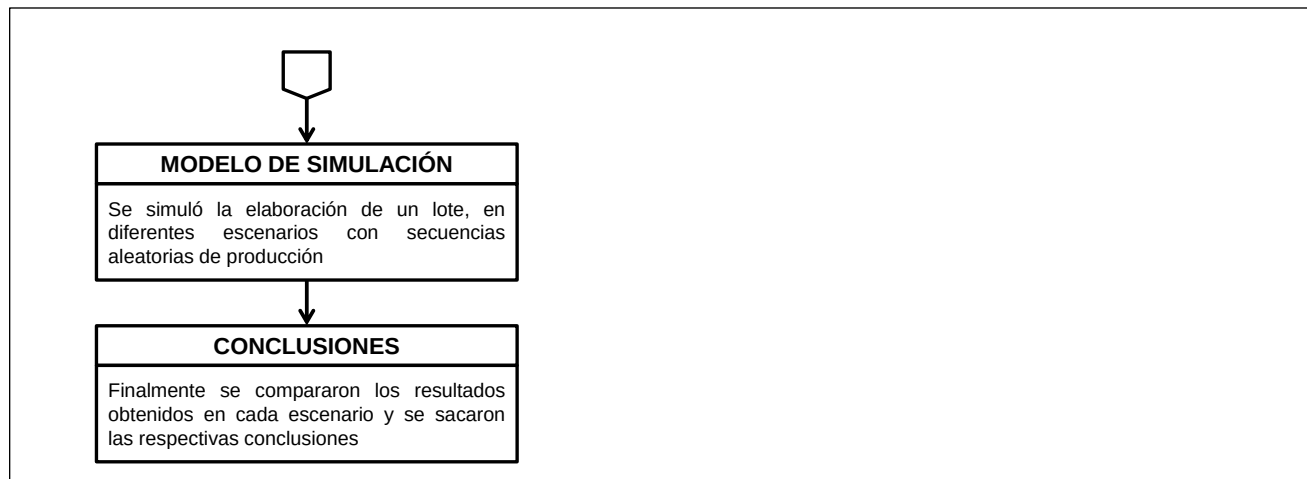
6. DESARROLLO METODOLÓGICO

Tras haber analizado parte de la literatura sobre los MALBP, se desarrolló un modelo de optimización matemática aplicando la técnica de balance horizontal (variación entre las estaciones) introducida por Thomopoulos (1970) y la variación dentro de las estaciones propuesta por Matanachai & Yano (2001) como se mostró en las secciones 5.4.2 y 5.5.1. Sin embargo a diferencia de la función objetivo planteada por los autores, en el modelo que se va presentar se deja la libertad para que una misma tarea pueda ser asignada a diferentes estaciones para cada producto, y con esto se amplía el número de soluciones posibles y además se incluye la participación de cada modelo para darle mayor importancia los modelos que tienen más peso en la línea. También se incluye el concepto de Bukchin, et al. (2002) para clasificar las tareas en los conjuntos E y E^c de acuerdo con lo expuesto en la sección 5.5.2.

Para analizar los beneficios del modelo propuesto se evaluó un caso de estudio. En primer lugar se asumió una configuración inicial para la línea de ensamble, la cual fue balanceada óptimamente con el método tradicional de reducción a modelo único presentado en la sección 5.4.1 el cual minimiza el tiempo de duración promedio de cada tarea (véase ANEXO 3), después se implementó el modelo propuesto, de esta manera se compararon los resultados y se evidenciaron las mejoras en cuanto a la estabilidad de las cargas de trabajo de la línea. Finalmente se analizaron los resultados mediante una simulación en Promodel.

Figura 11. Esquema del desarrollo metodológico





Fuente: autores

6.1 MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO

6.1.1 Formulación Verbal

Este modelo busca estabilizar las cargas de trabajo en la línea de ensamble mediante dos objetivos que se complementan entre sí, el primero de ellos es el balance horizontal introducido por Thomopoulos (1970) con el que se busca minimizar la variación de las cargas de trabajo por cada modelo a través de las estaciones (variación entre estaciones), al lograr esto cada modelo tendrá una duración similar en todas las estaciones. El objetivo complementario es el balance de las cargas dentro de cada estación (variación dentro de las estaciones), con el cual se busca minimizar la variación de las cargas de trabajo para todos los modelos que pasan dentro de cada estación, al lograr esto todos los modelos que pasen por una estación tendrán una duración similar dentro de ésta. De acuerdo con Matanachai & Yano (2001) al minimizar estos dos factores el problema de la secuenciación será mucho más fácil de resolver ya que habrá menos tiempos ociosos y menos sobrecargas de trabajo. De acuerdo con lo anterior la función objetivo sería la siguiente:

MINIMIZAR: variación del tiempo entre las estaciones por modelo
 + variación del tiempo dentro de las estaciones por modelo

Esta función está sujeta a las siguientes restricciones:

- Para cada modelo se tiene que asignar cada una de sus tareas a una sola estación,
- se tienen que respetar las relaciones de precedencia, y
- las tareas que no se pueden duplicar en varias estaciones tienen que ser asignadas a una única estación para todos los modelos.

6.1.2 Supuestos

Para implementar este modelo se deben considerar los siguientes supuestos:

- S-1: Se utiliza un solo diagrama de precedencia para todos los modelos, aunque no todas las tareas se requieran en todos los modelos.
- S-2: El número de estaciones está predeterminado.
- S-3: La participación de cada modelo en el *mix* de demanda se considera estable.

6.1.3 Notación de Índices

i estación

j modelo

k tarea

6.1.4 Notación de parámetros

I número de estaciones

J número de modelos

K número de tareas

m_j participación del modelo j en el *mix* de demanda

d_{jk} duración de la tarea k para el modelo j

w_k carga de trabajo en promedio ponderado de la tarea k

$$w_k = \sum_{j=1}^J m_j d_{jk} \quad (6.1)$$

T carga de trabajo promedio total

$$T = \sum_{k=1}^K w_k \quad (6.2)$$

ρ Utilización promedio de la línea

$$\rho = \frac{T}{I} \quad (5.10)$$

$\bar{d}_j$ duración promedio por estación del modelo j

$$\bar{d}_j = \frac{(\sum_{k=1}^K d_{jk})}{I} \quad (6.3)$$

IP_k	conjunto de las predecesoras inmediatas de la tarea k
E	conjunto de tareas en el cual cada tarea tiene que ser asignada a una misma estación para todos los modelos
M	la gran M

6.1.5 Variables de Decisión

X_{ijk}	1, si la tarea k del modelo j es asignada a la estación i ; 0, de lo contrario
OUB_{ij}	Sobreutilización ocasionada por el modelo j en la estación i , para el balance entre las estaciones
UUB_{ij}	Subutilización ocasionada por el modelo j en la estación i , para el balance entre las estaciones
C_{ij}	1, si la carga de trabajo del modelo j genera sobreutilización en la estación i , para el balance entre las estaciones; 0, de lo contrario
OUW_{ij}	Sobreutilización ocasionada por el modelo j en la estación i , para el balance dentro de las estaciones
UW_{ij}	Subutilización ocasionada por el modelo j en la estación i , para el balance dentro de las estaciones
D_{ij}	1, si la carga de trabajo del modelo j genera sobreutilización en la estación i , para el balance dentro de las estaciones; 0, de lo contrario

6.1.6 Función Objetivo

La función objetivo minimiza la *variación entre estaciones* (Ecuación 6.4) más la *variación dentro de las estaciones* (Ecuación 6.5).

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (|(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk}) - \bar{d}_j| * m_j) \quad (6.4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (|(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk}) - \rho| * m_j) \quad (6.5)$$

Al sumar (6.4) y (6.5) se obtiene la expresión inicial (6.6) para plantear la función objetivo:

(6.6)

$$MIN F = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\left| \left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \bar{d}_j \right| * m_j \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\left| \left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \rho \right| * m_j \right)$$

Debido a la no linealidad ocasionada por la función valor absoluto, es necesario hacer algunas modificaciones a la función (6.6) para transformarla en una función lineal. Para ello se realizan dos sustituciones:

- **Sustitución 1** (6.7)

$$\left(\left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \bar{d}_j \right) * m_j = OUB_{ij} - UUB_{ij}$$

donde,

$$\text{si } OUB_{ij} > 0, UUB_{ij} = 0, \text{ y}$$

$$\text{si } UUB_{ij} > 0, OUB_{ij} = 0$$

- **Sustitución 2** (6.8)

$$\left(\left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \rho \right) * m_j = OUW_{ij} - U UW_{ij}$$

donde,

$$\text{si } OUW_{ij} > 0, U UW_{ij} = 0, \text{ y}$$

$$\text{si } U UW_{ij} > 0, OUW_{ij} = 0$$

Al hacer las sustituciones 1 y 2 en la función objetivo (6.6) se obtiene la expresión (6.9), la cual es una función lineal equivalente:

(6.9)

$$MIN F = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (OUB_{ij} + UUB_{ij}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (OUW_{ij} + U UW_{ij})$$

6.1.7 Restricciones

R-1: asegura que la diferencia entre la carga de trabajo del modelo j en la estación i y la carga promedio de cada modelo arroje el valor de la sobreutilización o a la subutilización del *balance entre las estaciones*.

$$\left(\left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \bar{d}_j \right) * m_j = OUB_{ij} - UUB_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-1)$$

El conjunto de restricciones R-2 y R-3 asegura que ante un valor positivo de la sobreutilización para el balance entre las estaciones, el valor de la subutilización sea igual a cero, y viceversa.

$$OUB_{ij} \leq M * D_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-2)$$

$$UUB_{ij} \leq M * (1 - D_{ij}) \quad \forall i, j \quad (R-3)$$

R-4: asegura que la diferencia entre la carga de trabajo del modelo j en la estación i y la utilización promedio de la línea arroje el valor de la sobreutilización o a la subutilización del balance dentro de las estaciones.

$$\left(\left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \rho \right) * m_j = OUW_{ij} - U UW_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-4)$$

El conjunto de restricciones R-5 y R-6 asegura que ante un valor positivo de la sobreutilización para el balance dentro de las estaciones, el valor de la subutilización sea igual a cero, y viceversa.

$$OUW_{ij} \leq M * C_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-5)$$

$$U UW_{ij} \leq M * (1 - C_{ij}) \quad \forall i, j \quad (R-6)$$

R-7: garantiza que las tareas de cada modelo sean asignadas a una sola estación.

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} = 1 \quad \forall j, k \quad (R-7)$$

R-8: garantiza que se cumplan las relaciones de precedencia establecidas entre las tareas.

$$X_{ljk} \leq \sum_{i=1}^I X_{ijh} \quad \forall j, k, l, h \in IP_k \quad (R-8)$$

R-9: hace que el tiempo de proceso del modelo j en la estación i sea igual a la sumatoria de los tiempos de proceso de sus tareas asignadas en la estación i .

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^K X_{ijk} d_{jk} \quad \forall i, j \quad (R-9)$$

R-10: asegura que la tarea que pertenece al conjunto E sea asignada a una misma estación para todos los modelos que la requieren.

$$M(1 - X_{ijg}) - \sum_{f=1}^J \sum_{l \neq i} X_{lfg} \geq 0 \quad \forall g \in E, i, j \quad (R-10)$$

6.2 CASO DE ESTUDIO

Para contextualizar el problema planteado de los modelos mixtos en ambientes MTO se planteó un primer escenario en el cual se considera una línea de ensamble compuesta por 5 estaciones donde se elaboran de 3 tipos de modelos con 15 tareas en total.

6.2.1 Parámetros Generales

Los parámetros generales son los siguientes:

$I = 5$ estaciones

$J = 3$ modelos

$K = 15$ tareas

6.2.2 Participación de Cada Modelo

La participación en el *mix* de demanda m_j del modelo j es la siguiente:

$m_1 = 25\%$, $m_2 = 45\%$, $m_3 = 30\%$.

6.2.3 Cargas de Trabajo

En la Tabla 4 se presentan el tiempo de duración d_{jk} de la tarea k para el modelo j (en unidades de tiempo UT), la carga promedio w_k de la tarea k en la línea, y la duración promedio por estación $\bar{d}_j$ del modelo j .

Tabla 4. Tiempo de duración de la tarea k para modelo j

TAREA k	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	CARGA PROMEDIO
	25%	45%	30%	w_k
1	7	5	2	4,60
2	8	8	8	8,00
3	3	8	5	5,85
4	8	2	3	3,80
5	6	5	6	5,55
6	5	7	0	4,40
7	7	4	0	3,55
8	6	9	8	7,95
9	0	0	3	0,90
10	2	4	4	3,50
11	7	3	4	4,30
12	0	0	1	0,30
13	5	5	2	4,10
14	0	0	3	0,90
15	5	4	2	3,65
Duración promedio $\bar{d}_j$	13,80	12,80	10,20	

Fuente: autores

6.2.4 Carga de Trabajo Total

$$T = \sum_{k=1}^k w_k = 61.35 \text{ UT}$$

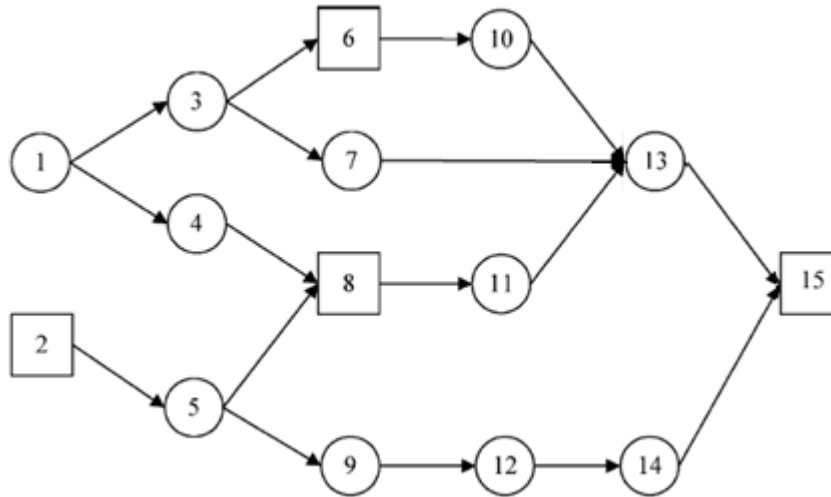
6.2.5 Carga Promedio de la Línea

$$\rho = \frac{T}{I} = 12.27 \text{ UT}$$

6.2.6 Relaciones de Precedencia

Las relaciones de precedencia que existen entre las tareas se presentan en la Figura 12.

Figura 12. Diagrama de precedencia combinado para los tres modelos



Fuente: adaptado de Bukchin, et al. (2002)

De acuerdo con las relaciones de precedencia establecidas el conjunto de predecesoras inmediatas IP_k de la tarea k se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Conjunto de predecesoras inmediatas de la tarea k .

TAREA k	CONJUNTO Ip_k
1	-
2	-
3	1
4	1
5	2
6	1, 3
7	1, 3
8	1, 2, 4, 5
9	2, 5
10	1, 3, 6
11	1, 2, 4, 5, 8
12	2, 5, 9
13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11
14	2, 5, 9, 12
15	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14

Fuente: autores

6.2.7 Relaciones de Asignación

El diagrama de precedencia de la Figura 12 consta de dos tipos de tareas las cuales están denotadas por círculos y cuadrados, los cuadrados representan las tareas que pertenecen al conjunto E , y los círculos representan a las tareas que se pueden asignar a cualquier estación. En este caso el conjunto E es el siguiente:

$$E = \{2, 6, 8, 15\}$$

En este caso, por ejemplo, la tarea 2 va a quedar asignada a la misma estación para todos los modelos. Lo mismo pasará con las tareas 6, 8, y 15.

6.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN EN LINGO

Al programar y correr el modelo mediante el software Lingo con los parámetros establecidos para el caso de estudio, se obtuvieron 361 variables de decisión y 497 restricciones. El óptimo global se obtuvo en 2'47'', arrojando un valor de 9.568 para la función objetivo.

6.4 RESULTADOS

6.4.1 Configuración inicial

La configuración inicial de la línea se presenta en la Tabla 6 y de acuerdo con la duración d_{jk} de la tarea k para el modelo j las cargas de trabajo en la estación i están distribuidas como se observan en la Tabla 7, en este caso los tiempos de proceso p_{ij} del modelo j en la estación i son altamente inestables a lo largo de la línea y dentro de cada estación como se puede ver en la Figura 13, esto sucede porque las tareas tienen una duración diferente para cada modelo, e incluso algunas tareas no se requieren en todos los modelos.

Tabla 6. Asignación de tareas a las estaciones en la configuración inicial de la línea

Estación i	Modelo j	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1

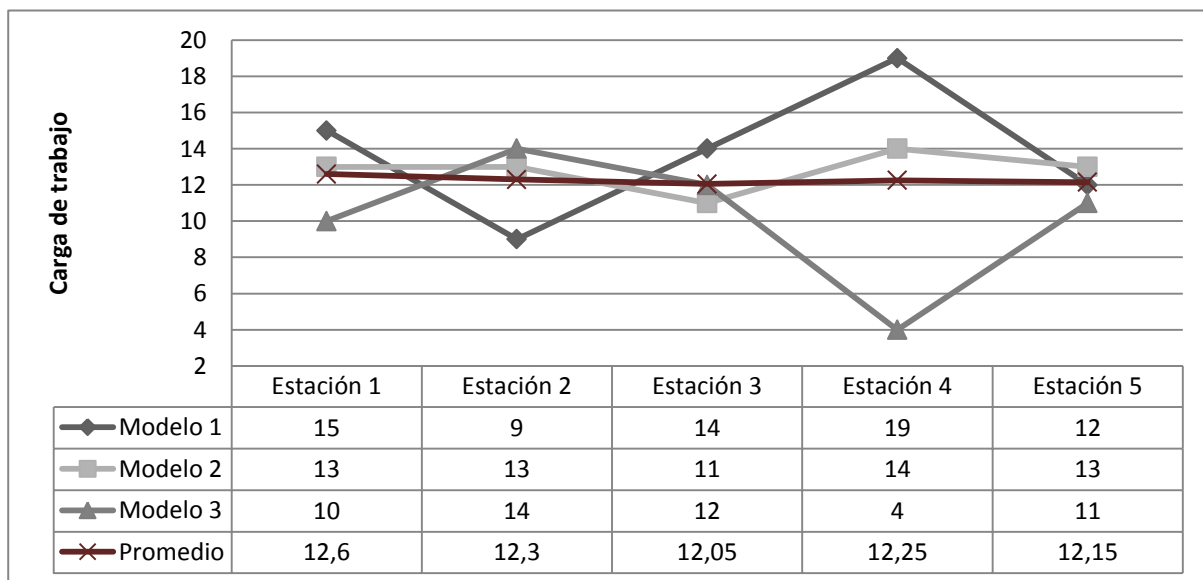
Fuente: autores

Tabla 7. Carga de trabajo de la tarea k para el modelo j en la estación i con la configuración inicial

Estación i	Modelo j	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
1	1	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	8	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	5	0	6	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	8	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	2	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	3	0	0	0	8	0	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	5	7	0	0	0	7	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	7	0	0	0	4	3	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	5	0	5
	2	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	0	4
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	2	3	2

Fuente: autores

Figura 13. Estabilidad de las cargas de trabajo según la duración p_{ij} del modelo j en la estación i obtenida con el balance tradicional



Fuente: autores

De acuerdo con Boysen, et al. (2008) el tiempo de ciclo en cada estación depende del modelo que esté siendo ensamblado en el momento, de acuerdo con esto los tiempos de ciclo de cada

modelo son los que se presentan en la Tabla 8, en este caso el tiempo de ciclo de cada modelo es el mayor tiempo de estación por lo que el tiempo ocioso $TO = \sum_{i=1}^I TC - p_{ij}$ de cada modelo j es bastante elevado debido a la alta variación entre las estaciones.

Tabla 8. Tiempo ocioso de cada modelo en la configuración inicial

Modelo j	m_j	Tiempo de ciclo	Tiempo ocioso
1	25%	19	26
2	45%	14	6
3	30%	14	19
Promedio		15,25	14,9

Fuente: autores

Mientras algunos modelos tienen una alta sobreutilización OUB_{ij} y OUW_{ij} de las estaciones generando sobrecargas de trabajo (véase Tabla 9 y Tabla 11), otros tienen una alta subutilización UUB_{ij} y UW_{ij} de las estaciones, lo cual genera los tiempos ociosos (véase Tabla 10 y Tabla 12). Estas variaciones de las cargas de trabajo entre las estaciones produce la gran inestabilidad de las cargas que se observa en el gráfico de la Figura 13.

Tabla 9. Sobreutilización para la variación entre las estaciones OUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	0,30	0,09	0,00
2	0,00	0,09	1,14
3	0,05	0,00	0,54
4	1,30	0,54	0,00
5	0,00	0,09	0,24

Fuente: autores

Tabla 10. Subutilización para la variación entre las estaciones UUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	0,00	0,00	0,06
2	1,20	0,00	0,00
3	0,00	0,81	0,00
4	0,00	0,00	1,86
5	0,45	0,00	0,00

Fuente: autores

Tabla 11. Sobreutilización para la variación dentro de las estaciones OUW_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	0,68	0,33	0,00
2	0,00	0,33	0,52
3	0,43	0,00	0,00
4	1,68	0,78	0,00
5	0,00	0,33	0,00

Fuente: autores

Tabla 12. Subutilización para la variación dentro de las estaciones UUW_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración inicial

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1,00	0,00	0,00	0,68
2,00	0,82	0,00	0,00
3,00	0,00	0,57	0,08
4,00	0,00	0,00	2,48
5,00	0,07	0,00	0,38

Fuente: autores

6.4.2 Configuración Propuesta

Al balancear la línea con el modelo matemático propuesto se obtiene la configuración presentada en la Tabla 13, de acuerdo con la duración d_{jk} de la tarea k para el modelo j , las cargas de trabajo en la estación i están distribuidas como se muestra en la Tabla 14, y por consiguiente los tiempos de proceso p_{ij} del modelo j en la estación i son los que se presentan en la Figura 14, en este caso las cargas de trabajo son más estables que con la configuración inicial, porque la línea ha sido balanceada teniendo en cuenta las cargas que genera cada modelo.

Tabla 13. Asignación de tareas a las estaciones en la configuración propuesta para la línea

Estación <i>i</i>	Modelo <i>j</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1

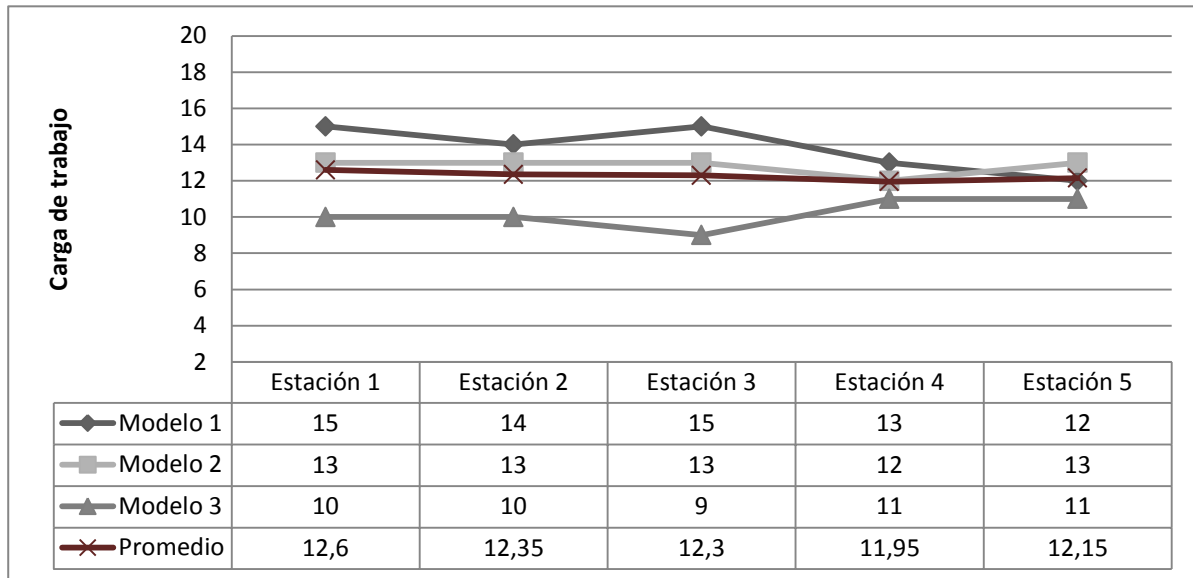
Fuente: autores

Tabla 14. Carga de trabajo de la tarea *k* para el modelo *j* en la estación *i* con la configuración propuesta

Estación <i>i</i>	Modelo <i>j</i>	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
1	1	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	8	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	6	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0
3	1	0	0	3	0	0	5	7	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	2	0	7	0	0	0	4	0	0	0	0	0
	3	0	0	5	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	7	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	3	0	0	0	0
	3	0	0	0	3	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	5	0	5
	2	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	0	4
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2	3	2

Fuente: autores

Figura 14. Estabilidad de las cargas de trabajo según la duración p_{ij} del modelo j en la estación i obtenida con el balance horizontal



Fuente: autores

De acuerdo con el tiempo de ciclo de cada modelo j el respectivo tiempo ocioso $TO = \sum_{i=1}^I TC - p_{ij}$, es considerablemente pequeño con relación a la configuración inicial (véase Tabla 15).

Tabla 15. Tiempo ocioso de cada modelo en la configuración propuesta

Modelo j	m_j	Tiempo de ciclo	Tiempo ocioso
1	25%	15	6
2	45%	13	1
3	30%	11	4
Promedio		12,9	3,15

Fuente: autores

En este caso también existe cierto grado de sobreutilización OUB_{ij} y OYW_{ij} por parte de algunos modelos en algunas estaciones (véase Tabla 16 y Tabla 18), pero éstos tienen una magnitud mucho menor que en la configuración inicial por lo tanto las sobrecargas de trabajo serán menores. Igualmente los modelos que generan subutilización en algunas estaciones UUB_{ij} y UW_{ij} (véase Tabla 17 y Tabla 19), también producen tiempos ociosos pero de menor magnitud. En este caso las cargas de trabajo son relativamente más estables como se muestra en la Figura 14.

Tabla 16. Sobreutilización en unidades de tiempo para la variación entre las estaciones OUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	0,30	0,09	0,00
2	0,05	0,09	0,00
3	0,30	0,09	0,00
4	0,00	0,00	0,24
5	0,00	0,09	0,24

Fuente: autores

Tabla 17. Subutilización en unidades de tiempo para la variación entre las estaciones UUB_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1	0,00	0,00	0,06
2	0,00	0,00	0,06
3	0,00	0,00	0,36
4	0,20	0,36	0,00
5	0,45	0,00	0,00

Fuente: autores

Tabla 18. Sobreutilización en unidades de tiempo para la variación dentro de las estaciones Ouw_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1,00	0,68	0,33	0,00
2,00	0,43	0,33	0,00
3,00	0,68	0,33	0,00
4,00	0,18	0,00	0,00
5,00	0,00	0,33	0,00

Fuente: autores

Tabla 19. Subutilización en unidades de tiempo para la variación entre las estaciones UUW_{ij} ocasionada por el modelo j en la estación i con la configuración propuesta

Estación i	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1,00	0,00	0,00	0,68
2,00	0,00	0,00	0,68
3,00	0,00	0,00	0,98
4,00	0,00	0,12	0,38
5,00	0,07	0,00	0,38

Fuente: autores

6.4.3 Beneficios Obtenidos con la Configuración Propuesta

Al comparar la configuración obtenida al implementar el modelo propuesto, contra la configuración inicial de la línea, ésta última genera un valor mucho menor para la desviación absoluta del promedio de los tiempos de tarea (véase Tabla 20). Sin embargo esto no garantiza que la línea esté bien balanceada para los diferentes tipos de modelos ya que cada tarea tiene una duración diferente por cada una de éstos, e incluso algunos modelos no requieren de todas las tareas, por lo tanto existirán altos tiempos ociosos y sobrecargas de trabajo cuando la línea esté operando. Por otra parte se puede observar que con la configuración propuesta la variación entre las estaciones y la variación dentro de las estaciones es mucho menor que los valores obtenidos con la configuración inicial, por lo tanto de acuerdo con Thomopoulos (1970), Matanachai & Yano (2001) y Boysen, et al. (2008) en este caso será más fácil que las secuencias de producción tengan una mayor estabilidad en las cargas de trabajo, es decir, menos tiempos ociosos y menos sobrecargas en cada estación.

Tabla 20. Desviación absoluta y variación de los tiempos de proceso en unidades de tiempo para las dos configuraciones de la línea

CONFIGURACIÓN	DESVIACIÓN DE LAS CARGAS PROMEDIO	VARIACIÓN ENTRE LAS ESTACIONES	VARIACIÓN DENTRO DE LAS ESTACIONES
	$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left \left(\sum_{k=1}^K w_k X_{ijk} \right) - \rho \right $	$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\left \left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \bar{d}_j \right * m_j \right)$	$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\left \left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \rho \right * m_j \right)$
Inicial	2,16	8,76	10,16
Propuesta	22,92	2,98	6,59

Fuente: autores

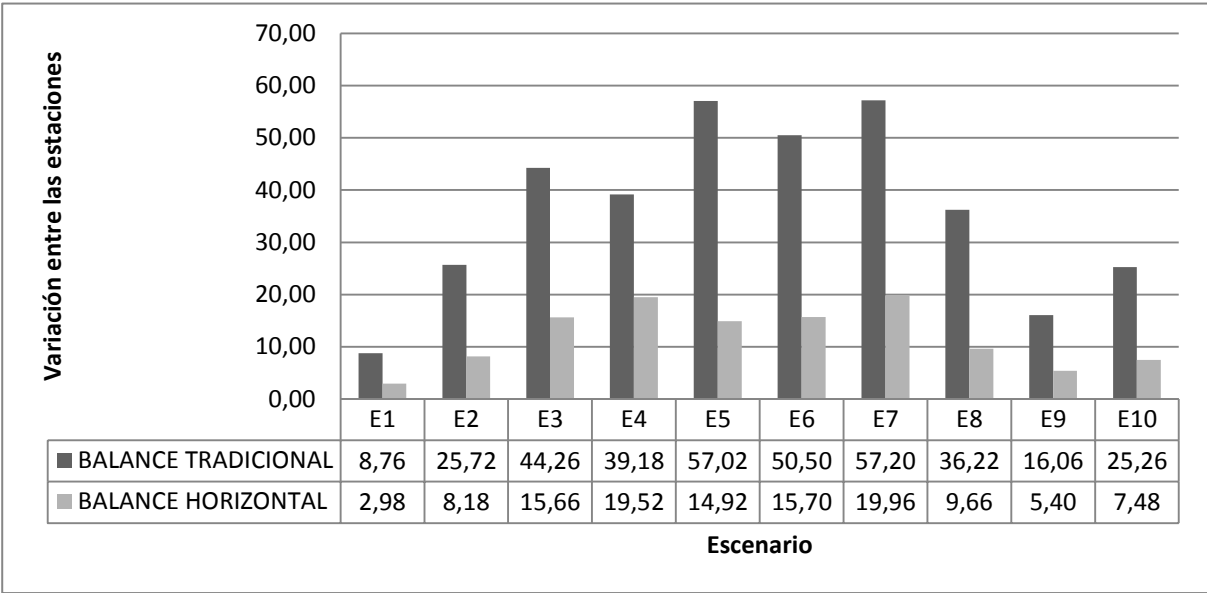
6.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para observar el comportamiento del modelo al variar algunos de los parámetros se analizaron varios escenarios partiendo del caso de estudio inicial. Se hizo un primer análisis para el escenario inicial del caso de estudio y generando nueve escenarios adicionales (desde E1 hasta E10), modificando aleatoriamente los tiempos de duración d_{jk} de cada tarea (considerando iguales todos los demás parámetros de entrada). Por otra parte se hizo un segundo análisis independiente generando otros diez escenarios (desde E11 hasta E20) partiendo del caso de estudio inicial al cual se le modificó la participación m_j en el *mix* de demanda de cada modelo. En todos los escenarios la línea de ensamble fue balanceada con el método tradicional y luego con el método propuesto obteniendo los valores óptimos de la función objetivo y siempre los resultados obtenidos con éste último arrojaron configuraciones con las cuales las cargas de trabajo son igual o más estables que con el método tradicional.

6.5.1 Escenarios con Diferentes Tiempos de Duración de Cada Tarea

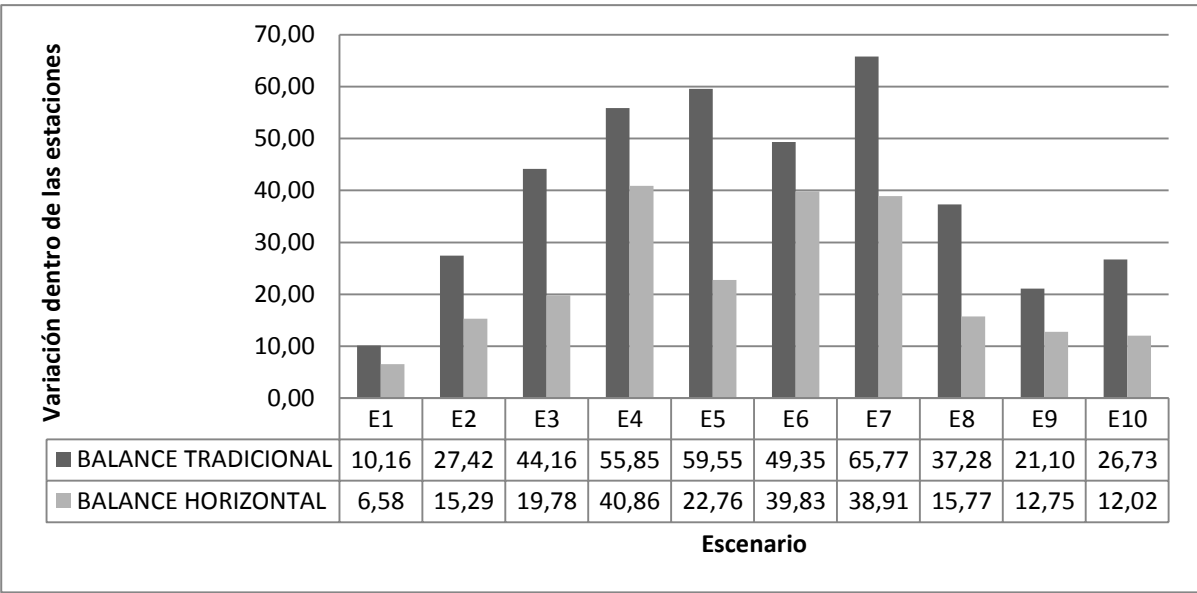
Al correr el modelo propuesto en escenarios (E1 a E10) con diferentes valores para los tiempos de duración d_{jk} de cada tarea, siempre se obtuvo mejores resultados para la variación entre estaciones (ecuación 6.4) y la variación dentro de las estaciones (ecuación 6.5) que al aplicar el método de reducción a único modelo. Para la variación entre estaciones se obtuvieron valores inferiores entre un 50% y un 74% que los reportados con el balance tradicional (véase Figura 15), esto se debe a que cada tarea k tiene un diferente tiempo de duración en cada modelo j , por lo tanto se tiene un efecto más apropiado balanceando la carga de cada modelo individualmente como lo hace el balance horizontal. Para la variación dentro de las estaciones los resultados obtenidos fueron entre un 19% y un 62% menores que los reportados con el balance tradicional (véase Figura 16), esto ocurre debido al efecto que produce la ecuación (6.5) de la función objetivo el cual minimiza la diferencia entre la carga de cada estación y la carga promedio por estación, esto garantiza que los tiempos ociosos sean menores cuando la línea esté operando en la producción de lotes con cualquier *mix* de modelos.

Figura 15. Variación entre las estaciones en escenarios con diferentes valores para la duración de cada tarea d_{ijk}



Fuente: autores

Figura 16. Variación dentro de las estaciones en escenarios con diferentes valores para la duración de cada tarea d_{ijk}

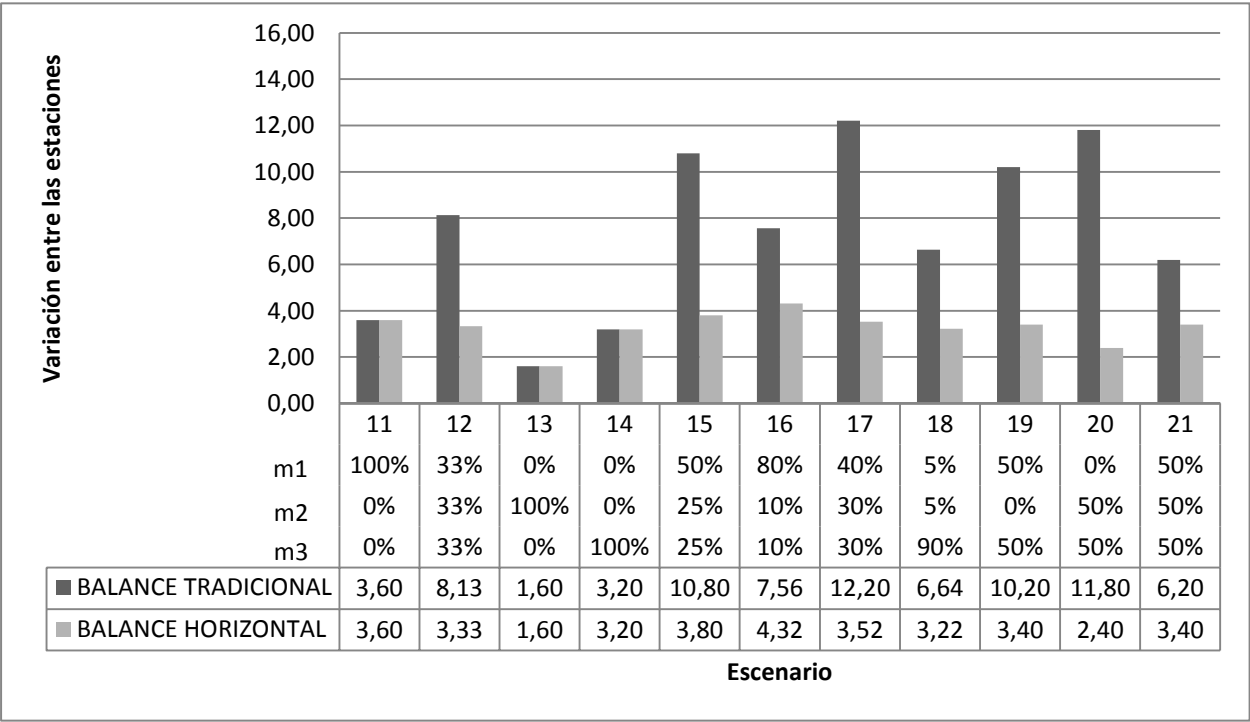


Fuente: autores

6.5.2 Escenarios con Diferente Participación de Cada Modelo en el *Mix* de Demanda

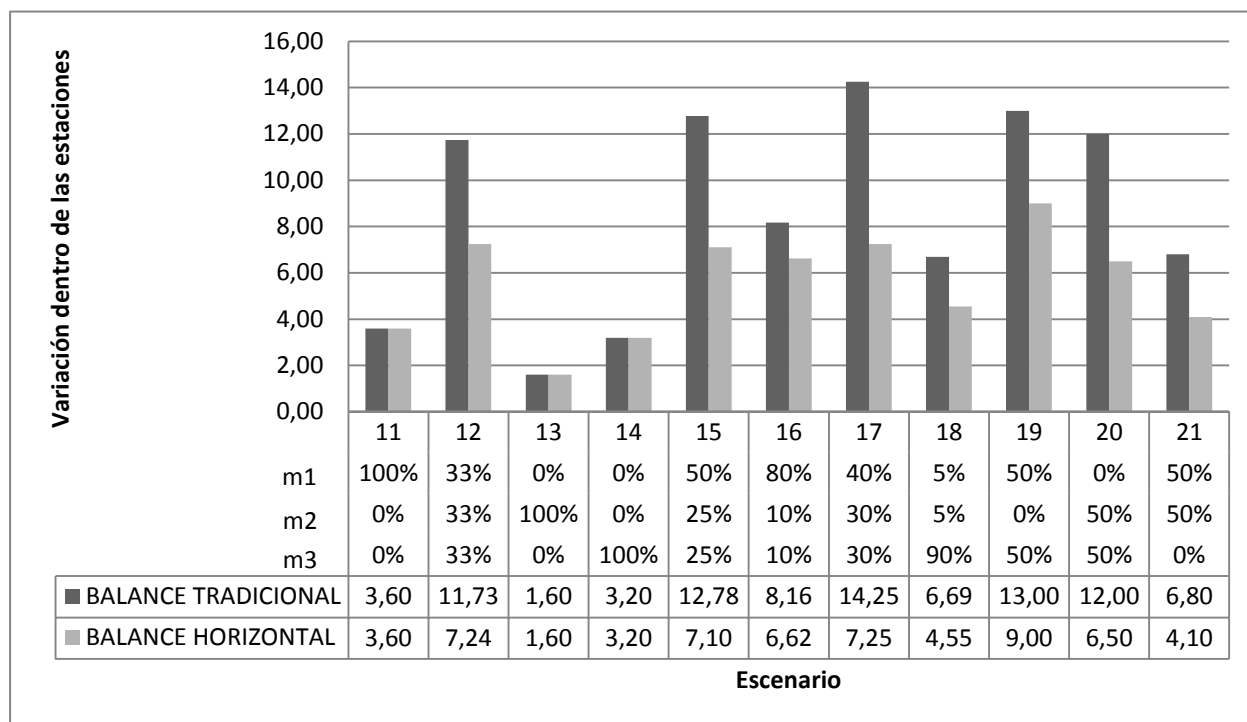
Al analizar los escenarios (E11 a E20) en que se varía la participación en el *mix* de demanda m_j de cada modelo j , los resultados obtenidos para la variación entre las estaciones (véase Figura 17) y la variación dentro de las estaciones (véase Figura 18) con el balance horizontal siempre superan a los del balance tradicional, excepto en los escenarios donde alguno de los tres modelos tiene el 100% de la participación (escenarios E11, E13 y E14), esto sucede porque al haber un modelo que tiene toda la participación en la demanda, la línea de ensamble de modelos mixtos está operando como una línea de modelo único, por lo tanto la técnica de balance tradicional con base en las cargas promedio tiene el mismo efecto que el balance horizontal.

Figura 17. Variación entre las estaciones en escenarios con diferente participación m_j de cada modelo



Fuente: autores

Figura 18. Variación dentro de las estaciones en escenarios con diferente participación m_j de cada modelo

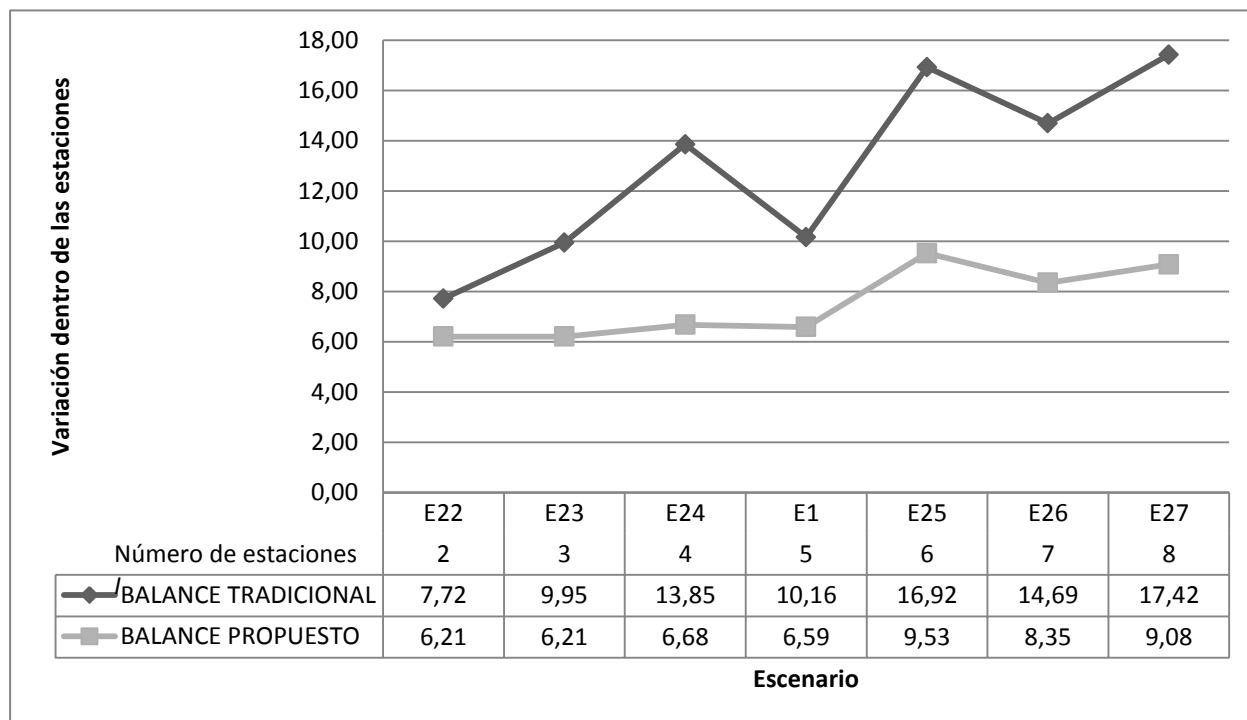


Fuente: autores

6.5.3 Escenarios con Diferente Número de Estaciones

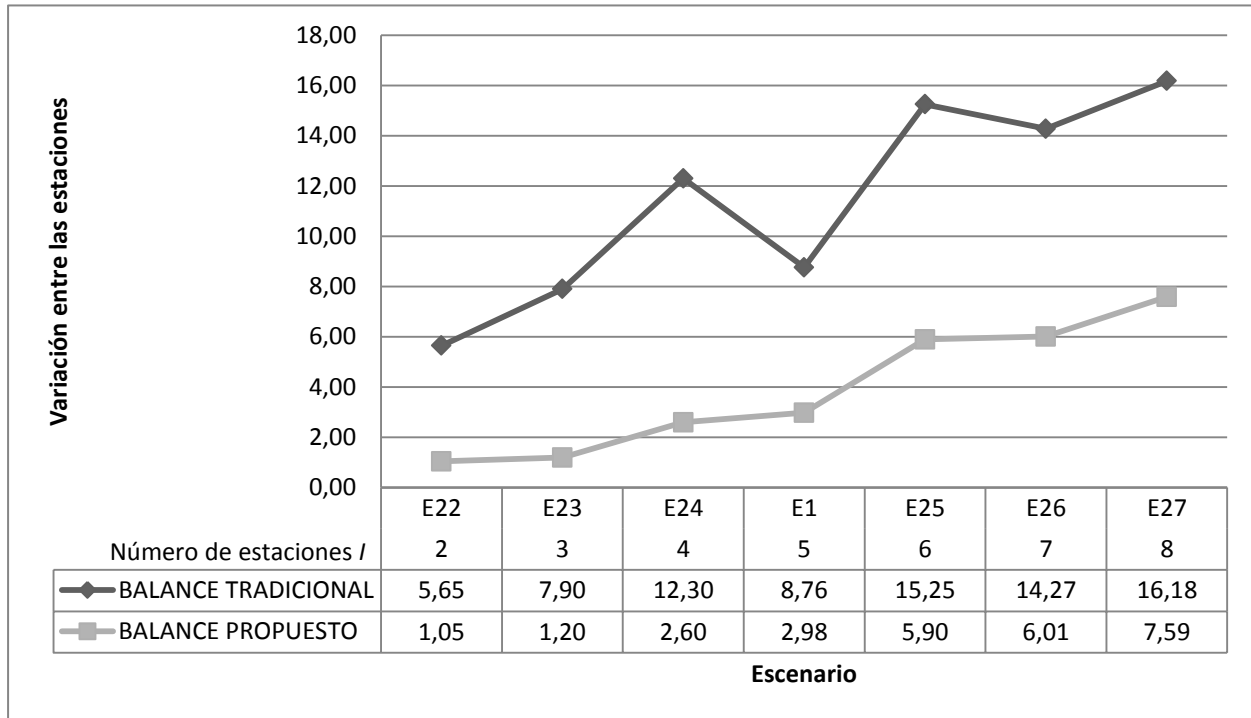
Para analizar los efectos que puede generar un cambio en el número de estaciones se analizó el caso de estudio en escenarios con diferente número de estaciones $I = 2, \dots, 8$ (sólo se analizó hasta 8 estaciones porque el tiempo computacional a partir de 9 se hacía muy extenso). Se pudo observar que en tanto en la configuración inicial como en la configuración propuesta tanto la variación dentro de las estaciones como la variación entre las estaciones tienen un patrón de comportamiento creciente con respecto del número de estaciones, es decir, que al haber mayor número de estaciones el valor total de las variaciones se hace mayor.

Figura 19. Variación dentro de las estaciones en escenarios con diferente número de estaciones I



Fuente: autores

Figura 20. Variación entre las estaciones en escenarios con diferente número de estaciones I



Fuente: autores

6.6 SIMULACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

Para validar los resultados obtenidos con el modelo propuesto, se estudió el comportamiento de la línea de ensamble mediante una simulación realizada en Promodel, de esta manera se pudo ilustrar el desempeño de ésta. Primero se simuló y se analizó la configuración inicial y la configuración propuesta en el caso de estudio, y posteriormente se realizaron las respectivas simulaciones para los diferentes escenarios estudiados en la sección 6.5.1.

Los factores que se tuvieron en cuenta para correr la simulación fueron los siguientes:

- Número de estaciones (locaciones) 5
- Número de modelos (entidades) 3
- Proceso: es la ruta que sigue cada modelo a través de las estaciones.
- Llegada: son los momentos en que cada modelo ingresa al sistema.

Esta simulación se hizo con lotes de 60 unidades en total, conformados de acuerdo a la participación m_j de cada modelo j ($m_1 = 25\%$, $m_2 = 45\%$, $m_3 = 30\%$), es decir, el *mix* está compuesto por 15, 27, y 18 unidades del modelo 1, 2, y 3 respectivamente.

Se simularon los 10 escenarios de la sección 6.5.1, los cuales se analizaron generando varias secuencias producción aleatoriamente (3 por cada escenario) tanto para la configuración inicial como para la propuesta.

Tras realizar el primer análisis en el caso de estudio se pueden realizar las siguientes observaciones para cada una de las dos configuraciones.

6.6.1 Configuración Inicial

En este escenario el tiempo total requerido para la elaboración del lote de 60 unidades es 13.86 horas. La eficiencia y el tiempo ocioso de cada estación se presentan en la Tabla 21, y los tiempos promedio de cada modelo se presentan en la Tabla 22. Se puede observar que los modelos 1, 2 y 3 permanecen en promedio 14.20, 24.81 y 33.83 minutos respectivamente bloqueados en colas esperando para ser procesados en alguna estación.

Tabla 21. Desempeño de cada estación en la simulación de la configuración inicial

LOCACIÓN	TOTAL ENTRADAS	TIEMPO DISPONIBLE (hr)	EFICIENCIA	OCIO
Estación 1	60	13,86	90,91%	9,09%
Estación 2	60	13,86	88,75%	11,25%
Estación 3	60	13,86	86,95%	13,05%
Estación 4	60	13,86	88,39%	11,61%
Estación 5	60	13,86	87,67%	12,33%

Fuente: autores

Tabla 22. Desempeño de cada modelo en la simulación de la configuración inicial

ENTIDAD	SALIDAS	TIEMPO PROMEDIO EN EL SISTEMA (min)	TIEMPO PROMEDIO EN ESPERA (min)	TIEMPO PROMEDIO EN OPERACIÓN (min)	TIEMPO PROMEDIO BLOQUEADO (min)
Modelo 1	15	274,22	189,47	70,56	14,2
Modelo 2	27	384,07	293,7	65,56	24,81
Modelo 3	18	328,46	242,07	52,56	33,83

Fuente: autores

6.6.2 Configuración Propuesta

En este escenario el tiempo total requerido para la elaboración del lote de 60 unidades es 13.59 horas. En este caso la eficiencia y el tiempo ocioso de cada estación se presentan en la Tabla 23, y los tiempos promedio de cada modelo se presentan en la Tabla 24. Se puede observar que los modelos 1, 2 y 3 permanecen en promedio 9.53, 17.48 y 27.33 minutos respectivamente bloqueados en colas esperando para ser procesados en alguna estación.

Tabla 23. Desempeño de cada estación en la simulación de la configuración propuesta

LOCACIÓN	TOTAL ENTRADAS	TIEMPO DISPONIBLE (hr)	EFICIENCIA	OCIO
Estación 1	60	13,59	92,70%	7,30%
Estación 2	60	13,59	90,86%	9,14%
Estación 3	60	13,59	90,49%	9,51%
Estación 4	60	13,59	87,92%	12,08%
Estación 5	60	13,59	89,39%	10,61%

Fuente: autores

Tabla 24. Desempeño de cada modelo en la simulación de la configuración propuesta

ENTIDAD	SALIDAS	TIEMPO PROMEDIO EN EL SISTEMA (min)	TIEMPO PROMEDIO EN ESPERA (min)	TIEMPO PROMEDIO EN OPERACIÓN (min)	TIEMPO PROMEDIO BLOQUEADO (min)
Modelo 1	15	269,56	189,47	70,56	9,53
Modelo 2	27	375,89	292,85	65,56	17,48
Modelo 3	18	321,74	241,85	52,56	27,33

Fuente: autores

Tras realizar las simulaciones en todos los demás escenarios planteados implementando secuencias aleatorias para los pedidos, se pudo observar que en el 100% de los casos la configuración propuesta necesitó un tiempo menor (hasta un 10% menos) para terminar el lote, esto sucede porque al minimizar la variación entre las estaciones de cada modelo se obtiene un tiempo de ciclo menor para cada uno de éstos, y con la minimización de la variación dentro de las estaciones se obtiene un flujo continuo de las piezas en proceso. Debido a lo anterior, es más sencillo encontrar secuencias de producción que tengan un buen desempeño en cuanto a la eficiencia y el flujo de la línea.

7. CONCLUSIONES

Caracterizar los ambientes MTO para identificar los factores que afectan a las líneas de ensamble en estos entornos.

- Los ambientes MTO deben tener cierta flexibilidad para adaptarse a las variaciones de la demanda, por lo tanto el sistema de ensamble en estos ambientes deben estar en la capacidad para producir cualquier combinación de productos sin incurrir en grandes ineficiencias o sobre costos al pasar de un producto a otro.
- El concepto de líneas de ensamble de modelos mixtos sólo se puede considerar en sistemas productivos que fabriquen familias de productos para los cuales los tiempos de alistamiento al pasar de un modelo a otro sean nulos o en su defecto lo suficientemente pequeños como para ser despreciados, en cualquier otro caso se debe considerar la implementación de líneas de modelo único independientes para cada producto o las líneas de ensamble de modelos múltiples para la producción en lotes.
- En los ambientes MTO la llegada de pedidos es un proceso estocástico en el tiempo, en los cuales una orden puede gastar hasta un 90% del tiempo total de su lead time en esperas entre las estaciones de trabajo, por lo tanto las líneas de ensamble de modelos mixtos en ambientes MTO se deben balancear de tal modo que las cargas de trabajo sean estables y dichas esperas se puedan reducir.
- La importancia de implementar líneas de ensamble de modelos mixtos en ambientes MTO radica en la flexibilidad que se puede obtener con éstas para cumplir con los pedidos de los clientes en tiempos razonables. Además se generan ahorros en espacio y dinero.
- En futuras investigaciones podría explorarse la posibilidad de implementar este tipo de líneas en otros ambientes de manufactura distintos a MTO.

Proponer un modelo matemático adecuado para balancear la carga de trabajo por cada producto en la línea de ensamble.

- Al consultar la literatura los MALBP se pudo comprobar que es difícil encontrar modelos matemáticos de Programación Lineal para solucionar estos problemas, encontrando que muchos modelos de los que se han planteado son no lineales lo que dificulta su implementación en los software de optimización para problemas reales.
- La idea que plantean Matanachai & Yano (2001) para realizar el balance de línea minimizando la variación entre las estaciones y la variación dentro de las estaciones es muy valiosa porque permite incrementar la eficiencia de las líneas de modelos mixtos y

al mismo tiempo mejorar el flujo. Este concepto es la base del modelo propuesto en esta investigación, sin embargo se le agregó la posibilidad de que una misma tarea puede ser asignada en diferentes estaciones dependiendo del modelo, con esto se tienen más soluciones factibles para encontrar una mejor solución óptima.

- Para realizar el ALB en líneas de ensamble de modelos mixtos se deben considerar las restricciones de precedencia que se hayan definido entre las tareas. En los modelos mixtos se asume que todos los productos pertenecen a una misma familia y por lo tanto las relaciones de precedencia son las mismas para todos, por lo tanto se puede elaborar un gráfico de precedencia global donde se incluyan todas las tareas, teniendo en cuenta que las tareas que no se requieren en ciertos modelos tendrían una duración igual a cero unidades de tiempo.
- Al realizar el balance horizontal (Variación entre las estaciones) se equilibran las cargas de trabajo que genera cada modelo a través de las estaciones minimizando los tiempos ociosos de cada modelo por separado, pero esto no garantiza que las piezas de trabajo tengan un flujo uniforme a través de la línea, porque el tiempo de proceso dentro de una misma estación puede ser diferente para cada modelo, por lo tanto es necesario minimizar la variación dentro de las estaciones para que cada estación se demore el mismo tiempo en procesar cada modelo, haciendo que cualquier secuencia de productos genere cargas de trabajo estables, por lo tanto el problema del *scheduling* no será tan relevante. De esta manera se da cumplimiento al objetivo general de esta investigación.
- Tras realizar el análisis de sensibilidad se pudo observar que al cambiar las participaciones de cada modelo siempre se tienen cargas de trabajo más estables con el método propuesto, excepto en los escenarios donde alguno de los modelos tiene el 100% de la participación ya que en estos casos la línea de modelos mixtos queda operando como una línea de modelo único y el balance que se realiza con el método tradicional tiene el mismo efecto que el método propuesto.
- Al comparar la estabilidad de las cargas de trabajo en varios escenarios donde cada uno tiene diferente número de estaciones se pudo observar una tendencia creciente de la variación de las cargas de trabajo cuando aumenta la cantidad de estaciones, es decir que, a mayor número de estaciones se reportan valores más altos para la variación entre las estaciones y la variación dentro de las estaciones.

Aplicar el modelo en un caso de estudio para validar sus resultados.

- La Programación Lineal es una herramienta muy valiosa para optimizar el ALB de modelos mixtos, pero sólo resulta útil en la práctica cuando los sistemas que se estudian son de un tamaño relativamente pequeño ya que los tiempos computacionales que se requieren para encontrar la solución óptima se extienden demasiado si el problema en cuestión es muy grande. En el caso del modelo propuesto se puede correr

aproximadamente en 5 horas un modelo de 15 tareas, 7 estaciones y 5 modelos, para problemas más grandes el tiempo computacional puede llegar a extenderse demasiado.

- La simulación es una herramienta muy útil para analizar teóricamente la operación de las líneas de ensamble. Uno de sus beneficios más valioso es que permite analizar diferentes escenarios que podrían ocurrir en la vida real y así tomar las decisiones correspondientes para obtener el desempeño deseado para la línea.
- La propuesta de balance de línea del modelo propuesto se puede aplicar en diferentes industrias de la región, que requieren tener flexibilidad en sus procesos para poder producir diferentes tipos de modelos de una misma familia en sus líneas de ensamble. Algunas de estas industrias son Fanalca y Sofasa las cuales se ajustan a éste tipo de producción.
- El problema de ALB de modelos mixtos es un tema en el cual aún quedan muchos aspectos por investigar, especialmente la decisión conjunta entre el balance de línea y el la secuenciación de los pedidos para optimizar todo el proceso desde un enfoque sistémico como lo sugieren la mayoría de los autores en la literatura.

ANEXOS

ANEXO 1. MODELO PROPUESTO PARA EL ALB DE MODELOS MIXTOS

Minimizar:

$$MIN F = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (OUB_{ij} + UUB_{ij}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (OUW_{ij} + U UW_{ij})$$

Sujeto a:

$$\left(\left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \bar{d}_j \right) * m_j = OUB_{ij} - UUB_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-1)$$

$$OUB_{ij} \leq M * D_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-2)$$

$$UUB_{ij} \leq M * (1 - D_{ij}) \quad \forall i, j \quad (R-3)$$

$$\left(\left(\sum_{k=1}^K d_{jk} X_{ijk} \right) - \rho \right) * m_j = OUW_{ij} - U UW_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-4)$$

$$OUW_{ij} \leq M * C_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-5)$$

$$U UW_{ij} \leq M * (1 - C_{ij}) \quad \forall i, j \quad (R-6)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} = 1 \quad \forall j, k \quad (R-7)$$

$$X_{ljk} \leq \sum_{i=1}^I X_{ijh} \quad \forall j, k, l, h \in IP_k \quad (R-8)$$

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^K X_{ijk} d_{jk} \quad \forall i, j \quad (R-9)$$

$$M(1 - X_{ijg}) - \sum_{f=1}^J \sum_{l \neq i} X_{lfg} \geq 0 \quad \forall g \in E, i, j \quad (R-10)$$

ANEXO 2. ALGORITMO EN LINGO DEL MODELO PROPUESTO

MODEL:

SETS:

Estacion;;
Modelo: m, tp;
Tarea: w;

ModeloTarea (Modelo, Tarea): t;
EstacionModelo (Estacion, Modelo): OUB, UUW, OUB, UUB, C, D;

RelPre (Tarea, Tarea):;
ModeloTareaEstacionRelPre (Modelo, Tarea, Estacion, RelPre):;
E(Tarea):;

EstacionModeloTarea (Estacion, Modelo, Tarea): x;

ENDSETS

!Restricciones para linealizar;

@FOR(EstacionModelo(i,j): (@SUM(Tarea(k): (t(j,k)*x(i,j,k))) - tP(j)) *
m(j) = OUB(i,j) - UUB(i,j));

@FOR(EstacionModelo(i,j): OUB(i,j) <= GranM * D(i,j));

@FOR(EstacionModelo(i,j): UUB(i,j) <= GranM * (1-D(i,j)));

@FOR(EstacionModelo(i,j): @BIN(D(i,j)));

@FOR(EstacionModelo(i,j): (@SUM(Tarea(k): (t(j,k)*x(i,j,k))) - rho) *
m(j) = OUW(i,j) - UUW(i,j));

@FOR(EstacionModelo(i,j): OUW(i,j) <= GranM * C(i,j));

@FOR(EstacionModelo(i,j): UUW(i,j) <= GranM * (1-C(i,j)));

@FOR(EstacionModelo(i,j): @BIN(C(i,j)));

!Restricciones del modelo;

@FOR(EstacionModeloTarea(i,j,k): @BIN(x(i,j,k)));

@FOR(ModeloTarea(j,k): @SUM(Estacion(i): x(i,j,k)) = 1);

@FOR(ModeloTareaEstacionRelPre(j,k,l,h,k): x(l,j,k) <=

@SUM(Estacion(i) | i#LE#l: x(i,j,h)));

@FOR(E(g): @FOR(EstacionModelo(i,j): (BigM*(1-x(i,j,g))) -
(@SUM(Modelo(f): @SUM(Estacion(l) | l#NE#i: x(l,f,g)))) >=0));

!Función objetivo;

F = @SUM(Estacion(i): @SUM(Modelo(j): OUW(i,j) + UUW(i,j)))
+@SUM(Estacion(i): @SUM(Modelo(j): OUB(i,j) + UUB(i,j)));

MIN = F;

DATA:

II = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'I');

Estacion = 1..II;

JJ = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'J');

```

Modelo = 1..JJ;

KK = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'K');
Tarea = 1..KK;

t = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'd');

RelPre = 1 3, 1 4, 2 5, 3 6, 3 7, 4 8, 5 8, 5 9, 6 10, 7 13, 8 11, 9 12,
10 13, 11 13, 12 14, 13 15, 14 15;
E = 2, 6, 8, 15;

BigM = 9;
GranM = 900;

m = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'm');
w = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'w');
rho = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'rho');
tP = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'dp');

@OLE('Parámetros B.xlsx', 'x') = x;

@OLE('Parámetros B.xlsx', 'OUB') = OUB;
@OLE('Parámetros B.xlsx', 'UUB') = UUB;
@OLE('Parámetros B.xlsx', 'OUW') = OUW;
@OLE('Parámetros B.xlsx', 'U UW') = U UW;
ENDDATA
END

```

ANEXO 3. MODELO PARA EL MÉTODO DE REDUCCIÓN A ÚNICO MODELO

Minimizar:

$$MIN F = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (OUG_{ij} + UUG_{ij})$$

Sujeto a:

$$\left(\left(\sum_{k=1}^K w_k X_{ijk} \right) - \rho \right) = OUG_{ij} - UUG_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-1)$$

$$OUG_{ij} \leq M * B_{ij} \quad \forall i, j \quad (R-2)$$

$$UUG_{ij} \leq M * (1 - B_{ij}) \quad \forall i, j \quad (R-3)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} = 1 \quad \forall j, k \quad (R-7)$$

$$X_{ljk} \leq \sum_{i=1}^l X_{ijh} \quad \forall j, k, l, h \in IP_k \quad (R-8)$$

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^K X_{ijk} d_{jk} \quad \forall i, j \quad (R-9)$$

$$M(1 - X_{ijg}) - \sum_{f=1}^J \sum_{l \neq i} X_{lfg} \geq 0 \quad \forall g \in E, i, j \quad (R-10)$$

ANEXO 4. ALGORITMO EN LINGO DEL MODELO DE REDUCCIÓN A ÚNICO MODELO

MODEL:

```

SETS:
    Estacion;;
    Modelo: m, tp;
    Tarea: w;

    ModeloTarea (Modelo, Tarea): t;
    EstacionModelo (Estacion, Modelo): OUG, UUG, B;

    RelPre (Tarea, Tarea);
    ModeloTareaEstacionRelPre (Modelo, Tarea, Estacion, RelPre);
    E(Tarea);

    EstacionModeloTarea (Estacion, Modelo, Tarea): x;
ENDSETS

!Restricciones para linealizar el modelo;
@FOR(EstacionModelo(i,j): @SUM(Tarea(k): (w(k)*x(i,j,k))) - rho =
OUG(i,j) - UUG(i,j));
@FOR(EstacionModelo(i,j): OUG(i,j) <= GranM * B(i,j));
@FOR(EstacionModelo(i,j): UUG(i,j) <= GranM * (1-B(i,j)));
@FOR(EstacionModelo(i,j): @BIN(B(i,j)));

!Restricciones del modelo;
@FOR(EstacionModeloTarea(i,j,k): @BIN(x(i,j,k)));

@FOR(ModeloTarea(j,k): @SUM(Estacion(i): x(i,j,k)) = 1);

@FOR(ModeloTareaEstacionRelPre(j,k,l,h,k): x(l,j,k) <=
@SUM(Estacion(i) | i#LE#l: x(i,j,h)));

@FOR(E(g): @FOR(EstacionModelo(i,j): (BigM*(1-x(i,j,g))) -
(@SUM(Modelo(f): @SUM(Estacion(l) | l#NE#i: x(l,f,g)))) >=0));

!Función objetivo;
F = @SUM(Estacion(i): @SUM(Modelo(j): OUG(i,j) + UUG(i,j)));
MIN = F;

DATA:
    II = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'I');
    Estacion = 1..II;

    JJ = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'J');
    Modelo = 1..JJ;

    KK = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'K');
    Tarea = 1..KK;

    t = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'd');

    RelPre = 1 3, 1 4, 2 5, 3 6, 3 7, 4 8, 5 8, 5 9, 6 10, 7 13, 8 11, 9 12,
10 13, 11 13, 12 14, 13 15, 14 15;
    E = 2, 6, 8, 15;

```

```
BigM = 9;
GranM = 900;

m = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'm');
w = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'w');
rho = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'rho');
tP = @OLE('Parámetros B.xlsx', 'dp');

@OLE('Parámetros B.xlsx', 'x') = x;

@OLE('Parámetros B.xlsx', 'OUG') = OUG;
@OLE('Parámetros B.xlsx', 'UUG') = UUG;
ENDDATA

END
```

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aase, G. R., Olson, J. R. & Schniederjans, M. J., 2004. U-shaped assembly line layouts and their impact on labour productivity: an experimental study. *European Journal of Operational Research*, Issue 156, p. 698–711.
- Akagi, F., Osaki, H. & Kikuchi, S., 1983. A method for assembly line balancing with more than one worker in each station. *International Journal of Production Research*, Issue 21, p. 755–770..
- Amen, M., 2000. Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey. *International Journal of Production Economics*, Issue 68, pp. 1-14.
- Amen, M., 2001. Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. *International Journal of Production Economics*, Issue 69, pp. 255-264.
- Askin, R. & Zhou, M., 1997. A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*, Issue 35, pp. 3095-3105.
- Bard, J. F., Dar-El, E. & Shtub, A., 1992. An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Research*, Volumen 30, pp. 35-48.
- Bautista, J. & Pereira, J., 2002. Ant algorithms for assembly line balancing. *Lecture Notes in Computer Science*, Issue 2463, p. 65–75.
- Baybars, I., 1986. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, Issue 32, pp. 909-932.
- Becker, C. & Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, Issue 168, pp. 694-715.
- Bi, Z. M. & Zhang, W. J., 2001. Flexible fixture design and automation: review, issues and future directions. *International Journal of Production Research*, Issue 39, p. 2867–2894.
- Bock, S., Rosenberg, O. & van Brackel, T., 2006. Controlling mixed-model assembly lines in real-time by using distributed systems. *European Journal of Operational Research*, Issue 168, p. 880–904.
- Boysen, N., Flidner, M. & Armin, S., 2008. Assembly line balancing: Which model to use when?. *Int. J. Production Economics*, Issue 111, pp. 509-528.
- Boysen, N., Flidner, M. & Scholl, A., 2007. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, Issue 183, pp. 674-693.
- Bukchin, J., 1998. A comparative study of performance measures for throughput of mixed model assembly line balancing in JIT environment. *International Journal of Production Research*, 36(10), pp. 2669-2685.

Bukchin, J., Dar-El, E. M. & Rubinovitz, J., 2002. Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers & Industrial Engineer*, Issue 41, pp. 405-421.

Bukchin, J., Dar-El, E. & Rubinovitz, J., 1997. Team oriented assembly system design: A new approach. *International Journal of Production Economics*, Issue 51, p. 47-57.

Bukchin, J. & Rubinovitz, J., 2002. A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. *IIE Transactions*, Issue 35, pp. 573-585.

Bukchin, J. & Tzur, M., 2000. Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions*, Issue 35, p. 585-598.

Burbidge, J. L., 1989. *Production flow analysis for planning group technology*. Oxford: Clarendon Press.

Burns, L. D. & Daganzo, C. F., 1987. Assembly line job sequencing principles. *International Journal of Production Research*, Issue 25, pp. 71-99.

Buxey, G. M., Slack, N. D. & Wild, R., 1973. Production flow line system design — a review. *AIIE Transactions*, Issue 5, p. 37-48.

Buzacott, J. A., 1971. The role of inventory banks in flow line production systems. *International Journal of Production Research*, Issue 9, p. 425-436.

Capacho, L., 2007. *ASALBP: the Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem. Formalization and Resolution Procedures*, Barcelona: s.n.

Capacho, L. & Pastor, R., 2004. ASALBP: the alternative subgraphs assembly line balancing problem. *Working Paper*.

Chase, R. B., 1974. Survey of paced assembly lines. *Industrial Engineering*, 6(2), pp. 14-18.

Conway, R., Maxwell, W., McClain, J. O. & Thomas, L. J., 1988. The role of work-in-process inventory in serial production lines. *Operations Research*, Issue 36, p. 229-241.

Decker, M., 1993. Capacity smoothing and sequencing for mixed-model lines. *International Journal of Production Economics*, pp. 30-42.

Deutsch, D. F., 1971. *A branch and bound technique for mixed product assembly line balancing*, Dissertation, Arizona State University: Ph.D.

Dobson, G. & Yano, C. A., 1994. Cyclic scheduling to minimize inventory in a batch flow line. *European Journal of Operational Research*, Issue 75, p. 441-461.

Domschke, W., Klein, R. & Scholl, A., 1996. Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Issue 66, pp. 1465-1490.

Dorigo, M., Maniezzo, V. & Coloni, A., 1996. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B*, 1(26), pp. 29-41.

Falkenauer, E., 2005. *Line balancing in the real world*. In: *Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management*. s.l.:Lumiere University of Lyon.

Flake, G. W., 1999. The computational beauty of Nature. En: *Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems and Adaptation*. s.l.:The MIT Press.

Fremerey, F., 1991. Model-mix balancing: more flexibility to improve the general results. En: *Production research: approaching the 21st century*. London: Tailor & Francis, pp. 314-321.

Glover, F., 1996. Tabu search and adaptive memory programming. Advances, applications and challenges. En: R. H. a. J. K. (. In R.S. Barr, ed. *Interfaces in Computer Science and Operations Research*. s.l.:Kluwer, pp. 1-75.

Goldberg, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization Learning*. s.l.:Addison Wesley Publishing Company.

Hautsch, K., John, H. & Schürgers, H., 1972. Taktabstimmung bei Fließarbeit mit dem Positionswert-Verfahren. *REFA Nachrichten*, Issue 25, p. 451–464.

Held, M., Karp, R. & Shreshian, R., 1963. Assembly line balancing—dynamic programming with precedence constraints. *Operations Research*, 3(11), pp. 442-459.

Helgeson, W. & Birnie, D., 1961. Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial Engineering*, Issue 12, p. 394–398.

Hillier, F. S. & Boling, R. W., 1966. The effect of some design factors on the efficiency of production lines with variable operation times. *Journal of Industrial Engineering*, Issue 17, p. 651–658.

Hillier, F. S. & So, K. C., 1991. The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems. *International Journal of Production Research*, Issue 29, p. 2043–2055.

Hoffmann, T. R., 1992. EUREKA: A hybrid system for assembly line balancing. *Management Science*, Issue 38, p. 39–47.

Hopp, W. & Spearman, M., 2000. *Factory Physics*. Columbus, OH: McGraw-Hill.

Imaoka, Z., 2008. *Lean Manufacturing Japan*. [En línea] Available at: <http://www.lean-manufacturing-japan.com/scm-terminology/mts-make-to-stock.html> [Último acceso: 12 Noviembre 2012].

Jackson, J., 1956. A computing Procedure for a Line Balancing Problem. *Management Science*, Issue 2, pp. 261-271.

Johnson, R. V., 1988. Optimally balancing large assembly lines with "FABLE". *Management Science*, Issue 34, pp. 240-253.

Kao, E. & Queyranne, M., 1982. On dynamic programming methods for assembly line balancing. *Operations Research*, Issue 30, p. 375–390.

Karabati, S. & Sayin, S., 2003. Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. *European Journal of Operational Research*, Issue 149, p. 417–429.

Kim, Y., Kim, J. & Kim, Y., 2006. An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines. *European Journal of Operational Research*, Issue 168, p. 838–852.

Kim, Y. K., Kim, J. Y. & Kim, Y., 2000. A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied Intelligence*, Issue 13, p. 247–258.

Lapierre, S. & Ruiz, A., 2004. Balancing assembly lines: an industrial case study. *Journal of the Operational Research Society*, Issue 55, p. 589–597.

Lapierre, S., Ruiz, A. & Soriano, P., 2006. Balancing assembly lines with tabu search. *European Journal of Operational Research*, Issue 168, p. 826–837.

Lawler, E. L., 1979. Efficient implementation of dynamic programming algorithms for sequencing problems. En: *Report BW 106/79*. Amsterdam: Stichting Mathematisch Centrum.

Lee, T., Kim, Y. & Kim, Y., 2001. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers and Industrial Engineering*, Issue 40, p. 273–292.

Little, J., Murty, K., Sweeney, D. & Karel, C., 1963. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 11, Issue 11, p. 972–989.

Macaskill, J. L. C., 1972. Production-line balances for mixed model lines. *Management Science*, Issue 19, pp. 423-434.

Machuca, J. A. y otros, 1995. *Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y servicios*. Madrid: Mc Graw Hill.

Markowitz, D. M., Reiman, M. I. & Wein, L. M., 1995. *Working paper 3863-95-MSA*.

Matanachai, S. & Yano, C., 2001. Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *IIE Transactions*, Issue 33, p. 29–42.

Mather, H., 1989. *Competitive Manufacturing*. Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall.

McMullen, P. & Frazier, G., 1998. Using simulated annealing to solve a multi-objective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, Issue 36, p. 2717–2741.

McMullen, P. R. & Frazier, G. V., 1997. A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*, Issue 51, pp. 177-190.

Merengo, C., Nava, F. & Pozetti, A., 1999. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, Issue 37, pp. 2835-2860.

Meyr, H., 2004. Supply chain planning in the German automotive industry. *OR Spectrum*, Issue 26, p. 447–470.

- Miltenburg, J., 2002. Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Issue 14, pp. 119-151.
- Miltenburg, J. & Wijngaard, J., 1994. The U-line line balancing problem. *Management Science*, Issue 40, p. 1378–1388.
- Nicholas, J., 1997. *Competitive Manufacturing Management: Continuous Improvement*. Columbus, OH: McGraw-Hill.
- Pastor, R., Andres, C., Duran, A. & Perez, M., 2002. Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion. *Journal of the Operational Research Society*, Issue 53, pp. 1317-1323.
- Pierreval, H., Caux, C., Paris, J. & Viguiet, F., 2003. Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, Issue 44, p. 339–364.
- Pine, B. J., 1993. *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Pinnoi, A. & Wilhelm, W. E., 1997. A family of hierarchical models for assembly system design. *International Journal of Production Research*, Issue 35, p. 253–280.
- Prenting, T. O. & Battaglin, R. M., 1964. Precedence diagram - a tool for analysis in assembly line balancing. *Journal of Industrial Engineering*, 4(15), pp. 497-500.
- Rekiek, B. & Dechambre, A., 2006. *Assembly line design: The balancing of mixed-model hybrid assembly line with genetic algorithms*. s.l.:Springer.
- Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A. & Bratcu, A., 2002. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, Issue 26, p. 163–174.
- Salveson, M. E., 1955. The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, Issue 6, p. 18}25.
- Sarker, B. R. & Pan, H., 2001. Designing a Mixed-Model, Open-Station Assembly Line Using Mixed-Integer Programming. *The Journal of the Operational Research Society*, 52(5), pp. 545-558.
- Scholl, A., 1995. *Balancing and secuencing of assembly lines*. Heidelberg, Germany: Physica-Verlag.
- Scholl, A., 1999. *Balancing and sequencing assembly lines*. 2 ed. Heidelberg: Physica.
- Scholl, A. & Becker, C., 2004. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operations Research*., Issue 168, pp. 666-693.
- Scholl, A. & Becker, C., 2005. A note on an exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics*, Issue 97, pp. 343-352.
- Scholl, A. & Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operations Research*, Issue 168, p. 666–693..

Scholl, A. & Klein, R., 1997. SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing*, Issue 9, p. 319–334.

Scholl, A. & Klein, R., 1999. Balancing assembly lines effectively – A computational comparison. *European Journal of Operational Research*, Issue 114, pp. 50-58.

Scholl, A. & Voss, S., 1996. Simple assembly line balancing–Heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, Issue 2, pp. 217-244.

Schöniger, J. & Spingler, J., 1989. Planung der Montageanlage. *Technica*, Issue 14, p. 27–32.

Schrage, L. & Baker, K. R., 1978. Dynamic programming solution of sequencing problems with precedence constraints. *Operations Research*, Issue 26, pp. 444-449.

Shtub, A. & Dar-El, E. M., 1989. A methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research*, Issue 27, p. 175–186.

Silver, E., 2002. *An overview of heuristic solution methods*. Haskayne School of Business, University of Calgary: Working paper.

Smith, A., 1776. *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. 1 ed. s.l.:s.n.

Sparling, D. & Miltenburg, J., 1998. Mixed-model U-line balancing. *International Journal of Production Research*, Issue 36, p. 485–501.

Spengler, T., Rehkopf, S. & Volling, T., 2007. Revenue management in make-to-order manufacturing-an application to the iron and steel industry. *OR Spectrum*, 1(29), pp. 158-171.

Sumichrast, R. T. & Russell, R. S., 1990. Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems. *Journal of Operations Management*, Issue 9, p. 371–390.

Sumichrast, R. T., Russell, R. S. & Taylor, B. W., 1992. A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in a just-in-time production system. *International Journal of Production Research*, Issue 30, p. 199–214.

Suresh, G. & Sahu, S., 1994. Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. *International Journal of Production Research*, Issue 32, p. 1801–1810.

Talbot, F. B., Patterson, J. H. & Gehrlein, W. V., 1986. A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. *Management Science*, Issue 32, pp. 431-453.

Tempelmeier, H., 2003. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of Production Research*, Issue 41, p. 149–170.

Thomopoulos, N. T., 1970. Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science*, 16(9), pp. 593-603.

Tsai, L.-H., 1995. Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. *Management Science*, Issue 41, p. 485–495.

Vilarinho, P. & Simaria, A., 2002. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, Issue 40, p. 1405–1420.

Wang, J., 2011. *Revenue Management for Make-to-Order and Make-to-Stock Systems*. PhD diss ed. s.l.:University of Tennessee.

Wild, R., 1972. *Mass-Production Management: The Design and Operation of Production Flow-Line Systems*. London: Wiley.

Wilhelm, W. E., 1999. A column-generation approach for the assembly system design problem with tool changes. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Issue 11, p. 177–205.

Yano, C. A. & Bolat, A., 1989. Survey, development and applications of algorithms for sequencing paced assembly lines. *Journal of Manufacturing and Operations Management*, Issue 2, p. 172–198.