

PROPUESTA PARA REDUCIR EL INVENTARIO EN PROCESO DE UNA LINEA DE
ENSAMBLE QUE TIENE UN DISEÑO “SPINELAYOUT”

GUSTAVO ADOLFO RODRIGUEZ BALLESTEROS

Director

JUAN PABLO OREJUELA CABRERA

M.Cs. Ingeniería industrial



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI

2015

PROPUESTA PARA REDUCIR EL INVENTARIO EN PROCESO DE UNA LINEA DE
ENSAMBLE QUE TIENE UN DISEÑO “SPINELAYOUT”

GUSTAVO ADOLFO RODRIGUEZ BALLESTEROS

Tesis presentada como trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial.

Director

JUAN PABLO OREJUELA CABRERA

M.Cs. Ingeniería industrial



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

SANTIAGO DE CALI

2015

Nota de aceptación

Juan Pablo Orejuela – Director

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, 2014.

Agradecimientos

Primeramente a Dios, que fundamenta mis principios de bondad en las acciones que he realizado. A mis padres, que son la fuente de mis enseñanzas, mejorando todos los días mi calidad como persona. A los profesores que contribuyeron con mi formación académica, especialmente a los profesores Juan Pablo Orejuela y Camilo Andrés Micán que no solo aportaron a mi perfil profesional como Ingeniero Industrial, si no también me dieron valiosas lecciones para resolver con integralidad problemáticas reales que se presentan en el emocionante camino de la vida.

Tabla de contenido

Introducción.....	9
1. Planteamiento del problema.....	12
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. Justificación.....	15
4. Líneas de ensamble.....	16
4.1 Caracterización de las líneas de ensamble – “Diseño” o “Layout”.....	20
5. Sistema de abastecimiento interno	26
6. Sistema logístico CKD.....	32
7. Sistema logístico CKD implementado en una línea de ensamble “SpineLayout”	36
8. Desarrollo del modelo	38
8.1 Caso estudio:	44
8.1.1 Resultados.....	49
8.2 Análisis de sensibilidad.	55
- 8.2.1 Escenario 1. Variación en la cantidad de muelles.	56
- 8.2.2 Escenario 2. Nueva organización de objetos en las cajas.....	64
- 8.2.3 Escenario 3. Variación del Lead Time.	71
8.3 Análisis de sensibilidad para lotes de vehículos.	76
9. Conclusiones	89
Bibliografía.....	92
Anexos	96
Anexo 1. Código en AMPL	96

Lista de tablas

Tabla 1. Volumen de cada objeto	46
Tabla 2. Lead Time de cada caja.....	47
Tabla 3.1. Contenido de cada caja.	47
Tabla 3.2. Contenido de cada caja.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3.3. Contenido de cada caja.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.1. Requerimiento de la línea de ensamble.....	48
Tabla 4.2. Requerimiento de la línea de ensamble..	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. Tiempo en que se inicia la apertura de las cajas.	49
Tabla 6. Muelles en los que se desempaca cada caja.....	50
Tabla 7. Objetos que no aportan al inventario de producto en proceso.....	51
Tabla 8. Periodos con inventario de producto en proceso.	52
Tabla 9. Volumen total que se ocupa en cada periodo.	53
Tabla 10. Inventario Promedio Ponderado	54
Tabla 11. Resultados utilizando 1 Muelle.	56
Tabla 12. Resultados utilizando 2 Muelles.....	57
Tabla 13. Resultados utilizando 3 Muelles.....	57
Tabla 14. Resultados utilizando 4 Muelles.....	58
Tabla 15. Resultado utilizando 5 Muelles.	58
Tabla 16. Resultado utilizando 7 Muelles.	59
Tabla 17. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 3, 4, 5 y 7 Muelles.....	60
Tabla 18. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utiliza 1 Muelle.	62
Tabla 19. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 2 Muelles.	63
Tabla 20.1. Contenido de cada caja, primera nueva agrupación.	65
Tabla 20.2. Contenido de cada caja, primera nueva agrupación.	65
Tabla 20.3. Contenido de cada caja, primera nueva agrupación.	66
Tabla 21. Resultados, primera nueva agrupación.....	66
Tabla 22. Periodos con inventario de producto en proceso, primera nueva agrupación.	67
Tabla 23.1. Contenido de cada caja, segunda nueva agrupación.	68
Tabla 23.2. Contenido de cada caja, segunda nueva agrupación.	68
Tabla 23.3. Contenido de cada caja, segunda nueva agrupación	69
Tabla 24. Resultados, con segunda nueva agrupación.	69

Tabla 25. Periodos con inventario de producto en proceso, segunda nueva agrupación.	70
Tabla 26. Resultados utilizando dos muelles. Lead Time = 1 para cada caja.....	71
Tabla 27. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 2 Muelles. Lead Time = 1 para cada caja.	72
Tabla 28. Nuevo Lead Time para cada caja.	72
Tabla 29. Resultados utilizando dos muelles. Lead Time diferente para cada caja.	73
Tabla 30. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 2 Muelles. Lead Time para cada caja estipulado en la <i>Tabla 28</i>	74

Lista de figuras

Figura 2. “Spine Layout” para plantas modulares.	25
Figura 3. Inventario Promedio Ponderado para cada muelle en el escenario 1.....	59

Introducción

Las organizaciones del sector de la producción automotriz, están siempre a la vanguardia de nuevas tecnologías para el mejoramiento de procesos; esto permite que la funcionalidad de la organización experimente detalles externos que podrían mejorar el rendimiento. Sin embargo, se debe tener sumo cuidado el concepto aplicativo de la tecnología en un proceso formalizado, en el estricto sentido, de que se debe estudiar y analizar detalladamente un conjunto de operaciones para posteriormente planear un diseño específico de implementación de nueva tecnología al proceso establecido, con la prioridad de evitar daños directos y colaterales, y reducir la brecha de error entre el concepto teórico y el práctico.

En la búsqueda del mencionado mejoramiento de procesos, la industria automotriz en especial, incorporó el sistema logístico *Complete Know Down*, el cual permite consolidar en un almacén las piezas necesarias para formar un aparato funcional. Las materias primas que abastecen el almacén, son trasladadas por las firmas automotrices hacia las plantas de fabricación, en las que la mano de obra tiene un costo más beneficioso; además de facilitar el transporte de las piezas, se tiene la ventaja que en ese lugar se ensamblan y queda equidistante al mercado al que quieren dirigir sus modelos. En Colombia, particularmente, hay tres ensambladoras: la Compañía Colombiana Automotriz (CCA), Sofasa y GM Colmotores, las cuales arman diferentes vehículos con el material procedente de distintos países. A septiembre del año 2014, se vendieron 118.344 unidades ensambladas en el territorio nacional.¹

El mejoramiento que se desarrolla a lo largo de este trabajo está orientado a la correcta gestión de los inventarios, ya que generalmente, en las empresas se presenta el problema de “tener demasiado de lo que no se consume y agotado de lo que más se rota” (Vidal, 2009; citado por Taborda, 2008). Particularmente, se

¹ (2014) El mercado de los CKD y los CBU. Revisado (27 de Mayo del 2014) de <http://www.portafolio.co/archivo/documento/MAM-2748862>

realiza el enfoque en el inventario de producto en proceso que se origina en una línea de ensamble de la industria automotriz con *Complete Knock Down*, este tipo de inventario es un foco de problemas de ineficiencia en la producción, ya que no es característico de una manufactura esbelta y el tenerlo, provoca que la capacidad de respuesta del sistema sea lenta.

Ahora bien, es importante caracterizar el ambiente de producción en el que se realiza el mejoramiento, ya que los atributos que identifican cada estructura de producción son fuente primaria de información y sirven como parámetros definidos y básicos para un inicio fundamentado. La situación problema, se plantea en una línea ensambladora que tiene una configuración “SpineLayout” o columna vertebral, línea híbrida que es implementada en su mayoría de veces por la industria automotriz debido a las características flexibles de su diseño modular y a su avanzada productividad, fundamentada en el sistema productivo de ensamblaje.

En el concepto del diseño de columna vertebral, el producto se mueve a lo largo de una arteria principal, o columna vertebral, a través de la planta. Vinculado a la columna vertebral hay líneas de mini-montaje propiedad de los proveedores, cada uno con su propio módulo de fijación para el producto en movimiento. El diseño tiene las características híbridas de una línea de flujo y múltiples células autónomas. La configuración permite la adición y la eliminación de los proveedores sin afectar el diseño principal. También beneficia el crecimiento y la contracción de las operaciones de los proveedores.²

En este trabajo de grado, se presentará una estrategia de reducción de inventario en proceso de las partes que se ensamblan para formar un vehículo, ensamblaje que está bajo el diseño de una línea “SpineLayout”, basada en un modelo de optimización, que a su vez reduzca el tiempo en que se produce una unidad del

² (2000). Module layouts. En Next generation factory layouts: research challenges and recent progress (pág. 20).

vehículo. Se detalla que las partes, son organizadas por los proveedores en cajas siguiendo un patrón de agrupación que permita reducir los costos de envío hacia las plantas ensambladoras. Dichos costos de envío están sujetos a las restricciones del contrato de fletamento de los proveedores, es decir, el costo de envío puede variar según la cantidad de cajas que se transporten o el espacio que ocupen en el medio de transporte.

1. Planteamiento del problema

En la práctica, una línea de ensamble con diseño “SpineLayout” es abastecida por sub-líneas que entregan ensambles o piezas listas para ser ajustadas al producto que se transporta por la línea central.

Las sub-líneas que están a lo largo de la línea central, tienen un puesto de trabajo definido con los requisitos y herramientas necesarias para realizar una labor específica dentro del proceso productivo. El presente trabajo de grado hace referencia al inventario que se origina en la producción de una unidad, basado en el recorrido que hace una pieza desde que es desempacada en la zona de almacenamiento hasta ser ensamblada al producto central.

Las piezas que se llevan a los diferentes puestos de trabajo ingresan a la empresa en cajas que las agrupan según sus características, es decir, atributos de las piezas como su fragilidad, tamaño, peso, estado de pintura entre otros. Se detalla, que la agrupación de las piezas en las cajas es decisión del proveedor, que normalmente es de índole internacional y que busca reducir los costos en los que incurre al enviar las piezas al país donde se encuentra la línea ensambladora.

Se define la cantidad de productos que se realizarán y así mismo la cantidad de piezas que se necesitan para la fabricación de dichos productos. Los operarios de los puestos de trabajo emiten una orden a los transportadores internos para que sean abastecidos del material (piezas) que utilizarán para la producción, a partir de este momento inicia el proceso de suministro de los puestos de trabajo de inventario. Los transportadores cumplen con llevar las cajas requeridas por el operario, de las cuales se conoce: el tipo de contenido, es decir el tipo de objetos que contiene la caja (llantas, direccionales, entre otros) y la cantidad de objetos presentes en la caja de cada tipo (2 llantas, 4 direccionales, entre otros).

Luego de que el proceso de suministro de material a los puestos de trabajo finalice, el operario debe iniciar con la apertura de las cajas, teniendo en cuenta las ordenes de objetos que demanda la línea principal, y así extraer las piezas necesarias para realizar su labor correspondiente en la línea de sub-ensamble y alistarlas para una posterior unión al producto central.

La situación problema yace en las consecuencias que trae consigo la decisión de abrir las cajas que contienen las piezas que utilizará el operario. En primera medida, la apertura de las cajas obliga al operario a extraer todas las piezas contenidas a su puesto de trabajo y no necesariamente todas se utilizarán en la producción actual, es decir, existirán piezas que incluso deberán esperar para una próxima jornada de producción debido a que el operario no usará la cantidad total que precisa el contenido de la caja en ese momento de tiempo. Por otra parte, el operario cuenta con un espacio definido para realizar su labor en el puesto de trabajo, por tanto extraer piezas sin un patrón de secuencia según la necesidad de la línea central, ocasiona que el espacio de trabajo se sature.

En síntesis, no tener definido en que momento de tiempo se debe abrir una caja con el fin de utilizar las piezas que esta contiene para realizar los respectivos trabajos enfocados a la estructuración del producto central genera inventario de producto en proceso en la línea de ensamble con configuración “SpineLayout”.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar un modelo que defina la apertura de las cajas que contienen los objetos con los que se ensambla una motocicleta, con el fin de reducir el inventario de producto en proceso ocasionado por dichos objetos en los puestos de trabajo.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la estructura y funcionamiento de una línea de ensamble que tiene un diseño SpineLayout, junto con el sistema de abastecimiento de materias primas generado en los puestos de trabajo en el mencionado ambiente de producción.
- Caracterizar los conceptos del sistema logístico CKD en la manipulación de las materias primas dentro del esquema de una línea de ensamble.
- Establecer una relación funcional entre una línea de ensamble que tiene un diseño “SpineLayout” y el sistema logístico CKD, mediante la utilización de variables, parámetros, restricciones y función de desempeño que esquematicen el modelo para la apertura de las cajas que contienen los objetos que forman una motocicleta.
- Validar el modelo diseñado para la apertura de las cajas que contienen objetos para en ensamble de una motocicleta, considerando la efectividad de la articulación de piezas y la reducción del inventario acumulado en los puestos de trabajo.

3. Justificación

El control del inventario de producto en proceso debe ser gestionado con pertinencia para efectuar una productividad deseable por parte de la organización. Las industrias que utilizan *Complete Know Down*, tienen tendencia a acumular inventarios en la producción debido al definido y organizado acceso que tienen a las materias primas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para la empresa que aplica el sistema CKD tiene más valor una pieza que este fuera del almacén de piezas, es decir, que esté en proceso productivo comparado con la pieza que espera por ser requerida, ya que la pieza que se encuentra en el proceso productivo se le están agregando acciones que evidencian una carga adicional de trabajo que no tienen las piezas que están en sus respectivos almacenes.

Por lo anterior, se debe tener un patrón estricto para la utilización de las piezas y de esta manera, evitar el riesgo a la empresa de exponer al peligro objetos que no deben ser ensamblados inmediatamente con el producto principal. Por otra parte, la productividad del procedimiento productivo mejora al reducir el inventario de producto en proceso que va en contra de los atributos de una producción ajustada, evitando que el sistema de producción requiera actividades innecesarias como la búsqueda de objetos y adicionando conceptos que enfatizan un excelente ambiente laboral como la organización y el orden del puesto de trabajo, componentes principales de la herramienta de calidad 5's.

4. Líneas de ensamble

Para dar cumplimiento al primer objetivo del trabajo de grado, se estudia con la pertinencia necesaria el concepto de líneas de ensamble, para luego hacer una caracterización precisa de los componentes importantes que se deben plantear para generar una buena comprensión de la temática abordada.

El suceso de la revolución industrial efectuado en Europa y en Estados Unidos otorgó en una de sus tantas consecuencias una amplia variedad de productos manufacturados en nuevo mercado con rasgos de competitividad. Las personas podían elaborar cada parte de un producto usando sus propias habilidades y herramientas básicas para crear la parte individual, posteriormente ensamblaban las partes individuales al producto final realizando procedimientos de pruebas para verificar la consistencia del ensamble. Los productos concebidos luego de la revolución industrial y a lo largo del siglo XIX requerían una mejora en cuanto al manejo de materiales, maquinaria y ensamble debido a que las características físicas del producto como el volumen, peso entre otros, y el mecanismo de producción, que estaba ligado a una producción en masa proporcionaban condiciones para buscar una efectividad deseada a partir de la implementación de una línea de ensamble.

Una línea de ensamble, es un sistema de producción compuesto por una sucesión de estaciones conectadas por un medio transportador (comúnmente bandas transportadoras o sistemas de arrastre por cadenas), en la cual se realiza un conjunto de tareas aplicadas al producto que recorre cada estación siendo traslado por el medio transportador. Las estaciones de trabajo reúnen una serie de acciones elementales que en conjunto contribuyen a la operación correcta del producto en su recorrido por la línea. El funcionamiento de la línea de ensamble tiene fundamentos de la división de trabajo, que es la fragmentación de una actividad productiva en sus tareas más elementales, buscando la especialización

de los trabajadores en operaciones puntuales de modo que aumente su eficiencia y desarrollo de habilidad³.

El concepto y funcionamiento de la línea de ensamble se ha madurado lo largo de los años en función a las condiciones del producto a manufacturar con el enfoque de mejorar en la efectividad y lograr la tasa de producción deseada. Inicialmente, se debe tener en cuenta las relaciones existentes entre actividades y con el sistema de producción en general, y el tiempo de operación de cada actividad, de esta manera se define una estructura robusta de producción, ligada a una secuencia de procesos que contribuyen a la efectiva realización del producto.

Luego de la revolución industrial, sectores industriales como el textil, vías de ferrocarril, bicicletas, entre otras, implementaron conceptos del manejo de la manipulación de materiales y procedimientos de ensamblaje. Sin embargo fue Henry Ford quien acentuó la práctica de la producción con el mecanismo de la línea de ensamble. Ford, implementó las cintas transportadoras en el sistema productivo de los vehículos Ford modelo T y analizó las estaciones de trabajo ubicando los operarios en actividades precisas, de esta manera el obrero se mantenía fijo mientras el producto se desplazaba a lo largo de la cinta. Según Henry Ford, en su libro “My life and work” los principios del ensamblaje son:

- Ubicar las herramientas y a los hombres en la secuencia de la operación para que el componente de cada parte pueda ser trasladado la menor distancia posible mientras se está en el proceso de terminado.
- Utilizar láminas transportadoras u otra forma de transporte para que cuando un operador complete la operación coloque la pieza o parte siempre en el mismo lugar, este lugar debe ser siempre el más conveniente para su comodidad, y de ser posible tener a la gravedad desplazando la pieza o parte al siguiente operador.

³ 2015. División del trabajo. Revisado (7 de Febrero del 2015) de
<<http://www.economia48.com/spa/d/division-del-trabajo/division-del-trabajo.htm>>

- Utilizar líneas de ensamble transportadoras que permitan que las partes a ser ensambladas sean entregadas a una distancia conveniente.

Según Brahim Rekiek (2006) en *Assembly Line Design* el trazado de la línea de ensamble se debe fundamentar en un diseño lógico y un diseño físico. El diseño lógico busca equilibrar las cargas entre las estaciones asignando recursos a las tareas y tareas a las estaciones. El diseño físico se limita a determinar los requerimientos de espacio en la línea, teniendo en cuenta el almacenamiento temporal de inventario, las propiedades físicas de los materiales, el espacio de la localidad donde se ubican las estaciones entre otros. Para B. Rekiek “el objetivo es reducir al mínimo el coste total de la línea mediante la integración de diseño (espacio, coste, etc.) y problemas de funcionamiento (tiempo de ciclo, la precedencia, la disponibilidad, etc.).

En ese orden de ideas, se introduce el concepto de “Layout” o “diseño” de la línea de ensamble de producción que responde a los requerimientos y disponibilidades que brinda cada sistema productivo en particular. El “Layout” o “diseño” de una operación hace referencia a como los recursos transformados se ubican con respecto a sus semejantes y como se asignan las diversas tareas a dichos recursos⁴.

Tener un diseño formulado equivocadamente genera que los procesos de producción presenten consecuencias negativas como flujo impredecible, colas por estancamiento, baja flexibilidad, entre otros. Y redefinir un “Layout” implementado genera una interrupción de la producción que consume el tiempo de funcionamiento y genera una futura insatisfacción del cliente. Por lo tanto, elaborar un diseño robusto de la línea de producción es una decisión que aunque incurre en costos, se debe hacer minuciosamente para lograr cumplir la efectividad

⁴ Slack, Nigel; Stuart, Chambers y Johnston, Robert. *Operations Management*. Sexta edición. Prentice Hall. Londres, 2010.

esperada. “el diseño debe comenzar con un conocimiento pleno de los objetivos que el diseño debe estar tratando de lograr”⁵.

Los beneficios que trae consigo implementar una línea de ensamble son entre otros:

- División y especialización del trabajo en operaciones básicas.
- Se reducen los tiempos de ocio y no existe la “deambulaci3n” del operario.
- La utilizaci3n de los recursos en los productos de mayor volumen es alta.
- Se planea una mejor utilizaci3n y aprovechamiento del espacio.
- Estandarizaci3n de los procesos.

Las característic3s que representan una lÍnea de ensamble la clasifican dentro de los sistemas de producci3n en lÍnea.

Los sistemas de producci3n en lÍnea se caracterizan por el seguimiento del producto entre puestos de trabajo que añaden operaciones de principio a final, dichos productos son homogéneos entre ellos por lo tanto se pueden utilizar las mismas instalaciones y recursos. Por lo regular, son sistemas estandarizados que contribuyen a la producci3n en masa y a una reducida flexibilidad. En la literatura, se encuentra que los sistemas de producci3n en lÍnea pueden estar regulados por equipos o por operarios. En el primer caso, se tiene un sistema productivo con alto grado de automatizaci3n lo que a la vez genera poca flexibilidad en el sistema, ideal para altos volúmenes de producci3n. En el caso de estar regulado por operarios, se genera un mayor grado de flexibilidad con respecto al caso anterior debido a que el trabajo lo define el operario, sin embargo se reduce el volumen de producci3n con respecto al regulado por equipos por contemplaciones de fatiga y cansancio por las actividades. No obstante, se puede realizar una combinaci3n de ambos sistemas en funci3n de los objetivos de producci3n y teniendo en cuenta las restricciones y condiciones de la planta productiva y del producto a fabricar.

⁵ Slack, Nigel; Stuart, Chambers y Johnston, Robert. Operations Management. Sexta edici3n. Prentice Hall. Londres, 2010.

4.1 Caracterización de las líneas de ensamble – “Diseño” o “Layout”.

El “Layout” de un sistema de producción define la ubicación física en la cual se disponen los recursos que se utilizarán para la manipulación y elaboración del producto, involucrando personal de operación, maquinaria, materiales y demás instalaciones. La estructura del “Layout” determina el flujo durante la operación, y un cambio relativamente pequeño en los materiales del supermercado o la ubicación de una máquina en una fábrica, pueden afectar el flujo, lo que a su vez afecta los costos y la eficacia de la operación⁶.

Si bien, la estructura del “Layout” debe de estar alineada a los objetivos estratégicos de cada sistema de producción dependiendo la organización, existen algunos beneficios y estándares que los “Layout” ofrecen en cualquier ambiente productivo. En el libro Operations management, encontramos los siguientes:

- Seguridad inherente: Todos los procesos que puedan constituir un peligro para el personal o los clientes no deben ser accesibles por personal no autorizado.
- Longitud de flujo: El flujo de materiales, información o clientes debe ser apropiado por la operación. Esto generalmente, significa minimizar la distancia recorrida por los recursos transformados. Sin embargo, no siempre ocurre de esta manera, como por ejemplo en los supermercados.
- Claridad del flujo: Todo el flujo de materiales y clientes debe de estar correctamente señalado con propiedades evidentes para el personal de la organización y los clientes.
- Condiciones de los funcionarios: El personal debe de estar situado lejos de los sectores de la producción ruidosos, desagradables o que afecten de manera perjudicial a su salud e integridad.

⁶ Slack, Nigel; Stuart, Chambers y Johnston, Robert. Operations Management. Sexta edición. Prentice Hall. Londres, 2010.

- Management coordination: La supervisión y comunicación deben ser asistidos por la ubicación del personal mediante dispositivos de comunicación.
- Acceso: Todas las máquinas e instalaciones deben poder ser accesibles para realizar la correspondiente limpieza y mantenimiento.
- Uso del espacio: Todos los diseños deben utilizar el espacio de manera apropiada. Esto generalmente significa minimizar el espacio utilizado, pero a veces puede significar lograr una impresión de espacio ostentoso, como en el vestíbulo de la entrada de un hotel de primera clase.
- Flexibilidad a largo plazo: Los diseños necesitan ser cambiados periódicamente. Un buen diseño se ha formulado teniendo en cuenta las posibles necesidades futuras que puede presentar el sistema de producción.

No obstante, el diseño de una línea de manufactura de una organización sucumbe a como se involucran los equipos, espacios disponibles y mecanismos de producción particulares para la correcta elaboración de cada producto. Por ejemplo, (Stevenson, 2007) asigna la tecnología como un aspecto clave de los procesos productivos incrementando la productividad, la calidad y reduciendo los costos, el autor define la tecnología como “la aplicación de los descubrimientos científicos en el desarrollo y mejora de productos y servicios de las operaciones”, incluso detalla que la innovación tecnológica hace referencia al “descubrimiento y desarrollo de productos nuevos o mejorados, servicios o procesos para la producción o prestación de ellos”. Lo anterior permite pensar, que en la conformación del diseño de una línea de producción deben tenerse en cuenta los equipos y actividades tecnológicas benefactoras del proceso, aspectos como la ubicación, facilidad y flexibilidad para este tipo de herramientas deben ser criterios importantes para su asignación dentro de la línea de producción, y de esta manera consagrar un producto de excelentes condiciones. Un factor importante para la decisión del diseño, está relacionado con las instalaciones del lugar, el factor

edificio. La disponibilidad del espacio para ubicar la línea con sus respectivos centros de trabajo y efectuar junto con esto comodidad para que el personal de planta realice sus operaciones es una connotación que se debe tener en cuenta para la estructura del diseño productivo. En primera instancia, el espacio que utiliza la línea de ensamble debe garantizar que la efectividad del proceso productivo no disminuya, es decir, las localidades no deben interrumpir con el flujo deseado por la implementación de la línea por ejemplo, el área de producto terminado debe tener ruta accesible desde la finalización de la línea de producción y la bodega de materias primas debe tener conectividad con gran margen de practicidad (rutas de acceso, caminos seguros, cortos movimientos) con los centros de trabajo.

Adicional a los dos componentes explicados anteriormente, existen diversos factores involucrados al proceso productivo (recursos, flexibilidad entre otros) que deben ser tomados en cuenta para la decisión de estructurar el diseño y de esta manera lograr tasas de producción deseadas y la reducción de mudas⁷ que son perjudiciales para un eficiente y cómodo ambiente de producción.

El Layout de un sistema de producción está influenciado por el tipo de proceso que tiene la organización y los atributos que se explicaron con antelación. A continuación, se presentan un conjunto de diseños básicos relacionados con los enfoques generales de las organizaciones, sin embargo es importante resaltar que un tipo de proceso no restringe necesariamente que se deba utilizar un único diseño estandarizado.

⁷ Muda: Cualquier actividad que consume recursos, pero no crea valor para el cliente. (2015).Muda. Revisado (18 de febrero de 2015) de <http://www.manufacturingterms.com/Spanish/Muda.html>

- Diseño fijo-posición:

Disposición en la que el producto o proyecto se mantiene estacionario, y los operarios, materiales y equipos se mueven según sea necesario⁸. Lo anterior, puede generarse regularmente cuando el producto es tiene un tamaño pronunciado o un nivel alto de delicadeza para ser desplazado, como en la elaboración de un barco naval.

- Diseño por producto:

En este diseño se pueden apreciar una secuencia de operaciones estandarizadas que evidencian un flujo fácil de controlar. Cada producto, sigue una ruta preestablecida en la que el orden de las actividades que se requieren para conformar el producto coincide con la secuencia en que se han localizado los procesos⁹. El diseño por producto se puede apreciar en algunas ensambladoras automovilísticas o en el servicio de la solicitud de un préstamo.

- Diseño por células:

En esta disposición se busca que las máquinas se agrupen conformando una “célula” para procesar recursos que tienen requisitos de producción similares¹⁰, de esta manera se satisfacen de inmediato las necesidades de procesamiento de cada recurso, para luego continuar con la elaboración del producto en otra célula con otro particular grupo de atributos. Este tipo de diseño se puede apreciar en la unidad de maternidad de un hospital o en un ensamble de computadores portátiles.

⁸ Stevenson, William J. Operations Management. Novena edición. The McGraw-Hill Companies. New York, 2007.

⁹ Slack, Nigel; Stuart, Chambers y Johnston, Robert. Operations Management. Sexta edición. Prentice Hall. Londres, 2010.

¹⁰ Stevenson, William J. Operations Management. Novena edición. The McGraw-Hill Companies. New York, 2007.

- Diseño funcional:

(Nigel, 2010) expresa que este diseño se ajusta a las necesidades y comodidad de las funciones realizadas por los recursos dentro del proceso de transformación. Por lo tanto, la ruta o flujo será determinada de acuerdo a las necesidades que resulten particulares en cada caso al tener productos diferentes lo que ocasiona tener rutas diferentes. Este efecto puede apreciarse en un supermercado o en un centro hospitalario.

En la literatura, no se limita la posibilidad de tener un diseño híbrido que combine elementos de los diseños básicos expuestos anteriormente o se utilizan los diseños básicos en diferentes partes de un solo sistema de producción, por ejemplo un centro hospitalario podría tener un diseño funcional pero en áreas como el laboratorio utilizar un diseño por producto.

Algunos autores proponen algunas tendencias emergentes en la industria que contemplan modificaciones o acentuaciones a los diseños vistos anteriormente. En muchas industrias, proveedores externos se involucran más la mayor parte de la fabricación del producto. Junto con las entregas justo a tiempo, se han reconfigurado las instalaciones de ensamblaje final para permitir la vinculación más cercana entre los proveedores y fabricantes.

Por ejemplo, muchas de las plantas de montaje de automóviles están permitiendo a los proveedores entregar componentes directamente al punto de uso en la línea de montaje final. Esta situación propone generar el diseño de múltiples muelles de carga y puntos de entrega de inventario múltiple en toda la fábrica.

Para apoyar las plantas modulares, los sistemas de producción están siendo diseñados utilizando el concepto de **“Spine Layout”** (véase la Figura 2), donde el producto se mueve a lo largo de una arteria principal, o la columna vertebral, a través de la planta. Vinculado a la columna vertebral existen líneas de mini-montaje propiedad de los proveedores (o bien, hacen parte de las materias primas

adquiridas desde bodega), cada línea tiene su propio módulo de trabajo conectado al producto en movimiento. La disposición tiene las características híbridas de tanto una línea de flujo y múltiples células autónomas. La configuración permite la adición y eliminación de proveedores sin afectar el diseño principal.¹¹

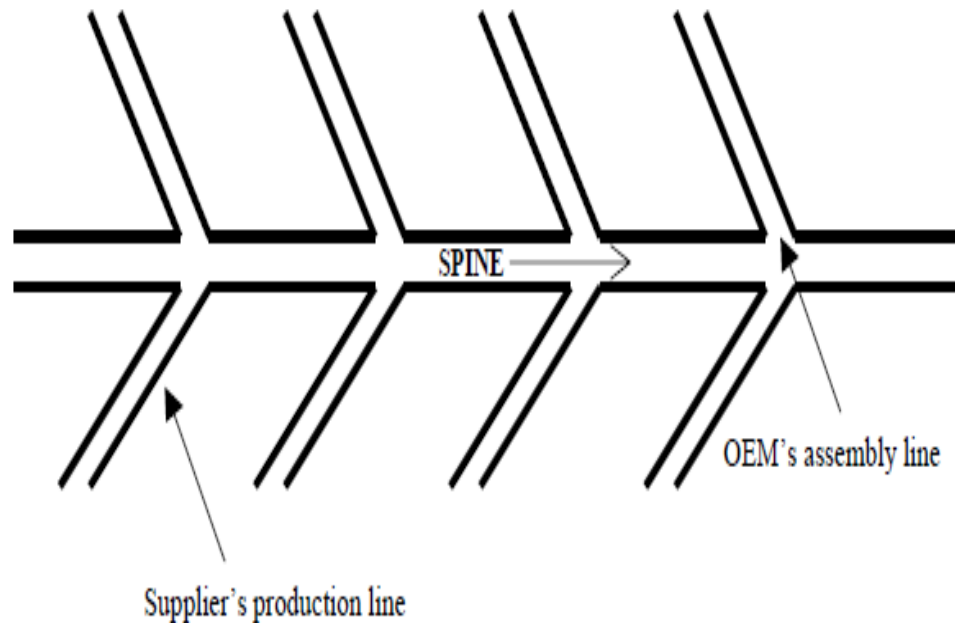


Figura 1. “Spine Layout” para plantas modulares.

Fuente: 2000). Module layouts. En Next generation factory layouts: research challenges and recent progress (pág. 21).

¹¹ (2000). Module layouts. En Next generation factory layouts: research challenges and recent progress (pág. 20).

5. Sistema de abastecimiento interno

En el siguiente apartado, se evidencia una caracterización de los mecanismos de abastecimiento interno que se utilizan en las líneas de producción según los atributos y propiedades intrínsecas de cada ambiente productivo, con el fin de dar cumplimiento a la meta establecida en el primer objetivo.

El sistema de abastecimiento interno hace referencia a los procedimientos que realiza la organización a lo largo de la cadena de suministro para proveer a las diferentes estaciones de trabajo los requerimientos necesarios.

En el presente capítulo, se presenta un enfoque en el sistema de abastecimiento que se origina propiamente hacia las estaciones de trabajo en el área de producción, es decir, se extrae la interrelación que existe entre las áreas de producción y Almacén de materias primas (Bodega y funciones de compras) y se aplica los componentes teóricos revisados en la investigación. Lo anterior se hace con el fin de limitar el estudio al sector que es relevante para el conocimiento y directriz del desarrollo de la tesis y no indagar en temáticas que si bien hacen parte del concepto abordado (abastecimiento en bodega, inventarios, operaciones de almacenamiento) se salen del esquema de aportes significativos para investigación, discusión y desarrollo del trabajo en cuestión.

Los componentes del sistema de abastecimiento interno se revisan en la literatura desde los conceptos del manejo de materiales, que proporcionan información destacada para entender el funcionamiento y demás atributos del sistema de abastecimiento interno. Según el Instituto de Manejo de Material (MHI, por sus siglas en inglés) “el manejo de material comprende todas las operaciones básicas relacionadas con el movimiento de los productos a granel, empacados y unitarios, en estado semisólido o sólido por medio de maquinaria, y dentro de los límites de un lugar de comercio”. De nuevo se resalta, que la definición distingue mover los materiales hasta los lugares de comercio o hasta los clientes, pero por razones

explicadas anteriormente en este proyecto, no se desarrolla la investigación en el marco completo del concepto. Se detalla además, que la definición del *MHI* señala la utilización de la maquinaria, esto es debido a que la mano de obra es más costosa con respecto a la utilización de equipos y los seres humanos ejerciendo esta labor de manera continua pasan a no ser eficientes.

El manejo de materiales es uno de los componentes básicos de la fabricación, su automatización es particularmente importante, ya que proporciona los beneficios significativos de acortar los ciclos de vida y aumentar la productividad. Por lo tanto, es una buena estrategia para mejorar la flexibilidad de la producción.¹²

Como se enunció anteriormente, en el manejo de materiales las máquinas son favorecidas en tema de costos con respecto a las personas, sin embargo aún en las fábricas más avanzadas no se ha logrado sustituir la totalidad de las personas por la automatización, ya que las personas añaden flexibilidad a los procesos, son mejores en la percepción de patrones, improvisa en movimientos y procedimientos cuando se produce congestión, razonan con pericia e inducción para evitar estancamientos y cuellos de botella, y pueden determinar prioridad y planes de acción en las actividades críticas (Sheridan, 2000).

Un operario realiza tareas cognitivas (Supervisión, planificación, toma de decisiones, etc.) y tareas físicas (carga y descarga de materiales) (Rasmussen, 1983). Un operario tiene limitaciones en el procesamiento de la información por lo que puede fácilmente cometer errores en las tareas cognitivas, además tener información inadecuada genera que se operen controles inadecuadamente (Oborski, 2004).

En ese orden de ideas, la presentación de una información relevante en el sistema de manejo de materiales es una forma eficaz de mejorar el rendimiento del mismo

¹² (2015) Effect of cognitive automation in a material handling system on manufacturing flexibility. Revisado (21 de Febrero del 2015) de <http://www.sciencedirect.com.bd.univalle.edu.co/science/article/pii/S0925527315000304>

sistema, ya que se reduce el tiempo de inactividad y el tiempo de ciclo, lo que resulta en una mayor flexibilidad en el manejo de materiales.

A partir de décadas de experiencia se han condensado 10 principios, que son afirmaciones concisas de los fundamentos de la práctica de manejo de materiales adoptados por el College-Industry Council of Material Handling Education (CIC-MHE). Los principios son los siguientes.

- El principio de la planificación.
- El principio de la estandarización.
- El principio del trabajo.
- El principio ergonómico.
- El principio de la carga unitaria.
- La utilización del espacio.
- El principio del sistema.
- El principio de la automatización.
- El principio ambiental.
- El principio del costo del ciclo de vida.¹³

Es importante dedicar especial atención al principio de la carga unitaria debido a su relevancia en el desarrollo del presente trabajo de investigación. Una carga unitaria se define como el número de objetos dispuesto de forma que pueden ser manejados como un solo objeto. Esto se puede hacer mediante el uso de tarimas, de cargas unitarias y de contenedores (también llamados “tarimización”, “unitización” y “contenedorización”).¹⁴

El tamaño y componentes de la carga unitaria afectan la operación del sistema de abastecimiento en la línea de producción. Una carga unitaria grande con amplia

¹³ Tompkins, James; White, John; Bozer, Yavuz y Tanchoco, J.M.A. Planeación de instalaciones. Tercera edición. International Thomson Editores. México, 2006.

¹⁴ Dileep, Sule. Instalaciones de Manufactura: Ubicación, planeación y diseño. Segunda edición. International Thomson Editores. México, 2001.

cantidad de artículos, genera un incremento en inventario de producto en proceso ya que la caja debe ocupar toda su capacidad con los artículos, sin embargo reduce la cantidad de movimientos de transporte de los artículos, debido a que en un mismo viaje puede saldar varios pedidos. Por otra parte, una carga unitaria pequeña aumenta los movimientos realizados de transporte debido a la capacidad limitada que puede movilizar, sin embargo reduce el inventario de producto en proceso, aumenta la flexibilidad, promueve la simplicidad en los métodos de transporte e impulsa el concepto de las entregas para una producción justo a tiempo en cada requerimiento.

Los sistemas de manejo de materiales se pueden clasificar en 4 tipos de sistema generales:

- Orientado al equipo: representa los sistemas que definen el flujo conforme al equipo de producción. Generalmente utilizados para materiales con atributos de gran peso y tamaño en los que es necesario una grúa, o equipos móviles.
- Orientado al material: en este tipo de sistema, las características del material definen el equipo a utilizar. Utilizado en líquidos, granel o para casos en los que el material atente contra la seguridad del personal.
- Orientado al método: se planea el sistema en función al método de producción de la organización: manual, mecánica, producción masiva, por órdenes de trabajo o automatizada.
- Orientado a la función, en este sistema, se realiza una clasificación de acuerdo al equipo y su funcionalidad: sistemas de transporte (movimiento horizontal), sistema de elevación (movimiento vertical), sistema de conveyors (horizontal o por gravedad), sistema de transferencia (uso de aire con ruta fija), sistema de ruta fija (AGV).¹⁵

¹⁵ (2015). Sistema de manejo de materiales. Revisado (1 de Marzo del 2015) de <https://facilidadesfisicas.files.wordpress.com/2008/08/manejo-de-materiales3.pdf>

El sistema de manejo de materiales por lo general no es un proceso que agregue valor al producto, pero la utilidad del tiempo y lugar sí contribuyen al mejoramiento real del valor real del producto.¹⁶ Es decir, la cantidad correcta de material transportada en el orden y condiciones correctos, con los equipos orientados y posicionados adecuadamente y demás términos como la seguridad y calidad del sistema proponen un sistema esbelto en su funcionamiento que en conjunto mejoran la efectividad del sistema y la conformidad del producto.

En la actualidad, los sistemas de abastecimiento interno están en la propuesta de ajustarse a las características propias de cada sistema productivo. Toyota, desarrolló un sistema para manejar el flujo de materiales en su línea de ensamble; Kanban, es un dispositivo de dirección automático, que nos da información acerca de que se va a producir, en que cantidad, mediante qué medios y como transportarlo¹⁷. Este sistema evidencia su efectividad en ambientes Lean Manufacturing que en conjunto de sistemas como el Just in Time priorizan una producción esbelta en la planta. El Kanban facilita las mejoras de los procesos, optimizando las actividades operativas, reduciendo tiempos innecesarios dentro de ellas, mecanizando procedimientos, eliminando desperdicios y en efecto, reduciendo el inventario en proceso, debido a que existe un control automatizado sobre el material que realmente se requiere en la línea de producción.

Por otra parte, el Cross Docking es un sistema de distribución que en general se aplica en las empresas logísticas que almacenan y reparten productos, sin embargo el concepto tiene cabida e implementación en una línea de producción de un ambiente de manufactura si las condiciones son amigables.

Cross Docking, es un sistema de distribución donde las unidades logísticas son recibidas en una plataforma de alistamiento y no son almacenadas si no

¹⁶ (2015). Manejo de materiales. Revisado (3 de Marzo del 2015) de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7805/Capitulo4.pdf>

¹⁷ (2015) Kanban: control y mejora de procesos. Revisado (4 de Marzo del 2015) de <http://www.visionindustrial.com.mx/industria/operacion-industrial/kanban-control-y-mejora-de-procesos.html>

preparadas para ser enviadas¹⁸. Esta estrategia, fue concebida con el fin de agilizar los procedimientos que se llevan a cabo en un almacén o bodega en el momento que se ejecuta una demanda específica de productos. Según el comportamiento de las demandas, se pueden consolidar varios productos y ubicarlos estratégicamente con el fin de reducir el tiempo de alistamiento y despacho del pedido. Es importante detallar, que el concepto tiene validez si las características del ambiente realmente lo ameritan, ya que no sería eficaz aplicar el sistema conociendo que los productos obligatoriamente deben pasar tiempo en la bodega (no tienen alta rotación).

En una empresa de manufactura, se presentan condiciones en las que la implementación del Cross Docking mejora los procesos de abastecimiento de materiales. Por ejemplo, la recepción consolidación y envío de materias primas o partes hacia la planta¹⁹, son procesos que una línea de ensamble percibe cuando las partes a suministrar requieren especial cuidado y no pueden ser almacenadas debido al riesgo y costo en el que se incurre, por tanto se realiza una consolidación con los atributos faltantes e inmediatamente se le atribuye a la línea para ser ensamblado con el producto principal.

Existen otros sistemas de abastecimiento que están enfocados en la organización de las materias primas o partes que se utilizarán en las operaciones de la producción, particularmente se relacionan con el objeto que consolida las partes (cajas, contenedores, entre otros) y la configuración del mismo. Por ejemplo, se SKU (Stock-keeping unit) es una identificación, por lo general alfanumérico, de un producto en particular, que le permite realizar un seguimiento para fines de

¹⁸ (2015) ¿Qué es el Cross Docking? Revisado (4 de Marzo del 2015) de <http://www.expertoslogistica.com.ar/que-es-el-cross-docking/>

¹⁹ (2015). Cross Docking. Revisado (4 de Marzo del 2015) de <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/log%C3%ADstica/cross-docking/>

inventario²⁰, el mismo proceso se puede aplicar con cajas que consoliden los productos y de esta manera tener identificado un conjunto de productos necesarios en esa organización para los requerimientos de la línea de producción. Existe además, el sistema logístico CKD (Complete Knock Down) que evidencia un conjunto de productos dispuestos por el proveedor para optimizar espacio (en los envíos) y que facilitan su manipulación en la línea de ensamble que los requiere. Este último sistema (CKD), será detallado con la precisión pertinente en el siguiente capítulo.

6. Sistema logístico CKD (Complete Knock Down)

La caracterización del sistema logístico CKD es relevante para el desarrollo del proyecto, ya que su funcionalidad dentro del esquema del problema debe ser detallada para que no existan ambigüedades que puedan dificultar el proceso de entendimiento. De esta manera, se procede a cumplir con efectividad el segundo objetivo específico del presente trabajo de grado.

CKD (Complete Knock Down = Desmontado completo) Es un programa de envío de componentes de automoción de determinados modelos de vehículos, desde la planta de fabricación de dichos automóviles a otra planta ubicada en un país distinto donde se procederá al ensamblaje de los mismos²¹. La definición es pertinente por hacer referencia al proceso de ensamblaje que se evidencia en la industria automotriz, campo en el que se esquematiza el problema planteado. Sin embargo, es válido resaltar que el sistema CKD, se utiliza debido a sus beneficios en centros de atención hospitalaria, organizaciones ferroviarias y aeronáuticas.

El CKD, es una iniciativa que surge en el sector automovilístico por evitar el pago de las altas tasas de impuestos en que se incurría por exportar un producto

²⁰ (2015). SKU (Stock-keeping unit). Revisado (4 de Marzo del 2015) de <http://searchmanufacturingerp.techtarget.com/definition/SKU-stockkeeping-unit>

²¹ (2015) CKD Y SKD. Revisado (8 de Marzo del 2015) de <http://www.logismarket.es/grupo-interpack/ckd-y-sk/1631517254-16696664-p.html>

terminado. Los altos directivos de las matrices plantearon el envío de piezas para el posterior ensamblaje en estos lugares, de manera que además se contribuía a desarrollar la economía local, generando industrias y nuevos puestos de trabajo, y asegurando una oferta más accesible al consumidor de estos lugares. El ahorro de costes, entre otros factores, procede de la reducción de aranceles, condiciones del fletamento, la mano de obra más barata y la optimización del transporte hasta en un 50%²².

Los proveedores decidieron diseñar sus envíos de tal manera que se redujeran los costos de exportación, conformando Kits de ensamble con materias primas propias de la casa matriz esperando por ser articulados al producto final en el país en donde se realiza el proceso de ensamblaje. El sistema es exitoso en cuanto a que se reducen los precios al pagar por transitar cajas con dimensión y peso corto en comparación al tránsito de un vehículo (o varios) y las plantas de ensamblaje receptoras, mecanizan un procedimiento de abastecer los puestos de trabajo de la línea principal organizado.

En su manuscrito (Borja, 2014) expresa que “En el abastecimiento de materiales CKD al igual que otro material es muy importante controlar el inventario ya que hay aspectos además del costo que considerar tales como el espacio físico, medios de almacenamiento y de transporte, disponibilidad de material y fragilidad del mismo, etc.”. Entre los beneficios que se obtiene al mantener controlado los inventarios en el abastecimiento de material CKD se puede citar:

- Evitar daños y pérdida de material ocasionado por sobre stock en la línea.
- Identificar artículos con defectos y darle trazabilidad requerida para el respectivo reclamo a la fuente.

²² (2015). La travesía de un automóvil: Embalaje de CKD. Revisado (8 de Marzo del 2015) de <http://tecnicarton.com/la-travesia-de-un-automovil-embalaje-de-ckd/>

- Evitar diferencias entre inventario físico y registros contables.²³

Ahora bien, es importante detallar que el proyecto de grado se fundamenta en la definición del momento de apertura de las cajas que tienen el material con características CKD. Los proveedores no solo envían kits desmontados con facilidad de articulación al producto final, además pueden ocupar una caja con diversas materias primas o partes completas que son directamente ensambladas al producto terminado y no necesariamente en el mismo instante de tiempo. Es decir, con el objetivo de reducir costos de envío un proveedor puede cargar una caja con diferentes elementos que componen el vehículo o producto final (retrovisores y direccionales, visita a ensambladora de motocicletas), los elementos no necesariamente deben tener relación entre sí, ni tampoco deben utilizarse en el mismo tiempo en la línea de producción principal.

Dicha organización de elementos se planea únicamente con el fin lograr completar de manera equidistante la capacidad del contenedor de transporte, garantizando consistencia de la caja y evitando sobrecostos por envío de cajas que no se les completa su capacidad.

Es importante resaltar, que el negocio de los fletes ofrece tarifas de pago de acuerdo a las dimensiones y peso de los contenedores que transporta, por tanto se debe optimizar el espacio de tal manera que se puedan agrupar la mayor cantidad de elementos posibles sin afectar la ergonomía y calidad de los mismos.

En las líneas de ensamble “SpineLayout” o espina de pescado es común visualizar el procedimiento de abastecimiento de material CKD, ya que en principio los kits de ensamble facilitan la articulación al producto final, además de reducir los tiempos de preparación en los puestos de trabajo y acentúan dispositivos Poka

²³ Borja, Rocio Mariana (2014). Implementación de un sistema de abastecimiento de materiales CKD (Completely Knocked Down) en la línea de ensamble de vehículos de la empresa MARESA. (Tesis de Postgrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Yoke²⁴ debido a que las partes son suministradas por la casa matriz con las respectivas precisiones para el ensamblaje.

Por otra parte, tener varios elementos o partes involucradas en el proceso de producción, en una misma caja permite que al abrir y desempacar su contenido se pueda abastecer varios puestos de trabajo a lo largo de la línea de ensamble, lo anterior agiliza el abastecimiento de materiales ya que la agrupación de elementos restringe el hecho de no abrir tantas cajas como componentes se necesitan.

Adicionalmente, los espacios de almacenamiento no se inclinan hacia la saturación debido a que la organización del material a utilizar en la producción en cajas agrupadas proporciona la ocupación del mínimo espacio posible y existencia de orden. Sin embargo, si no existe un control de la apertura de cajas en este tipo de líneas de producción (Líneas de ensamble) se puede efectuar una acumulación de material que aún espera por ser articulado. Lo anterior ocurre por asignaciones propias de este tipo de industria, en donde el operario debe extraer el material por completo contenido en la caja luego de que esta sea abierta preservando la calidad del material y garantizando su trazabilidad, sin tener irregularidades al encontrar una caja parcialmente ocupada o con elementos sobrantes.

²⁴ Dispositivo que ayuda a evitar errores. (2015) POKA YOKE. Revisado (8 de Marzo del 2015) de <http://www.leanroots.com/poka-yoke.html>

7. Sistema logístico CKD implementado en una línea de ensamble “SpineLayout”

Con el fin de dar cumplimiento al tercer objetivo específico del presente trabajo de grado, se evidencia el funcionamiento y complejidad de prácticas generales reales en las que se aprecia la apertura de cajas CKD para utilizar su contenido en un ambiente productivo enmarcado por una línea de ensamble “SpineLayout”.

El procedimiento de abastecimiento en este tipo de organizaciones se efectúa según la demanda de los puestos de trabajo, es decir, cada puesto de trabajo envía una orden de demanda que debe ser suplida sin importar el orden o secuencia en que se encuentren a lo largo de la línea de producción. Por lo tanto, el operario encargado del abastecimiento de materiales, debe suministrar el pedido en su totalidad para que el puesto de trabajo no tenga que detener sus funciones y a su vez, la línea de ensamble no presente esperas por kits a ensamblar.

Es importante detallar que la línea de ensamble “SpineLayout” permite flexibilidad en cuanto al manejo de materiales, es decir, si un puesto de trabajo requiere mayor reposición de materiales con respecto al resto, el personal se enfocará en ese cuello de botella para no permitir consideraciones mayores que afecten el tiempo de ciclo de la línea. El diseño de la línea, ajusta los tiempos de producción de cada puesto de trabajo de tal manera que se esquematice un sistema esbelto y bajo el concepto de una filosofía justo a tiempo²⁵, lo cual provoca que el vehículo (producto principal) aborde cada estación de trabajo en el momento de tiempo preciso para que se pueda ensamblar el kit elaborado en dicha estación.

En el área de producción se condiciona un espacio para el desempaque de las cajas que contienen el material CKD, es una mesa de trabajo en donde los

²⁵ Justo a tiempo, Se trata de entregar materias primas o componentes a la línea de fabricación de forma que lleguen “justo a tiempo” a medida que son necesarios.
(2015). Justo a tiempo (JIT). Revisado (9 de Marzo del 2015) de
http://www.ub.edu/gidea/recursos/casseat/JIT_concepte_carac.pdf

operarios extraen el contenido total de la caja y proceden a realizar inspecciones de calidad para verificar la consistencia y funcionalidad del material. En algunos casos, se realizan actividades de pre montaje con estos materiales antes de enviar el kit final a la estación de trabajo. Finalmente, los operarios cargan el material en mesas transportadoras y abastecen en función al puesto de trabajo más cercano las respectivas estaciones de la línea de ensamble que demandaron objetos.

Se distingue que en este tipo de organizaciones por lo general el material se acumula en los puestos de trabajo de la línea de ensamble “SpineLayout”, esto es debido a que los operarios de las diferentes estaciones de trabajo realizan pedidos con el fin de tener kits de ensamble por articular adicionales y no detener la línea principal con el argumento de la espera por la llegada del material. Los operarios que abastecen el material CKD cumplen los requerimientos de la demanda, pero como se mencionó anteriormente, en una caja pueden existir múltiples ítems que deben ser ensamblados en momentos de tiempo diferentes al producto principal, por tanto se efectúa un inventario acumulado de materiales en los puestos de trabajo, materiales que están a la espera de ser ensamblados al producto principal.

Ahora bien, es lógico pensar que tener inventario acumulado en los puestos de trabajo genera un riesgo para el material, que puede ser afectado al no estar en condiciones seguras, que se cumplen dentro de la planta únicamente en su respectiva caja con características pertinentes. Además, la saturación de la estación de trabajo por el material acumulado esperando por ser articulado al producto principal es un problema que afecta la libertad del personal para realizar las operaciones pertinentes con condiciones de seguridad y comodidad en su espacio de trabajo. Por otra parte, el esfuerzo por abrir cajas que no contienen objetos que deben ser ensamblados al producto principal en momentos de tiempo cercanos y no tener una programación de apertura para distribuir los recursos disponibles para la apertura las cajas, direcciona a un posible estancamiento en la secuencia de producción de la línea principal por la falta de material necesario.

8. Desarrollo del modelo

Inicialmente, se presenta la caracterización del modelo de optimización, identificando y definiendo parámetros, variables, restricciones, funciones objetivos y supuestos, que contempla el modelo y conllevan a una solución óptima al problema propuesto.

Supuestos:

- Se define un tiempo discreto.
- Se asume un conocido Lead time de apertura de las cajas, que es el tiempo en el cual la persona encargada desempaca, cuenta y revisa las piezas para posteriormente realizar su respectiva entrega.

Parámetros:

R_{jt} : Requerimiento de la parte j en el periodo t , en unidades

El requerimiento hace referencia a la demanda de un objeto o parte para el conformado del producto de la línea de ensamble, es decir, la cantidad de piezas que necesita en un momento de tiempo para cumplir con el proceso de producción.

P_j : Ponderador de la parte j (volumen de cada objeto)

El parámetro ponderador P_j se define debido a la existencia de objetos con características físicas diferentes. En el desarrollo del modelo se utilizará el volumen como atributo de cada objeto, lo que quiere decir, que el modelo identifica cada objeto según el volumen que lo representa.

C_{ij} : Contenido o número de partes j presentes en la caja i

El anterior parámetro identifica la cantidad de objetos que están agrupados en una caja CKD. En la industria, esta información se conoce, ya que el proveedor le suministra y evidencia a la empresa ensambladora el orden y estructura de agrupación de los objetos en cada caja para que se conserve la trazabilidad del producto.

Variables:

$$XS_{it} \begin{cases} 1: \text{Si se inicia con el desempaque de la caja } i \text{ en el tiempo } t \\ 0: \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$; i: 1 \dots m \text{ cajas}$ Ecuación 1

XS_{it} es una variable binaria que toma valor de 1 si se decide abrir la caja en el periodo de tiempo t , ó 0 de lo contrario.

$$X_{itk} \begin{cases} 1: \text{Si la caja } i \text{ se está desempacando (abierta) en el periodo } t \text{ en el muelle } k \\ 0: \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$; i: 1 \dots m \text{ cajas}$ Ecuación 2

X_{itk} es una variable binaria que toma valor de 1 si la caja i se está desempacando en el periodo t en el muelle k , o 0 de lo contrario. Se resalta, que el tiempo de desempaque o el tiempo en que una caja permanece abierta es el Lead Time de cada caja.

I_{jt} : Inventario del objeto j en el periodo t

$$; \quad \begin{matrix} j: 1 \dots n \text{ objetos} \\ t: 1 \dots T \text{ periodos de tiempo} \end{matrix} \quad \text{Ecuación 3}$$

$I_{j,t}$ es una variable que define el inventario del objeto j en el periodo de tiempo t .

$$IC_{ijt}: \text{Cantidad de piezas del objeto } j \text{ aportado por la apertura de la caja } i \text{ en el periodo } t \quad ;$$

$$\begin{matrix} i: 1 \dots m \text{ cajas} & j: 1 \dots n \text{ objetos} \\ t: 1 \dots T \text{ periodos de tiempo} \end{matrix} \quad \text{Ecuación 4}$$

$IC_{i,j,t}$ es una variable que define la cantidad de piezas del objeto j , extraído específicamente de la caja i , en el periodo de tiempo t .

$$Y_{ik} \begin{cases} 1: \text{Si la caja } i \text{ se esta desempacando en el muelle } k \\ 0: \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$$; i: 1 \dots m \text{ cajas} \quad k: 1 \dots p \text{ muelles} \quad \text{Ecuación 5}$$

Y_{ik} es una variable binaria que toma el valor de 1 si la caja i se desempa en el muelle k , o 0 de lo contrario.

Restricciones:

$$\sum_{t=1}^T XS_{it} \leq 1 \quad \forall i: 1 \dots m \quad \text{Ecuación 6}$$

La *Ecuación 6* es una restricción que garantiza que en el horizonte de planeación la apertura de una caja inicie solo una vez. Además, la desigualdad permite que el

modelo inicie la apertura de las cajas de las cuales requiera su contenido, por tanto no debe abrir todas las cajas si no es necesario.

$$I_{jt} = 0 \quad \forall j, t = 1 \quad t: 1 \dots T \text{ y } j: 1 \dots n \quad \text{Ecuación 7}$$

La *Ecuación 7* limita a que en el periodo $t=1$ no se debe presentar inventario de cualquier objeto j , es decir, no existe inventario al inicio del proceso productivo.

$$IC_{ijt} = C_{ij} * XS_{i(t-LTi)}; \quad \forall i, j, t > LT_i; \quad i: 1 \dots m \quad j: 1 \dots n \quad t: 1 \dots T \quad \text{Ecuación 8}$$

La cantidad de piezas del objeto j aportadas por la apertura de la caja i en los periodos $t > LT$, está formado por el material que se desempaca en el periodo t proveniente de la caja i , designado por la razón matemática (variable binaria) de variable de la apertura de la caja en cuestión. Se resalta que la variable binaria $XS_{i(t-LTi)}$ contempla el Lead Time de la misma caja para que la orden de producción se cumpla.

$$IC_{ijt} = 0; \quad \forall i, j, t \leq LT_i; \quad i: 1 \dots m \quad j: 1 \dots n \quad t: 1 \dots T \quad \text{Ecuación 9}$$

La *Ecuación 9* garantiza que en los tiempos menores al Lead Time para cada caja no se tendrá aporte de piezas de objetos por la caja en cuestión, porque al no cumplirse el Lead Time la caja aún no está abierta.

$$I_{jt} + R_{jt} = \sum_{i=1}^m (IC_{ijt}) + I_{jt-1}; \quad \forall j, t > 1; \quad t: 1 \dots T \quad j: 1 \dots n \quad \text{Ecuación 10}$$

Para los momentos de tiempo $t > 1$, el inventario final más la demanda de objetos (requerimiento) deben ser atendidos por los objetos aportados desde la caja abierta en el periodo presente, sumado el inventario que resultó del periodo anterior.

$$\sum_{k=1}^n Y_{ik} \leq 1 \quad \forall \quad i: 1 \dots m \quad \text{Ecuación 11}$$

La anterior restricción, limita a que las cajas se deben desempacar utilizando los muelles que considere la modelación matemática. No obstante, no es necesario utilizar todos los muelles permitidos por el modelo si no se genera una solución óptima. Así mismo, no todas las cajas deben ser asignadas a los muelles si no es necesario y una caja solo se puede abrir en un único muelle.

$$X_{itk} \leq Y_{ik} \quad \forall \quad i: 1 \dots m \quad t: 1 \dots T \quad k: 1 \dots p \quad \text{Ecuación 12}$$

La *Ecuación 12* evidencia que una caja se desempaca en un muelle k , porque su apertura fue asignada en el muelle k .

$$XS_{it} * LT_i \leq \sum_k^p \sum_{t2=t}^{t+LT-1} X_{it2k} \quad \forall \quad i: 1 \dots m \quad t: 1 \dots T \quad k: 1 \dots p \quad \text{Ecuación 13}$$

La anterior restricción me expresa que una caja se demora desempacando en un muelle seleccionado lo que el Lead Time de la caja en cuestión se lo permita, iniciando desde el instante de tiempo t en que la variable binaria de inicio XS_{it} se active, es decir, tome valor de 1, estará abierta como mínimo la duración del Lead Time.

$$\sum_k^p \sum_{t=0}^t X_{it3k} \leq LT_i \quad \forall \quad i: 1 \dots m \quad \text{Ecuación 14}$$

La *Ecuación 14* complementa la *Ecuación 13* y obliga, a que una vez se inicie la apertura de una caja, dicha caja debe de estar abierta los periodos de tiempo tanto como máximo el valor de su Lead Time. Ambas ecuaciones finalmente, logran que una caja se demore en su desempaque los periodos iguales a su Lead Time.

$$\sum_k^p \sum_{t=0}^t X_{it3k} \leq \sum_{t=0}^t XS_{it2} * LT_i \quad \forall \quad i: 1 \dots m \quad t: 1 \dots T \quad k: 1 \dots p \quad \text{Ecuación 15}$$

La anterior restricción garantiza que si hasta el periodo t no se ha definido que una caja inicie su apertura, dicha caja no puede permanecer abierta durante ese periodo.

$$\sum_i^n X_{itk} \leq 1 \quad \forall \quad t: 1 \dots T \quad k: 1 \dots p \quad \text{Ecuación 16}$$

La *Ecuación 16* limita que durante el periodo t , en el muelle k solo se puede abrir una caja.

Función Objetivo:

$$MIN Z = \frac{1}{T} * \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T I_{jt} * P_j$$

La función objetivo del modelo propuesto es minimizar el inventario promedio ponderado por volumen (esto es debido a las piezas tienen características físicas diferentes). Se divide sobre T, que es el horizonte de planeación, es decir, el tiempo que total que demora en salir al producto final. Se define un horizonte de planeación de 13 unidades de tiempo. El volumen, es el atributo diferenciador de cada objeto, es decir, el objeto que presente mayor volumen ocupará mayor espacio en los puestos de trabajo, por tanto tendrá un mayor aporte al inventario promedio ponderado que un objeto que presente un menor volumen.

8.1 Caso estudio:

Luego de definir las variables, los parámetros, las restricciones y la función objetivo del modelo, se plantea una instancia que permita validar la funcionalidad y en consecuencia, su efectivo trabajo de optimización.

Para lo anterior, se evidencian los datos que representan los parámetros que el modelo de optimización debe analizar para el cálculo de la solución. Los datos son una muestra ejemplificada del proceso de articulación de una motocicleta en una línea de ensamble que tiene diseño "SpineLayout". Debido al componente académico del trabajo de grado, los objetos, cajas, muelles y horizonte de planeación son supuestos definidos por el autor de una organización

ensambladora de motocicletas. Sin embargo, es importante detallar que en el desarrollo de la tesis se conservan con la mayor rigurosidad las características reales que se presentan en el mencionado ambiente de producción para que los resultados, análisis y conclusiones tengan mayor representatividad y cercanía a la normalidad.

Se tiene un primer conjunto de 8 cajas, que son los recipientes donde se agrupan y transportan los objetos. Se resalta, que las cajas tienen el sistema logístico CKD, por lo tanto la agrupación de objetos es conocida por previa comunicación de los proveedores.

Cajas: Caja1, Caja2, Caja3, Caja4, Caja5, Caja6, Caja7, Caja8.

El segundo conjunto abarca los objetos que conforman la motocicleta, 26 en su totalidad.

Objetos: 2 llantas, 2 retrovisores, 4 direccionales, 2 cojines, 2 protectores, 1 motor, 2 farolas, 1 exosto, 2 frenos, 4 amortiguadores, 1 chasis, 2 guardabarros, 1 tanque.

Se define un tercer conjunto, que representa el horizonte de planeación conformado por los periodos en los que se debe ensamblar una motocicleta.

Tiempo: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 ,13.

Finalmente, se define un cuarto conjunto que representa la cantidad de muelles que puede utilizar el modelo para desempacar cada caja:

Muelle: 1, 2, 3.

Se presenta en la siguiente tabla el volumen de cada objeto, que es el factor diferenciador entre los mismos y que genera la carga al inventario de producto en proceso.

El parámetro del volumen permite jerarquizar los objetos en cuanto a que un objeto puede ocupar más o menos espacio que otro, lo cual da argumentos al solucionador para analizar que objeto puede estar en la mesa de trabajo (fuera de la caja) más tiempo ocupando el menor espacio posible y así mismo, que objeto ocupa mayor espacio en los puestos de trabajo y por tanto debería permanecer en la caja el mayor tiempo posible.

Tabla 1. Volumen de cada objeto

Objeto	Volumen
Llantas	4
Retrovisores	1
Direccionales	2
Cojines	3
Protectores	2
Motor	6
Farolas	3
Exosto	3
Frenos	1
Amortiguadores	2
Chasis	7
Guardabarros	3
Tanque	5

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 2*, se muestra el Lead Time de cada caja, es decir, el tiempo que se demora un operario en desempacar una caja, extraer y revisar los objetos. Se resalta, que el Lead Time está enmarcado dentro de los periodos del horizonte de planeación, que son unidades de tiempo representativas para ejemplificar un orden cronológico, por lo tanto no se definen segundos, minutos u otras unidades de tiempo para el desarrollo del problema.

Tabla 2. Lead Time de cada caja

Caja	Lead Time
Caja1	1
Caja2	1
Caja3	1
Caja4	1
Caja5	1
Caja6	1
Caja7	1
Caja8	1

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 3* se evidencia el contenido de cada caja, es decir, el material agrupado que cada caja transporta comunicado previamente por los proveedores.

Tabla 3. Contenido de cada caja.

	Caja1	Caja2	Caja3	Caja4	Caja5	Caja6	Caja7	Caja8
Llantas	1	1	0	0	0	0	0	0
Retrovisores	0	0	2	0	0	0	0	0
Direccionales	0	0	2	2	0	0	0	0
Cojines	0	0	0	0	2	0	0	0
Protectores	0	0	0	0	2	0	0	0
Motor	0	0	0	0	0	0	0	1
Farolas	0	0	1	1	0	0	0	0
Exosto	0	0	0	0	0	0	0	1
Frenos	0	0	0	0	0	1	1	0
Amortiguadores	0	0	0	0	0	2	2	0
Chasis	0	0	0	0	0	0	0	1
Guardabarros	1	1	0	0	0	0	0	0
Tanque	0	0	0	0	1	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior representa la cantidad de objetos agrupados en cada caja. Por ejemplo; la caja 1, tiene agrupado una llanta y un guardabarros. La caja 5 almacena dos cojines, 2 protectores y 1 tanque.

Posteriormente, se presenta la tabla que designa el requerimiento de la línea de ensamble, es decir, la cantidad de objetos que deben ser articulados con el producto principal de la línea en un determinado periodo.

Tabla 4.1. Requerimiento de la línea de ensamble.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Llantas	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Retrovisores	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Direccionales	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0
Cojines	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
Protectores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
Motor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Exosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Frenos	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Amortiguadores	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0
Chasis	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Guardabarros	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Tanque	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La interpretación correcta de la tabla del requerimiento es enunciar que en el periodo 5, se requieren en la línea 1 llanta, 1 freno, dos amortiguadores y 1 guardabarros o en el caso del periodo 6, no se requieren objetos.

8.1.1 Resultados.

El resultado óptimo del problema de minimizar el inventario promedio ponderado (en unidades del volumen como factor diferenciador entre los objetos) en los puestos de trabajo de una línea de ensamble que tiene diseño “SpineLayout” desempacando cajas que tienen un sistema logístico CKD, con los recursos y supuestos definidos anteriormente es igual a:

Inventario promedio ponderado = 7.4.

A continuación, se presenta los valores de la variable XS_{it} , que evidencian en que instante de tiempo t se inició con la apertura de cada caja.

Tabla 5. Tiempo en que se inicia la apertura de las cajas.

Caja	Periodo
Caja1	11
Caja2	4
Caja3	7
Caja4	11
Caja5	6
Caja6	11
Caja7	4
Caja8	3

Fuente: Elaboración propia.

La *Tabla 5* expresa que la Caja 1 inicio su apertura en el periodo 11, la Caja 2 en el periodo 4, y en ese orden de ideas para las demás cajas. Se puede apreciar, que la Caja 1, Caja 4 y Caja 6 inician su apertura en el mismo periodo ($t = 11$). Lo anterior se debe a que el diseño del escenario base tiene 3 muelles como recursos para el desempaque de cajas, es decir, puede desempacar hasta un máximo de 3 cajas en el mismo periodo. En la siguiente tabla, se exponen los muelles donde se desempacaron las cajas.

Tabla 6. Muelles en los que se desempaca cada caja.

Caja	Muelles
Caja1	1
Caja2	3
Caja3	2
Caja4	2
Caja5	2
Caja6	3
Caja7	2
Caja8	3

Fuente: Elaboración propia.

En la anterior tabla, se evidencia que la Caja 1 se desempaca en el Muelle 1, la Caja 4 se desempaca en el Muelle 2 y la Caja 6 se desempaca en el Muelle 3, de esta manera no existen obstáculos que impidan el correcto desempaque de cada caja, aun iniciando dicho proceso en el mismo periodo.

Por otra parte, se detalla que las cajas 3, 4, 5 y 7 se desempacan en el mismo muelle (Muelle 2). Lo anterior es permitido, debido a que el Lead Time (los tiempos de desempaque) de cada caja no interfiere con el inicio de apertura de la caja siguiente en el orden de producción, es decir, la Caja 7 inicia su apertura en el periodo 4 y lo termina en el periodo 5, ya que su Lead Time es igual a 1 periodo, en consecuencia, para el periodo 6 en que la Caja 5 inicia su apertura el Muelle 2 ya estará disponible para su recepción. Un ejemplo más riguroso existe en el caso de la Caja 5, que tiene un Lead time de 1 periodo, es decir, los objetos son extraídos y enviados articulados con el producto principal de la línea de ensamble justo en el periodo 7, momento en el que la Caja 3 inicia su desempaque en el Muelle 2 sin ningún impedimento.

La solución óptima logró que algunos objetos no efectuaran inventario acumulado en los puestos de trabajo, debido a que el periodo en que se inició su apertura sumado al tiempo en que se demoraba desempacando la caja resultaba el instante de tiempo preciso en que los objetos ingresaban a la línea de ensamble.

Tabla 7. Objetos que no aportan al inventario de producto en proceso.

Cajas	Objeto	Inicio de apertura	Lead Time	Periodo en que se ensambla
Caja 1	1 Llanta	11	1	12
Caja 2	1 Llanta	4	1	5
Caja 1	1 Guardabarros	11	1	12
Caja 2	1 Guardabarros	4	1	5
Caja 6	1 freno	11	1	12
Caja 7	1 freno	4	1	5
Caja 6	2 amortiguador	11	1	12
Caja7	2 amortiguador	4	1	5
Caja 3	1 farola	7	1	8
Caja 5	Tanque	6	1	7
Caja 8	Chasis	3	1	4

Fuente: Elaboración propia.

Se puede afirmar entonces, que la Caja 1, que contenía 1 llanta y un guardabarros inicio su apertura en el periodo 11. Dicha apertura, duro 1 periodo en terminar para que finalmente lograra hacer entrega y articular los objetos en la línea de ensamble en el periodo 12, que es el tiempo en que se requerían los objetos mencionados según la demanda de la línea de producción.

En la solución existen casos particulares como el que ocurre con la Caja 1 y la Caja 2. Cada caja contiene 1 llanta y 1 guardabarros. El requerimiento define que para el periodo 5 deben ingresar a la línea de ensamble los dos objetos en cuestión y para el periodo 12 deberá ocurrir lo mismo con la segunda pareja de objetos (segunda llanta y segundo guardabarros). El solucionador decide abrir la Caja 1 en el periodo 11 para cumplir con el pedido en el tiempo igual a 12, e inicia

apertura de la Caja 2 en el instante de tiempo igual a 4 para cumplir con la orden del periodo 5. Sin embargo, esta decisión puede ser modificada con respecto a que se puede abrir la Caja 1 en el periodo 4 y la Caja 2 en el periodo 11, ya que al tener exactamente la misma cantidad y tipo de objetos es irrelevante pensar que caja debería abrirse primero.

Ahora bien, en el caso de que alguna de las cajas tenga un objeto adicional con respecto a la otra caja, la decisión es más restrictiva, ya que se debe identificar si el objeto adicional influye en el inventario acumulado que se origina en los puestos de trabajo, esperando su orden de ingreso a la línea de ensamble, lo que otorga prioridad de abrir inicialmente aquella caja que dentro de su contenido no estén objetos que generen inventario o bien, iniciar la apertura de la caja con el objeto que genera inventario acumulado en el periodo más lejano posible para que el transcurso de los periodos de tiempo con el objeto sin ingresar a la línea de ensamble sea el mínimo. La situación mencionada anteriormente, se expondrá con mayor claridad más adelante en el análisis de sensibilidad.

En la siguiente tabla, se muestran los objetos que contribuyeron al inventario acumulado en los puestos de trabajo, calculado en los periodos de tiempo desde que se extraen de sus respectivas cajas, hasta el momento en que son ingresados en la línea de ensamble.

Tabla 8. Periodos con inventario de producto en proceso.

Objeto	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cojines	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Exosto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Motor	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Protectores	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fuente: Elaboración propia.

La *Tabla 8* evidencia, para el caso de los cojines, inventario de producto en proceso, es decir, objetos que ocupan espacio en los puestos de trabajo desde el periodo 7 hasta el periodo 9, para ser ingresados finalmente a la línea de ensamble en el periodo 10. Este inventario de producto en proceso, se origina porque la Caja 5, que es el lugar de almacenamiento de los cojines inicio su apertura en el periodo 6 para terminar el proceso de extracción de los objetos en el periodo 7 y cumplir con la demanda de la entrega del tanque a la línea de ensamble en el mismo periodo. Lo anterior, provoca que los cojines sean liberados de su caja en el periodo 7 y deban esperar durante 3 periodos para ser articulados con el producto principal en el periodo 10.

Con similar explicación los demás objetos se convierten en inventario de producto en proceso durante el horizonte de planeación, resaltando el caso del Exosto, cuya caja (Caja 8) fue la primera en iniciar la apertura para entregar el chasis en el periodo 4 y desde ese instante, el Exosto se convirtió ocupó espacio en los puestos de trabajo hasta el último periodo del proceso de producción donde fue ingresado a la línea de ensamble.

A continuación, se expone el procedimiento para el cálculo del inventario promedio ponderado resultante del modelo de optimización, utilizando los objetos que están acumulados esperando por ser articulados con la línea de ensamble principal, representando un aporte al inventario de producto en proceso del ambiente de producción.

Tabla 9. Volumen total que se ocupa en cada periodo.

Volumen	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cojines (3)	0	0	0	6	6	6	0	0	0
Exosto (3)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Motor (6)	6	6	6	6	6	6	0	0	0
Protectores (2)	0	0	0	4	4	4	0	0	0
Farolas (3)	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Fuente: Elaboración propia.

La *Tabla 9*, explica la relación que existe entre el volumen y la cantidad de objetos presentados en cada periodo a lo largo de la producción. El Motor por ejemplo, tiene un volumen igual a 6 y como se puede apreciar en la *Tabla 8* el Motor es un objeto que genera inventario acumulado en el puesto de trabajo en los periodos de tiempo 4, 5, 6, 7, 8 y 9, por lo tanto con respecto al volumen en cada uno de los mencionados periodos de tiempo se ocupa un valor igual a 6 proveniente de los atributos del Motor. En el caso de los Cojines, el resultado en los periodos de tiempo donde hacen parte del inventario de producto en proceso es igual a 6, dado que cada cojín tiene un volumen representativo igual a 3, y se multiplica con las dos unidades de Cojines que están ocupando espacio en los puestos de trabajo en cada periodo.

Se procede a sumar el inventario ponderado, es decir, los valores resultantes luego de efectuar las multiplicaciones por los respectivos volúmenes de cada objeto (*Tabla 9*) y posterior a ese procedimiento, se divide sobre el total de periodos de tiempo que contempla el proceso productivo, valor que es igual a 13, calculando finalmente, el inventario promedio ponderado óptimo del ambiente productivo esquematizado.

Tabla 10. Inventario Promedio Ponderado

Suma Inventario Ponderado	96
Inventario Promedio Ponderado	7,4

Fuente: Elaboración propia.

Tener un orden de apertura aleatorio, que no se ajuste a los lineamientos de tener objetos en los puestos de trabajo en el menor tiempo posible, ocasiona que el inventario de producto en proceso incremente.

Por ejemplo, si se decide abrir la caja 8 en el periodo 1, ya que se desea iniciar con la apertura de las cajas en sincronización con el inicio de la producción en la línea de ensamble, aun conociendo que el primer objeto en ingresar a la línea de

ensamble de dicha caja es el chasis y lo hace en el momento de tiempo 4, se incurrirá en un incremento del inventario promedio ponderado, sujeto a que el motor, exosto y chasis ocupan espacio en los puestos de trabajo desde el periodo 2. Realizando la apertura de la caja 8 en el periodo 1, se alcanza un valor de inventario promedio ponderado de 8,76.

Lo anterior permite evidenciar, que abrir las cajas sin una programación específica que se fundamente en cumplir la demanda de objetos ocupando espacio en los puestos de trabajo el menor tiempo posible, ocasiona un considerable inventario de producto en proceso.

8.2 Análisis de sensibilidad.

Con el fin de validar el funcionamiento del modelo matemático diseñado para resolver el problema definido en el presente trabajo de grado, se procedió a realizar un análisis con respecto a la sensibilidad del mismo, modificando los parámetros de la instancia inicial que representen objeto de estudio para estructurar con diversos recursos los resultados adquiridos.

En el análisis de sensibilidad, se realizaron variaciones a los parámetros del modelo inicial, teniendo en cuenta que dichas variaciones generen una discusión válida, representativa y pertinente para entender el comportamiento del modelo.

En el primer escenario, se modifican la cantidad de muelles en los que el modelo puede ubicar las cajas para ser desempacadas y cumplir con las demandas de objetos de la línea de ensamble.

Para el segundo escenario, se decide modificar la agrupación definida de los objetos en cada caja, es decir, se eliminarán cajas y se esquematiza un nuevo orden en que los objetos son almacenados en cada caja con respecto al orden de la instancia inicial.

Finalmente, se realiza un tercer escenario, que compromete una variación a los Lead Time de las cajas, es decir, se definen nuevos tiempos de desempaque y extracción de objetos para cada caja.

- **8.2.1 Escenario 1. Variación en la cantidad de muelles.**

Es fructífero para el análisis de los resultados, conocer el comportamiento del modelo con un número de muelles diferente, ya que muelles adicionales permiten que más de una caja sea abierta en el mismo periodo en diferentes espacios asignados, lo que en consecuencia genera que se reduzca la espera de cajas porque un muelle se libere de cargas y una posible mejora en la función de desempeño, en cuanto a que no se tendrán objetos que fueron extraídos de sus cajas sin ser demandados por la línea de ensamble, pero que dichas cajas debían ser abiertas según la programación determinada para cumplir con los requerimientos, teniendo en cuenta que solo estaba disponible un muelle.

A continuación, se presentan los resultados óptimos expresados por el solucionador del modelo matemático para los casos en que se tiene como recurso de espacio para desempacar las cajas 1 muelle, 2 muelles, 4 muelles, 5 muelles y 7 muelles. Se resalta, que la instancia inicial comprende la utilización de 3 muelles, por lo que dicha posibilidad no se realiza de nuevo, pero se muestran los resultados la conglomeración de los resultados. En las siguientes tablas, se puede apreciar para conjunto de muelles utilizados, el inventario promedio ponderado y el tiempo en que se inicia la apertura de cada caja.

Tabla 11. Resultados utilizando 1 Muelle.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	10	1
Caja2	4	1

Caja3	7	1
Caja4	11	1
Caja5	6	1
Caja6	9	1
Caja7	2	1
Caja8	3	1
Inventario Promedio Ponderado	9,5	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Resultados utilizando 2 Muelles.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	11	2
Caja2	4	1
Caja3	7	1
Caja4	11	1
Caja5	6	1
Caja6	10	1
Caja7	4	2
Caja8	3	1
Inventario Promedio Ponderado	7,8	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Resultados utilizando 3 Muelles.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	11	1
Caja2	4	3
Caja3	7	2
Caja4	11	2
Caja5	6	2
Caja6	11	3
Caja7	4	2
Caja8	3	3
Inventario Promedio Ponderado	7,4	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados utilizando 4 Muelles.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	4	4
Caja2	11	2
Caja3	7	3
Caja4	11	3
Caja5	6	3
Caja6	11	4
Caja7	4	2
Caja8	3	2
Inventario Promedio Ponderado	7,4	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Resultado utilizando 5 Muelles.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	4	1
Caja2	11	2
Caja3	7	4
Caja4	11	4
Caja5	6	4
Caja6	11	5
Caja7	4	5
Caja8	3	2
Inventario Promedio Ponderado	7,4	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultado utilizando 7 Muelles.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	11	6
Caja2	4	1
Caja3	7	5
Caja4	11	5
Caja5	6	5
Caja6	4	3
Caja7	11	3
Caja8	3	3
Inventario Promedio Ponderado	7,4	

Fuente: Elaboración propia.

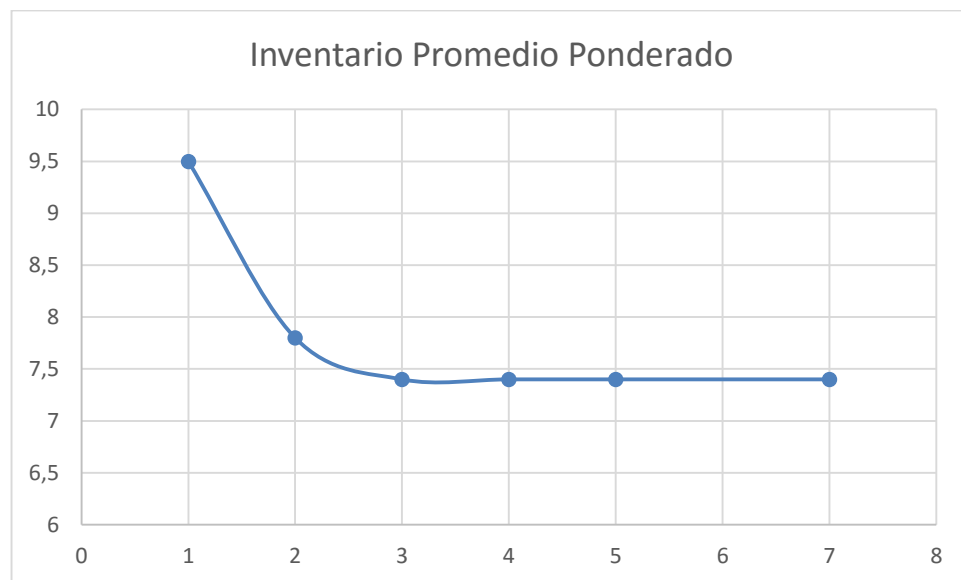


Figura 2. Inventario Promedio Ponderado para cada muelle en el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia.

La *Figura 3*, recopila el inventario promedio ponderado generado cuando el modelo matemático utilizó 1 Muelle, 2 Muelles, 3 Muelles, 4 Muelles, 5 Muelles y 7 Muelles.

Se puede apreciar, que el resultado del inventario promedio ponderado es igual en el caso de utilizar 3, 4, 5 y 7 Muelles (7,4). Lo anterior, sucede debido a que para los 4 casos mencionados el solucionador decide iniciar la apertura en los mismos periodos de tiempo, lo que en consecuencia produce que el inventario promedio ponderado resultante de los objetos que acumulan inventario, que son iguales para los 4 conjuntos de muelles sea 7,4.

Existe diferencia con relación al periodo en que se inicia la apertura de las cajas que almacenan la misma cantidad y tipo de objetos, por ejemplo, cuando se utilizan 5 Muelles, la Caja 1 inicia apertura en el periodo 4 y la Caja 2 en el periodo 11, situación que se origina en sentido contrario cuando se utilizan 7 Muelles, en donde la Caja 1 se empezó a desempacar en el periodo 11 y la Caja 2 en el periodo 4. Teniendo en cuenta que cada caja contiene 1 Llanta y 1 Guardabarros, es irrelevante pensar cuál de las dos cajas debe abrirse primero en el orden cronológico de la producción, ya que ninguna tiene un objeto adicional que se acumule en los puestos de trabajo y haga parte de inventario de producto en proceso, e incluso en ambos casos los objetos son inmediatamente transferidos a la línea de ensamble luego de ser extraídos de su respectiva caja (termina el Lead Time).

Tabla 17. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 3, 4, 5 y 7 Muelles.

Objeto	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cojines	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Exosto	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Motor	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Protectores	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fuente: Elaboración propia.

La *Tabla 17*, consolida los periodos de tiempo en los que se presenta inventario acumulado en los puestos de trabajo de la línea de ensamble en los ambientes productivos que cuentan con 3, 4, 5 y 7 Muelles. En consecuencia, al tener idéntica cantidad y tipo de objetos en los mismos periodos de tiempo la ponderación y el resultado final del inventario promedio ponderado para las 4 situaciones planteadas es igual.

Sin embargo, para los 4 conjuntos de Muelles mencionados existe una marcada diferencia con respecto al muelle designado para desempacar cada caja. En la *Tabla 13*, *Tabla 14*, *Tabla 15* y *Tabla 16* se observan elecciones diferentes con respecto a en que muelle se debe desempacar cada caja (Por coincidencia, 3 cajas se abren en el mismo muelle, unificando los 4 ambientes productivos en cuestión). Lo anterior, es debido a que la cantidad de muelles no está limitando el orden en que se desempacan las cajas para cumplir con los requerimientos de la línea de ensamble. Cuando se definen 4, 5 y 7 Muelles el resultado óptimo es calculado con la utilización de únicamente 4 Muelles, es decir, que en los dos últimos ambientes productivos existen muelles a los que no se les asigna caja ya que no generan mejoras a la optimización, inclusive, se expone en la solución presentada en la *Tabla 13* un inventario promedio ponderado igual al de los 3 casos mencionados utilizando 3 Muelles, lo que permite pensar que en realidad son necesarios solo 3 Muelles para generar la respuesta optima al problema estructurado, cumpliendo en totalidad las ordenes emitidas de producción.

Para el caso en que se utilizan 1 y 2 muelles, se evidencia un aumento en el inventario promedio ponderado con respecto al inicial (7,4) llegando a los valores de 9,5 y 7,8 respectivamente. Este aumento se origina porque en los dos

ambientes productivos mencionados, la cantidad de muelles limita el orden cronológico en que se realiza la apertura de las cajas. El solucionador, empieza a desempacar las cajas con periodos de tiempo anticipados en relación a la instancia inicial, ya que no tiene la flexibilidad de abrir 3 cajas en el mismo periodo y como obligatoriamente debe cumplir con los requerimientos emitidos por la línea de ensamble, se toma la decisión de abrir las cajas en un orden tal que permita articular los objetos con el producto principal en el tiempo estimado.

La situación explicada anteriormente, ocasiona la existencia de objetos acumulados en los puestos de trabajo que en la instancia inicial no aportaban al inventario de producto en proceso como lo son los amortiguadores, las llantas, los frenos y guardabarros, en el caso que se utilice 1 Muelle y el mismo tipo de objetos a excepción de las llantas en el ambiente productivo definido con 2 Muelles.

En las siguientes tablas se consolidan los objetos que hacen parte del inventario de producto en proceso de la producción con los respectivos tiempos en los que ocupan espacio de los puestos de trabajo para los casos en los que se tiene como recursos para desempacar las cajas 1 y 2 Muelles.

Tabla 18. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utiliza 1 Muelle.

Objeto	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amortiguadores	2	2	0	0	0	0	0	2	2	0
Cojines	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Exosto	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Frenos	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
guardabarros	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Llantas	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Motor	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Protectores	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 2 Muelles.

Objeto	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amortiguadores	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Cojines	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Exosto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Frenos	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Motor	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Protectores	0	0	0	2	2	2	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Un ejemplo de la problemática originada por la cantidad de muelles se evidencia con la influencia de los amortiguadores y los frenos en el caso de tener 1 Muelle. Cuando se tienen 3 muelles, estos objetos no forman inventario de producto en proceso (véase *Tabla 17*) ya que la caja que los contiene (Caja 7) inicia su apertura en el periodo 4 para entregar los objetos que esta contiene en el periodo 5, procedimiento que también realiza con la Caja 2, que contiene 1 llanta y 1 guardabarros que deben ser articulados con el producto principal en el periodo 5 (véase *Tabla 7*). Las cajas se desempacan en dos muelles distintos y son extraídos de la caja para ser entregados inmediatamente a la línea de ensamble sin ocupar espacio en los puestos de trabajo.

Cuando se tiene 1 Muelle, el modelo decide abrir primero la Caja 7 en el periodo 2, que contiene 2 amortiguadores y 1 freno. Luego inicia la apertura en el periodo 3 de la Caja 8, que contiene el chasis que debe ser entregado en el periodo 4. Finalmente, inicia la apertura de la caja 2 en el periodo 4, que almacena 1 llanta y 1 guardabarros para así poder entregar a la línea de ensamble 1 llanta, 1 guardabarros, 2 amortiguadores y 1 freno en el periodo 5. Se puede notar, que 2 amortiguadores y un freno fueron inventario de producto en proceso por los periodos de tiempo 3 y 4 (véase *Tabla 18*), situación que no se presenta al tener 3 o 2 muelles para iniciar la apertura de dos cajas al mismo tiempo y que los objetos contenidos en ambas cajas lleguen en el periodo que deben ser articulados con el

producto principal y no se efectuó acumulación de inventario en los puestos de trabajo.

La decisión de abrir primero la Caja 7 en orden cronológico con respecto a la Caja 2, conociendo que los objetos contenidos en dichas cajas deben llegar en el mismo periodo a la línea de ensamble (5) es fundamentada en que los amortiguadores y los frenos ocupan un volumen menor en los puestos de trabajo que las llantas y los guardabarros, valores de 2 y 1 para el primer grupo y valores de 4 y 3 para el segundo (véase *Tabla 1*). Por lo tanto, contribuye a tener una reducción de inventario de promedio ponderado la acumulación de objetos que tengan menor volumen y no acumular objetos que tengan mayores magnitudes de dicho parámetro. De esta manera, se decide que los 2 amortiguadores y el freno aporten al inventario promedio ponderado, y posterior al proceso de apertura la llanta y el guardabarros sean ingresados inmediatamente a la línea de ensamble sin ocupar espacio en el puesto de trabajo.

- 8.2.2 Escenario 2. Nueva organización de objetos en las cajas.

Si bien, los proveedores externos de las cajas CKD son los encargados de organizar los objetos de tal manera que se reduzcan los fletes y demás costos de envío y de transportes, es interesante proponer un esquema de organización de los objetos en las cajas de tal manera que se reduzca el inventario promedio ponderado en la planta ensambladora, para que en un futuro se pueda llegar a un acuerdo entre la cadena de suministros de tal manera que ambas partes resulten con beneficios, modificando la agrupación de algunos objetos sin incrementar el costo de envío por parte de los proveedores.

Para definir la primera agrupación modificada de los objetos en las cajas con respecto a la instancia inicial, se identificó cual era el objeto con mayor aporte al inventario promedio ponderado, durante sus periodos de espera por ser articulado

con el producto principal (Véase *Tabla 9*). Se determina, que el motor es el objeto que más contribuye al crecimiento del inventario promedio ponderado, ya que tiene un volumen de 6 y en 6 periodos termina generando un valor de incremento de 36 en cuanto a la suma de los valores se refiere, le sigue el exosto, que tiene un volumen de 3 y genera un incremento de 27 concerniente e los 9 periodos en los que ocupa espacio en los puestos de trabajo. Por lo anterior, se decide ubicar el motor en una caja cuya apertura sea la más cercana al instante de tiempo en el que el motor debe ser articulado al vehículo principal.

Teniendo en cuenta que el motor debe ser ingresado a la línea de ensamble en el periodo 10, se selecciona la Caja 3 como nuevo recipiente del objeto, ya que dicha caja inicia su apertura en el periodo 7 (Véase *Tabla 5*), instante de tiempo más cercano dentro de los posibles con respecto al periodo en que se requiere el motor por la línea de producción. El contenido de las cajas se estructura de la siguiente manera:

Tabla 20.1. Contenido de cada caja, primera nueva agrupación.

	Llantas	Retrovisores	Direccionales	Cojines	Protectores	Motor
Caja1	1	0	0	0	0	0
Caja2	1	0	0	0	0	0
Caja3	0	2	2	0	0	1
Caja4	0	0	2	0	0	0
Caja5	0	0	0	2	2	0
Caja6	0	0	0	0	0	0
Caja7	0	0	0	0	0	0
Caja8	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20.2. Contenido de cada caja, primera nueva agrupación.

	Farolas	Exosto	Frenos	Amortiguadores	Chasis	Guardabarros
Caja1	0	0	0	0	0	1
Caja2	0	0	0	0	0	1
Caja3	1	0	0	0	0	0
Caja4	1	0	0	0	0	0
Caja5	0	0	0	0	0	0

Caja6	0	0	1	2	0	0
Caja7	0	0	1	2	0	0
Caja8	0	1	0	0	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20.3. Contenido de cada caja, primera nueva agrupación.

	Tanque
Caja1	0
Caja2	0
Caja3	0
Caja4	0
Caja5	1
Caja6	0
Caja7	0
Caja8	0

Fuente: Elaboración propia.

Conservando los demás parámetros conforme se definieron en la instancia inicial, se obtienen los siguientes resultados luego de la correspondiente optimización.

Tabla 21. Resultados, primera nueva agrupación.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	11	1
Caja2	4	2
Caja3	7	2
Caja4	11	2
Caja5	6	2

Caja6	11	3
Caja7	4	3
Caja8	3	3
Inventario Promedio Ponderado	5,5	

Fuente: Elaboración propia.

El periodo de inicio de apertura de las cajas no se modifica con respecto los resultados de la instancia inicial, sin embargo se reduce el inventario de promedio ponderado al valor de 5,5. Existe una diferencia con la selección de muelles para desempacar las cajas, que no afecta los resultados debido a que los muelles son idénticos y para este caso, solo evidencian un orden en la ubicación.

En la siguiente tabla, se refleja el fundamento a partir del cual existe la reducción del inventario con respecto al caso base.

Tabla 22. Periodos con inventario de producto en proceso, primera nueva agrupación.

Objeto	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cojines	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Exosto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Motor	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Protectores	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que el objeto motor, evita participar del inventario acumulado en los periodos de tiempo 4, 5, 6 y 7 al no ser contenido en la Caja 8 que depositaba los elementos que almacenaba en el periodo 4 (Véase *Tabla 9*). Con la nueva agrupación, el motor es depositado en la mesa de trabajo en el periodo 8 ya que la Caja 3 que lo contiene debe abastecer la línea de ensamble en dicho periodo con 2 retrovisores, 2 direccionales y 1 farola. Sin embargo, en esta nueva agrupación el motor hace una espera de dos periodos de tiempo antes de ser

articulado con la línea de ensamble, eliminando la acumulación del inventario en 4 periodos de tiempo, que en el cálculo global reducen el inventario promedio ponderado en 1,9 unidades.

Con el mismo análisis realizado para reducir el inventario acumulado que generaba un objeto, se diseña una segunda nueva agrupación que permita reducir los periodos en que se incurre en objetos ubicados en los puestos de trabajo con respecto a los resultados obtenidos del problema de optimización de la instancia inicial. En esta nueva agrupación se eliminan 3 cajas y se reorganizan los objetos en las cajas de tal forma que se eviten periodos en los que se acumula inventario en comparación a los resultados iniciales.

Tabla 23.1. Contenido de cada caja, segunda nueva agrupación.

	Llantas	Retrovisores	Direccionales	Cojines	Protectores	Motor
Caja1	1	0	0	0	0	0
Caja2	1	0	0	0	0	0
Caja3	0	2	2	0	0	0
Caja4	0	0	2	0	0	0
Caja5	0	0	0	2	2	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23.2. Contenido de cada caja, segunda nueva agrupación.

	Farolas	Exosto	Frenos	Amortiguadores	Chasis	Guardabarros
Caja1	0	0	1	2	1	1
Caja2	0	1	1	2	0	1
Caja3	1	0	0	0	0	0
Caja4	1	0	0	0	0	0

Caja5	0	0	0	0	0	0
--------------	---	---	---	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23.3. Contenido de cada caja, segunda nueva agrupación

	Tanque
Caja1	0
Caja2	0
Caja3	1
Caja4	0
Caja5	0

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos luego de la correspondiente optimización son los siguientes:

Tabla 24. Resultados, con segunda nueva agrupación.

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	3	1
Caja2	11	2
Caja3	6	2
Caja4	11	3
Caja5	9	2
Inventario Promedio Ponderado	2,1	

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que las cajas con la nueva agrupación tienen objetos que en la instancia inicial no hacían parte de su contenido, es razonable que los periodos de inicio de apertura se modifiquen con el fin de cumplir con los requerimientos efectuados por la línea de ensamble que se conservaron iguales. Con este esquema de cajas, se percibe una reducción del inventario de promedio ponderado drástica, llegando al valor de 2,1.

Tabla 25. Periodos con inventario de producto en proceso, segunda nueva agrupación.

Objeto	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amortiguadores	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Direccionales	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Exosto	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Farolas	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Frenos	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Llantas	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Guardabarros	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Retrovisor	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 25* se evidencia la existencia de nuevos objetos que hacen parte del inventario acumulado en comparación a la instancia inicial, como los amortiguadores, direccionales, frenos, llantas, guardabarros y retrovisores. Sin embargo, se detalla que dichos objetos solo forman inventario acumulado en un o máximo dos periodos de tiempo, lo que reduce la problemática que existía de tener un objeto durante varios periodos de tiempo ocupando espacio en el caso inicial. Además, se evitó que objetos como el motor que tiene un volumen de 6, segundo más alto dentro del conjunto de objetos estuvieran presentes en el inventario, logrando de esta manera un aporte a la reducción del inventario desde esa perspectiva.

Se presentaron en este escenario, 2 propuestas de ambientes productivos modificando la agrupación de las cajas y se logró una reducción del inventario promedio ponderado, debido a que la agrupación de los objetos se realizó pensando en el orden en que se requieren por la línea de ensamble. Sin embargo, se resalta que las cajas CKD son organizadas y agrupadas por los proveedores en función a disminuir los costos de transporte hacia la planta de ensamble, lo que limita estas propuestas a un análisis previo con el proveedor que permita una agrupación de objetos en cajas que minimice los costos de transporte y a la vez, reduzca el inventario acumulado generado en los puestos de trabajo.

- **8.2.3 Escenario 3. Variación del Lead Time.**

En el tercer escenario se modifican los tiempos de desempaque y extracción de objetos de cada caja, con el fin de analizar como afecta los tiempos de Lead Time de las cajas en la acumulación de inventario de producto en proceso. Con este planteamiento, se puede evidenciar si sería eficiente diseñar un nuevo sistema de apertura de las cajas que modifique el Lead Time, comparándolo con el inventario promedio ponderado que se origina con el Lead Time actual.

En este escenario, se comparan los resultados del problema definido con 2 muelles y un Lead Time igual a 1 para cada caja con respecto a los resultados calculados teniendo la misma cantidad de muelles, pero precisando diferentes tiempos de Lead Time para cada caja. Se resalta, que se mantienen los demás parámetros del problema como el requerimiento de los objetos en los distintos periodos de tiempo y el volumen e cada objeto.

Tabla 26. Resultados utilizando dos muelles. Lead Time = 1 para cada caja

Caja	Periodo	Muelles
Caja1	11	2
Caja2	4	1
Caja3	7	1
Caja4	11	1
Caja5	6	1
Caja6	10	1
Caja7	4	2
Caja8	3	1
Inventario Promedio Ponderado	7,8	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 2 Muelles. Lead Time = 1 para cada caja.

Objeto	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amortiguadores	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Cojines	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Exosto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Frenos	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Motor	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Protectores	0	0	0	2	2	2	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 26* y *Tabla 27*, se puede apreciar los resultados del problema de optimización teniendo como 2 muelles como recurso para realizar el proceso de apertura de la caja y fijando un tiempo de demora en dicho proceso de apertura de 1 periodo para cada caja.

A continuación, se exponen los resultados del problema de optimización utilizando 2 muelles para la apertura de las cajas y determinando un Lead Time para cada caja diferente de 1 periodo.

Tabla 28. Nuevo Lead Time para cada caja.

Caja	Lead Time
Caja1	2
Caja2	2
Caja3	2
Caja4	2
Caja5	3
Caja6	2
Caja7	2
Caja8	3

Fuente: Elaboración propia.

Los periodos de tiempo del Lead Time definidos para cada caja, fueron asignados de tal manera que el solucionador pueda generar una respuesta factible al problema y no existan inconsistencias u obstáculos en el mecanismo de solución. Por ejemplo, la caja 8 que contiene el objeto chasis, no puede tener un Lead Time superior a 3 unidades de tiempo, ya que dicho objeto debe ser ingresado a la línea de ensamble en el periodo 4, por lo tanto su proceso de apertura puede demorarse a lo máximo 3 unidades de tiempo para que en el periodo 4 el objeto se encuentre ubicado en el puesto de trabajo listo para ser articulado con el producto principal. Si no es así, el solucionador presenta errores en el cálculo del inventario acumulado ya que no se satisface la demanda.

Los resultados del problema con un Lead Time diferente a un periodo para cada caja son los siguientes:

Tabla 29. Resultados utilizando dos muelles. Lead Time diferente para cada caja.

Caja	Periodo en que se inicia apertura de caja	Periodos de tiempo en los que la caja se está desempacando	Muelles
Caja1	10	10,11	2
Caja2	3	3,4	1
Caja3	6	6,7	1
Caja4	10	10,11	1
Caja5	4	4,5,6	2
Caja6	1	1,2	1
Caja7	8	8,9	2
Caja8	1	1,2,3	2
Inventario Promedio Ponderado	8,9		

Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 29*, se muestra el periodo en que se inicia la apertura de cada caja y la asignación del proceso de desempaque de las cajas a un respectivo muelle.

Además, en la columna “Periodos de tiempo en los que la caja se está desempacando” se especifican los periodos de tiempo en los que una caja realiza su proceso de desempaque sujeto al Lead Time definido en la *Tabla 28*, es decir, como a la caja 5 se le definió un Lead Time de 3 periodos de tiempo y su proceso de apertura inicia en el periodo 4, en la columna mencionada anteriormente se expone que en los periodos de tiempo 4, 5 y 6 la caja estará en proceso de desempaque que refleja el tiempo que demora terminar el proceso de apertura, que es el Lead Time (3).

Comparando la *Tabla 29* con la *Tabla 26*, se puede apreciar un incremento en el inventario de promedio ponderado de 1,1 unidades, es decir, paso de 7,8 utilizando un Lead Time igual a uno para todas las cajas a un valor de 8,9 definiendo un nuevo Lead Time para cada caja. El incremento, está asociado a los periodos de tiempo adicionales en los que se acumula inventario de producto en proceso con la nueva definición de los Lead Time para cada caja.

Tabla 30. Periodos con inventario de producto en proceso, cuando se utilizan 2 Muelles. Lead Time para cada caja estipulado en la *Tabla 28*.

Objeto	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amortiguadores	2	2	0	0	0	0	0	2	2	0
Cojines	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Exosto	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Farolas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Frenos	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
Motor	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Protectores	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Una muestra de la evidencia de objetos adicionales que hacen parte del inventario acumulado con respecto a la propuesta inicial del escenario, son los 2 amortiguadores y el freno que esperan en los puestos de trabajo en los periodos de tiempo 3 y 4 esperando por ser articulados con el producto principal en el

periodo 5, situación que no se presenta cuando se define un Lead Time igual a un periodo para todas las cajas.

El evento descrito anteriormente, sucede debido a que un muelle es ocupado hasta el periodo 4 desempacando la caja 8 que contiene el chasis que debe ser ingresado a la línea de ensamble en el periodo 4. Durante este procedimiento, se debe utilizar el muelle restante para desempacar las cajas 6 y 2, que contienen 2 amortiguadores, 1 freno, 1 llanta y un guardabarros que deben ser ensamblados en el periodo 5.

Las cajas 6 y 2 tienen definido un Lead Time de 2 periodos de tiempo, por lo tanto los objetos de ambas cajas alcanzan a ser extraídos para cumplir con la demanda. Luego por ser un problema de minimizar el inventario promedio acumulado, el solucionador decide abrir primero la caja 6 y que los objetos que contienen se acumulen en los puestos de trabajo, situación que no ocurre con la caja 2, ya que los objetos son articulados directamente al producto principal. Dicha decisión está asociada a que el volumen de los objetos de la caja 2, llanta (4) y guardabarros (3) es mayor a los objetos contenidos en la caja 6 amortiguadores (2) y freno (1), por lo tanto si tiene la obligación de acumular inventario, prioriza la apertura de la caja que genere menos carga con sus objetos.

La comparación realizada con las dos propuestas de Lead Time para cada caja permite deducir que los tiempos que se incurren en extraer los objetos para cumplir la demanda de la línea generan una planeación y orden de apertura de las cajas que en consecuencia, exponen mayor cantidad de objetos a tener esperas en los puestos de trabajo para ser ingresados a la línea de ensamble, teniendo en cuenta la restricción de los espacios disponibles (muelles) en los que se pueda realizar el desempaque.

En ese orden de ideas, manteniendo los espacios disponibles para realizar la apertura de las cajas constantes, es válido pensar que reducir el Lead Time de cada caja permite una flexibilidad en el orden en que se abren las cajas, promoviendo procesos de aperturas que terminen en los periodos de tiempo en los que se ingresa los objetos a la línea de ensamble y de esta manera, no se

presente inventario acumulado en los puestos de trabajo. Situación que se percibe, en la propuesta del problema con un Lead Time igual a un periodo para todas las cajas con una reducción de inventario promedio ponderado comparado con la propuesta en la que se definen Lead Time diferentes y mayores a uno para cada caja.

Es importante resaltar, que en un ambiente real de producción los periodos de desempaque de cajas y extracción de objetos son diferentes para cada contenedor debido a las características propias del objeto, es decir, se tomará un tiempo mayor desempacar una caja que contiene un chasis, un motor y un exosto con respecto a una caja que contiene un freno y dos amortiguadores debido a que los objetos de la primera caja exigen un manejo de material cuidadoso, conservador y paulatino, por ser objetos pesados y de volumen considerable.

8.3 Análisis de sensibilidad para lotes de vehículos.

En el siguiente apartado, se realiza la producción continua de varias motocicletas, con el fin de revisar comportamientos del modelo sujeto al sistema de producción cuando se define un tiempo de ciclo a la línea de ensamble y una determina ocurrencia de llegada de objetos a las sub-líneas. Además, permite efectuar análisis correspondientes a mejoras y falencias en la programación de varias unidades, que es la generalidad presenciada en las plantas ensambladoras.

En los resultados presentados en el literal 8.1.1 y el análisis de sensibilidad del literal 8.2 se define una demanda de objetos para la producción de una motocicleta, es decir, los resultados se tornan alrededor de que la línea de ensamble articule una solo motocicleta.

En el análisis que se realizará a continuación y los escenarios que se plantean en función dicho análisis, se define una programación de producción que permita que la línea de ensamble articule 9 motocicletas con los objetos necesarios para el ensamble de las mismas.

Inicialmente, se define un tiempo de ciclo del de la producción de motocicletas, lo que quiere decir, el tiempo en que cada unidad sale del sistema. El tiempo de ciclo de la línea de ensamble es de 2 periodos de tiempo.

Luego, se realiza un proceso de balanceo con respecto a la demanda de objetos de tal manera, que las órdenes que realizan los puestos de trabajo estén asociadas cumplir con el tiempo de ciclo del sistema. Se decide entonces, definir un Lead Time para cada objeto, que representa cada cuantos periodos de tiempo debe ordenarse un siguiente objeto del mismo tipo, para ser articulado con la próxima motocicleta. El tiempo de ciclo del sistema, garantizando la idea del balanceo en la línea de ensamble, establece que todos los objetos tienen un Lead Time de 2 periodos de tiempo.

Por ejemplo un motor ingresa en el periodo 10 para la primera motocicleta. Un segundo motor, debe ingresar en el periodo 12 para la segunda motocicleta y en ese orden hasta la producción de las 9 motocicletas.

Se resalta, que se conservan los demás parámetros que conforman el modelo inicial. El volumen de cada objeto, la cantidad de cajas con las que trabaja el modelo (8) y los muelles para la apertura de las cajas (3).

Sin embargo, es importante hacer la notación que el horizonte de planeación se incrementa para lograr la producción de las 9 motocicletas. Los periodos disponibles en el modelo del presente análisis son 29 unidades de tiempo que permiten a que el proceso de producción se efectué con normalidad y no se presenten errores en cuanto a no tener el tiempo suficiente para realizar la apertura de las cajas y la correspondiente extracción de los objetos que permitan satisfacer la demanda de la línea.

A continuación, se expone el requerimiento de la línea de ensamble para la producción de las nuevas motocicletas.

Tabla 31.1. Requerimientos línea de ensamble nuevo modelo

	1	2	3	4	5	6	7
Llantas					1		1
Retrovisores							
Direccionales							
Cojines							
Protectores							
Motor							
Farolas							
Exosto							
Frenos					1		1
Amortiguadores					2		2
Chasis				1		1	
Guardabarros					1		1
Tanque							1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31.2. Requerimientos línea de ensamble nuevo modelo

	8	9	10	11	12	13	14	15
Llantas		1		1	1	1	1	1
Retrovisores	2		2		2		2	
Direccionales	2		2		4		4	
Cojines			2		2		2	
Protectores			2		2		2	
Motor			1		1		1	
Farolas	1		1		1	1	1	1
Exosto						1		1
Frenos		1		1	1	1	1	1
Amortiguadores		2		2	2	2	2	2
Chasis	1		1		1		1	
Guardabarros		1		1	1	1	1	1
Tanque		1		1		1		1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31.3. Requerimientos línea de ensamble nuevo modelo

	16	17	18	19	20	21	22
Llantas	1	1	1	1	1	1	1
Retrovisores	2		2		2		2
Direccionales	4		4		4		4
Cojines	2		2		2		2
Protectores	2		2		2		2
Motor	1		1		1		1
Farolas	1	1	1	1	1	1	1
Exosto		1		1		1	
Frenos	1	1	1	1	1	1	1
Amortiguadores	2	2	2	2	2	2	2
Chasis	1		1		1		
Guardabarros	1	1	1	1	1	1	1
Tanque		1		1		1	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31.4. Requerimientos línea de ensamble nuevo modelo

	23	24	25	26	27	28	29
Llantas		1		1		1	
Retrovisores		2					
Direccionales		4		2		2	
Cojines		2		2			
Protectores		2		2			
Motor		1		1			
Farolas	1	1	1		1		1
Exosto	1		1		1		1
Frenos		1		1		1	
Amortiguadores		2		2		2	
Chasis							
Guardabarros		1		1		1	
Tanque	1						

Fuente: Elaboración propia.

La planeación de la producción está diseñada para 9 motocicletas, por consiguiente la cantidad de objetos que se tiene en las cajas incrementa de tal manera que se satisfaga el ensamblaje de las 9 motocicletas y no queden objetos sin ser ingresados a la línea de producción.

Tabla 32. Nueva cantidad de objetos

Objeto	Cantidad
Llantas	18
Retrovisores	18
Direccionales	36
Cojines	18
Protectores	18
Motores	9
Farolas	18
Exosto	9
Frenos	18
amortiguadores	36
Chasis	9
Guardabarros	18
Tanque	9

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del modelo representativo asociado al presente análisis, funciona con el mismo esquema discernido en el primer análisis de sensibilidad. Los procesos de apertura de las cajas y satisfacción de la demanda de la línea de ensamble en cuanto a objetos se refiere son a escala de la producción de una motocicleta. La finalidad del presente análisis está enfocada a realizar una agrupación de los objetos en las cajas diferente a la establecida en el modelo

inicial que permita reducir el inventario promedio ponderado que se genera en el proceso productivo.

La producción de un lote con 9 unidades (motocicletas) permite generar un análisis completo sobre el proceso de acumulación de objetos en la línea, ya que el proceso incurre en repeticiones que permiten una continuidad del proceso, lo que estandariza el mismo con unos atributos propios del sistema diseñado. Además, ejemplifica un ambiente real de producción en una planta de ensamble.

Inicialmente, se mantiene la configuración inicial de las cajas, es decir, la agrupación definida en la primera instancia. Sin embargo, se adicionan la cantidad de objetos que se requieren para la producción del lote de unidades.

Tabla 33.1. Contenido de cada caja propuesta 1.

	Llantas	Retrovisores	Direccionales	Cojines	Protectores	Motor
Caja1	9	0	0	0	0	0
Caja2	9	0	0	0	0	0
Caja3	0	18	18	0	0	0
Caja4	0	0	18	0	0	0
Caja5	0	0	0	18	18	0
Caja6	0	0	0	0	0	0
Caja7	0	0	0	0	0	0
Caja8	0	0	0	0	0	9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33.2. Contenido de cada caja propuesta 1.

	Farolas	Exosto	Frenos	Amortiguadores	Chasis	Guardabarros
Caja1	0	0	0	0	0	9
Caja2	0	0	0	0	0	9
Caja3	9	0	0	0	0	0
Caja4	9	0	0	0	0	0
Caja5	0	0	0	0	0	0
Caja6	0	0	9	18	0	0
Caja7	0	0	9	18	0	0
Caja8	0	9	0	0	9	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33.3. Contenido de cada caja propuesta 1.

	Tanque
Caja1	0
Caja2	0
Caja3	0
Caja4	0
Caja5	9
Caja6	0
Caja7	0
Caja8	0

Fuente: Elaboración propia.

En la primera agrupación, resulta un inventario promedio ponderado del proceso de producción igual a 174,4 unidades, un valor alto comparado con el inventario generado a partir de la producción de una única motocicleta. Sin embargo, el valor del inventario promedio ponderado es esperado, ya que las cajas se abren en el orden cronológico del horizonte de planeación de tal manera que se pueda satisfacer la articulación de la primera moto, lo que ocasiona que el resto de objetos del mismo tipo hagan parte del inventario acumulado hasta que cada motocicleta los requiera para su producción. Por ejemplo, la caja 1 se abre para cumplir la entrega de una llanta en el periodo 5, y las 8 llantas restantes quedan a la espera de ser utilizadas por las consecuentes motocicletas. Las llantas entonces, ocupan espacio en los puestos de trabajo durante mayor cantidad de periodos de tiempo y en mayor número con respecto a la instancia inicial. Sí esta situación se presenta con los demás objetos se incurre en crecimiento del inventario promedio ponderado mencionado.

En la segunda propuesta, se decide realizar una configuración de la agrupación de las cajas basada en el volumen de los objetos. Se realiza un proceso intuitivo de organizar los objetos en las diferentes cajas de tal manera que los volúmenes generados por los objetos que los contienen, sin contar la cantidad de objetos sean similares. Se logra entonces, que cada caja tiene una suma de volumen igual a 14 unidades con respecto a las características de los objetos que contiene sin tener en cuenta la cantidad de los mismos.

Tabla 34.1. Contenido de cada caja propuesta 2.

	Llantas	Retrovisores	Direccionales	Cojines	Protectores	Motor
Caja1	0	6	0	0	6	0
Caja2	0	6	0	0	6	0
Caja3	0	6	0	0	6	0
Caja4	6	0	12	0	0	3
Caja5	6	0	12	0	0	3
Caja6	6	0	12	0	0	3
Caja7	0	0	0	9	0	0
Caja8	0	0	0	9	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34.2. Contenido de cada caja propuesta 2.

	Farolas	Exosto	Frenos	Amortiguadores	Chasis	Guardabarros
Caja1	6	0	6	0	3	0
Caja2	6	0	6	0	3	0
Caja3	6	0	6	0	3	0
Caja4	0	0	0	12	0	0
Caja5	0	0	0	12	0	0
Caja6	0	0	0	12	0	0
Caja7	0	5	0	0	0	9
Caja8	0	4	0	0	0	9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34.3. Contenido de cada caja propuesta 2.

	Tanque
Caja1	0
Caja2	0
Caja3	0
Caja4	0
Caja5	0
Caja6	0
Caja7	5
Caja8	4

Fuente: Elaboración propia.

Con la anterior configuración del esquema en que se agrupan las cajas, se incurre en un inventario promedio ponderado de 117,4 unidades, lo que representa una disminución con respecto a la primera propuesta presentada. Con esta agrupación, se logra dividir la cantidad total de cada objeto en 3 o 2 partes iguales lo que permite que no exista la totalidad de los objetos esperando por ser ingresados a la línea de ensamble, sino una tercera o segunda parte de la cantidad lo que ocasiona menor cantidad de objetos ocupando espacio en los puestos de trabajo y por lo tanto la reducción del inventario.

La tercera propuesta se diseña con el propósito de que en cada caja se obtenga los objetos necesarios para ensamblar una moto. Al ser una un lote de producción conformado con 9 motocicletas y tener 8 cajas a disposición, se define una caja

con la capacidad para entregar a la línea de ensamble los objetos requeridos para articular dos motocicletas.

Tabla 35.1. Contenido de cada caja propuesta 3.

	Llantas	Retrovisores	Direccionales	Cojines	Protectores	Motor
Caja1	4	4	8	4	4	2
Caja2	2	2	4	2	2	2
Caja3	2	2	4	2	2	2
Caja4	2	2	4	2	2	2
Caja5	2	2	4	2	2	2
Caja6	2	2	4	2	2	2
Caja7	2	2	4	2	2	2
Caja8	2	2	4	2	2	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35.2. Contenido de cada caja propuesta 3.

	Farolas	Exosto	Frenos	Amortiguadores	Chasis	Guardabarros
Caja1	4	2	2	8	2	4
Caja2	2	1	2	4	1	2
Caja3	2	1	2	4	1	2
Caja4	2	1	2	4	1	2
Caja5	2	1	2	4	1	2
Caja6	2	1	2	4	1	2
Caja7	2	1	2	4	1	2
Caja8	2	1	2	4	1	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35.3. Contenido de cada caja propuesta 3.

	Tanque
Caja1	2
Caja2	1
Caja3	1

Caja4	1
Caja5	1
Caja6	1
Caja7	1
Caja8	1

Fuente: Elaboración propia.

En la tercera propuesta presentada, se obtiene un inventario promedio ponderado de 110,7 unidades. Dicho inventario promedio ponderado es debido a que las cajas son abiertas para cumplir con la demanda de objetos de las motocicletas siguientes. Debido al tiempo de ciclo de cada objeto (2 periodos de tiempo) el modelo debe abrir las cajas que en un principio están diseñadas para la siguiente motocicleta y extraer el objeto que falta (no está en la primera caja) para la articulación de la próxima motocicleta. Por ejemplo, el chasis de la primera motocicleta es requerido en el periodo 4 por tanto se abre una caja que tenga los objetos para la primer motocicleta, sin embargo el chasis de la segunda motocicleta es demandado por la línea en el periodo 6, lo que ocasiona abrir la segunda caja así la primer motocicleta no haya salido del sistema. Lo anterior, ocasiona que los objetos restantes para articular cada motocicleta ocupen espacio en los puestos de trabajo, si bien no se tienen objetos repetitivos, se localizan todos los tipos de objetos para formar una motocicleta.

La cuarta propuesta es preparada con un análisis intuitivo que permite una agrupación de los objetos basada a partir de una configuración de sectores con objetos en determinados periodos de tiempo, es decir, se divide el horizonte de planeación en 8 partes iguales y se agrupan los objetos de cada parte definida en una caja, teniendo de esta manera 8 cajas que agrupan objetos utilizados en un intervalo de tiempo. La división se realiza desde el periodo 4, ya que es el instante en que se ingresa la primera unidad al sistema y se divide en intervalos de tiempo conformados por 3 periodos, a excepción del primer intervalo que es de 4 periodos

de tiempo para ser equivalentes con un horizonte de planeación de 29 periodos de tiempo.

Tabla 36.1. Contenido de cada caja propuesta 4.

	Llantas	Retrovisores	Direccionales	Cojines	Protectores	Motor
Caja1	2	0	0	0	0	0
Caja2	1	4	4	2	2	1
Caja3	3	2	4	2	2	1
Caja4	3	4	8	4	4	2
Caja5	3	2	4	2	2	1
Caja6	3	4	8	4	4	2
Caja7	1	2	4	2	2	1
Caja8	2	0	4	2	2	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36.2. Contenido de cada caja propuesta 4.

	Farolas	Exosto	Frenos	Amortiguadores	Chasis	Guardabarros
Caja1	0	0	2	4	2	2
Caja2	2	0	1	2	2	1
Caja3	1	1	3	6	1	3
Caja4	3	1	3	6	2	3
Caja5	3	2	3	6	1	3
Caja6	3	1	3	6	1	3
Caja7	3	2	1	2	0	1
Caja8	2	2	2	4	0	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36.3. Contenido de cada caja propuesta 4.

	Tanque
Caja1	1
Caja2	1
Caja3	1
Caja4	1
Caja5	2
Caja6	1
Caja7	1
Caja8	0

Fuente: Elaboración propia.

Con la propuesta 4 se registra un inventario promedio ponderado de 23,4 unidades siendo el menor valor entre las propuestas presentadas. La configuración permite que una caja se abra cuando en el horizonte de planeación está definido utilizar los objetos que contiene, por tanto los objetos que quedaran esperando en los puestos de trabajo son pocos en comparación con las propuestas anteriores.

Lo anterior permite inducir que si la planta de ensamble organiza su cronograma de demandas en función al lote de producción que va a realizar, podría generar una agrupación que garantice que los objetos que estén en una caja suplan la demanda de la línea de ensamble un segmento de tiempo, logrando finalmente que no se acumulen objetos de cualquier tipo en los puestos de trabajo. Se tendría que tener en cuenta, la parcialidad de los proveedores en las agrupaciones definidas ya que como se explicó en el desarrollo temático del presente trabajo de grado, los proveedores organizan los objetos en cada caja de tal manera que se reduzcan los costos de transporte, se ocupe la capacidad total de la caja y se garantice la calidad de las características propias de cada producto, por lo tanto deberá existir una negociación que permita alcanzar los objetivos de ambas partes de la cadena de suministro.

9. Conclusiones

- El presente trabajo de grado evidencio un acercamiento con el problema de la acumulación de inventario de producto en proceso en los puestos de trabajo de un ambiente productivo diseñado con la configuración “SpineLayout”. El problema de la acumulación de inventario de producto en proceso es particular y caracterizado en cada organización, debido a la demanda de material que se genera durante la producción según el producto que se esté elaborando. Por lo anterior, se diseñó una metodología que permita interpretar el problema mencionado con el fin de proponer soluciones que mejoren las condiciones de la producción, involucrando factores claves que son comprendidos dentro del problema como el orden y patrón en que llegan los materiales a la línea de producción, el tiempo en que se incurre la ubicación de los materiales en los puestos de trabajo y los recursos con los que cuenta la línea para la manipulación de los recipientes de almacenamiento del material.
- Un sistema de producción que tiene implementado una línea de ensamble con configuración “SpineLayout” es un ambiente productivo con alta capacidad de respuesta con respecto a las modificaciones que se requieran realizar al producto principal. La flexibilidad que caracteriza la configuración “SpineLayout” permite que se efectúen cambios en los puestos de trabajo en cuanto a la ubicación a lo largo de la línea o modificaciones en la planeación de las órdenes de material que exige el producto en su proceso productivo sin afectar el ensamblaje efectivo del producto principal.
- El suministro de materiales a una línea de producción es un campo de estudio que debe ser caracterizado para cada ambiente productivo según los recursos y disponibilidades de los mismos con los que se pueda contar.

El orden y trazabilidad que ofrece un sistema de abastecimiento interno en los sistemas de producción permiten un flujo menos interrumpido de las actividades operativas y una resultante efectividad en la correspondiente utilización del material, por lo cual es importante definir un sistema de manejo de materiales que sea acorde a la capacidad y recursos de la organización, para que de esta manera se complemente con la ejecución de las operaciones en la normalidad.

- El sistema logístico CKD ofrece versatilidad a los procesos de abastecimiento de materiales en los diferentes puestos de trabajo de una línea de producción. Se debe resaltar, que la posibilidad de agrupar materiales y kits para ensamblaje que serán articulados con un mismo producto principal de la línea de ensamble, simplifica procedimientos de búsqueda y alistamiento, priorizando ahora, una corta manipulación de los kits preparados con antelación para ser acoplados con velocidad y precisión al producto principal contribuyendo de esta manera, a un sistema de abastecimiento esbelto, eficaz y autosuficiente.
- Para definir los tiempos de apertura de las cajas CKD que contienen los objetos que deben ser ensamblados con el producto principal de la línea de ensamble, se planteó un modelo de programación lineal, que generó soluciones optimas teniendo en cuenta la demanda de los objetos en la línea de producción, el tiempo que se demora en abrir y extraer el material de las cajas, los recursos disponibles del área de producción para la manipulación y apertura de las cajas, las características físicas que diferencian cada objeto que debe ser suministrado y finalmente, la estructura en la que se agrupan los diferentes objetos en las cajas.
- En los resultados obtenidos, se puede apreciar que se minimizó el inventario promedio ponderado, que es consecuencia del espacio que ocupan los objetos extraídos de sus respectivas cajas durante el tiempo

que esperan por ser ingresados a la línea de ensamble, cumpliendo la respectiva demanda de objetos de la línea de producción, utilizando los recursos disponibles y logrando de esta manera, el ensamblaje de una unidad del producto principal.

- No tener un orden de apertura de las cajas ocasiona que no se garantice un valor estándar para el inventario de producto en proceso, lo cual provoca que existan faltantes o exceso de inventario y a su vez finalmente, se afecta el tiempo de ciclo de las sub-líneas de montaje y de la línea de producción en general.

Bibliografía

- Bulgokava, J. (2013). The model of work in process inventory management of rail cars building company. 129-136.
- C, W. (2014). Simulation-based optimisation of logistics distribution system for an assembly line with path constraints. 3538-3551.
- Carlos Humberto Taborda Sanchez, H. E. (2006). Análisis y mejora de la capacidad a partir del estudio del trabajo y el uso de promodel como herramienta de simulación discreta en la linea de ensamble honda motocicletas de la fabrica nacional de autopartes FANALCA S.A. Calí, Valle del Cauca.
- Dinero*. (2014). Recuperado el 19 de Marzo de 2014, de www.dinero.com/actualidad/nacion/articulo/motocicletas-venden-bien/192394
- Ferreira, L. (2012). Analysis of the influence of the production sequence in an automobile assembly line, modeled as a network of closed-loops. 609-616.
- Laura Carolina Torres, E. C. (2006). Diseño de un sistema de producción en linea acompasado por operarios en el area de ensamble Motopartes-FANALCA S.A. Cali, Valle del Cauca.
- Los dueños de las motos*. (6 de 26 de 2013). Recuperado el 30 de Marzo de 2014, de www.dinero.com
- Saifallah Benjafaar, S. H. (2000). Module layouts. Next generation factory layouts: research challenges and recent progress.
- (2014) El mercado de los CKD y los CBU. Revisado (27 de Mayo del 2014) de <<http://www.portafolio.co/archivo/documento/MAM-2748862>>

2015. División del trabajo. Revisado (7 de Febrero del 2015) de
<<http://www.economia48.com/spa/d/division-del-trabajo/division-del-trabajo.htm>>

Ford, Henry. My Life and Work. 1922.

Rekiek Brahim y Delchambre Alain, "Assembly Line Design", Alemania.
Springer.2006.

(2015) Effect of cognitive automation in a material handling system on
manufacturing flexibility. Revisado (21 de Febrero del 2015) de
<http://www.sciencedirect.com.bd.univalle.edu.co/science/article/pii/S0925527315000304>

Tompkins, James; White, John; Bozer, Yavuz y Tanchoco, J.M.A. Planeación de
instalaciones. Tercera edición. International Thomson Editores. México, 2006.

Dileep, Sule. Instalaciones de Manufactura: Ubicación, planeación y diseño.
Segunda edición. International Thomson Editores. México, 2001.

(2015). Sistema de manejo de materiales. Revisado (1 de Marzo del 2015) de
<https://facilidadesfisicas.files.wordpress.com/2008/08/manejo-de-materiales3.pdf>

(2015). Manejo de materiales. Revisado (3 de Marzo del 2015) de
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7805/Capitulo4.pdf>

(2015) Kanban: control y mejora de procesos. Revisado (4 de Marzo del 2015) de
<http://www.visionindustrial.com.mx/industria/operacion-industrial/kanban-control-y-mejora-de-procesos.html>

(2015) ¿Qué es el Cross Docking? Revisado (4 de Marzo del 2015) de
<http://www.expertoslogistica.com.ar/que-es-el-cross-docking/>

(2015). Cross Docking. Revisado (4 de Marzo del 2015) de <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/log%C3%ADstica/cross-docking/>

(2015). SKU (Stock-keeping unit). Revisado (4 de Marzo del 2015) de <http://searchmanufacturingerp.techtarget.com/definition/SKU-stockkeeping-unit>

(2015) CKD Y SKD. Revisado (8 de Marzo del 2015) de <http://www.logismarket.es/grupo-interpack/ckd-y-skd/1631517254-16696664-p.html>

(2015). La travesía de un automóvil: Embalaje de CKD. Revisado (8 de Marzo del 2015) de <http://tecnicarton.com/la-travesia-de-un-automovil-embalaje-de-ckd/>

Borja, Rocio Mariana (2014). Implementación de un sistema de abastecimiento de materiales CKD (Completely Knocked Down) en la línea de ensamble de vehículos de la empresa MARESA. (Tesis de Postgrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Dispositivo que ayuda a evitar errores. (2015) POKA YOKE. Revisado (8 de Marzo del 2015) de <http://www.leanroots.com/poka-yoke.html>

Justo a tiempo, Se trata de entregar materias primas o componentes a la línea de fabricación de forma que lleguen “justo a tiempo” a medida que son necesarios. (2015). Justo a tiempo (JIT). Revisado (9 de Marzo del 2015) de http://www.ub.edu/gidea/recursos/casseat/JIT_concepte_carac.pdf

Slack, Nigel; Stuart, Chambers y Johnston, Robert. Operations Management. Sexta edición. Prentice Hall. Londres, 2010.

Muda: Cualquier actividad que consume recursos, pero no crea valor para el cliente. (2015).Muda. Revisado (18 de febrero de 2015) de <http://www.manufacturingterms.com/Spanish/Muda.html>

Stevenson, William J. Operations Management. Novena edición. The McGraw-Hill Companies. New York, 2007.

Anexos

Anexo 1. Código en AMPL

- Archivo del modelo.

Conjuntos

set Caj; # Conjunto de cajas con índice i

set Obj; # Conjunto de objetos con índice j

set Tiem; # Conjunto de Tiempos con indice t

set Muelle; # Conjunto de Muelles con indice k

Parámetros

param V{j in Obj} >= 0;

param R{j in Obj, t in Tiem} >= 0;

param C{i in Caj, j in Obj} >= 0;

param LT{i in Caj} >= 0;

Variables

var X{i in Caj, t in Tiem, k in Muelle} >= 0, binary;

var I{j in Obj, t in Tiem} >= 0, integer;

var XS{i in Caj, t in Tiem} >= 0, binary;

var IC{i in Caj, j in Obj, t in Tiem} >= 0;

var Y{i in Caj, k in Muelle} >= 0, binary;

Función Objetivo

minimize inv_prom_pond: $\sum\{j \text{ in Obj}, t \text{ in Tiem}\} (I[j,t]*V[j]) * 1/13;$

Restricciones

subject to abrircajas $\{i \text{ in Caj}\} : \sum\{t \text{ in Tiem}\} (XS[i,t]) \leq 1;$

subject to inventarioinicial $\{j \text{ in Obj}, t \text{ in Tiem}: t=1\} : 0 = I[j,t] ;$

subject to inventario $\{j \text{ in Obj}, t \text{ in Tiem}: t>1\} : \sum\{i \text{ in Caj}\} (IC[i,j,t]) + I[j,t-1] - R[j,t] = I[j,t] ;$

subject to inventariomayorLT $\{i \text{ in Caj}, j \text{ in Obj}, t \text{ in Tiem}: t>LT[i]\} : (C[i,j]*XS[i,t-LT[i]]) = IC[i,j,t] ;$

subject to inventariomenorLT $\{i \text{ in Caj}, j \text{ in Obj}, t \text{ in Tiem}: t\leq LT[i]\} : 0 = IC[i,j,t] ;$

subject to cajasenmuelles $\{i \text{ in Caj}\} : \sum\{k \text{ in Muelle}\} (Y[i,k]) = 1;$

subject to aperturaCompletaenunmuelle $\{i \text{ in Caj}, t \text{ in Tiem}, k \text{ in Muelle}\} : X[i,t,k] \leq Y[i,k];$

subject to cumplirproduccion $\{i \text{ in Caj}, k \text{ in Muelle}\} : \sum\{t \text{ in Tiem}\} (X[i,t,k]) \leq 13 * Y[i,k];$

subject to duracionLeadTime $\{i \text{ in Caj}, t \text{ in Tiem}\} : \sum\{k \text{ in Muelle}, t_2 \text{ in Tiem} : t_2 \geq t \text{ and } t_2 \leq t+LT[i]-1\} (X[i,t_2,k]) \geq (XS[i,t]*LT[i]);$

subject to duracionLeadTimelimitarapertura $\{i \text{ in Caj}, t \text{ in Tiem}\} : \sum\{k \text{ in Muelle}, t_3 \text{ in Tiem} : t_3 \leq t\} (X[i,t_3,k]) \leq \sum\{t_2 \text{ in Tiem} : t_2 \leq t\} (XS[i,t_2]*LT[i]);$

subject to unacajaunmuelleenmismotiempo $\{t \text{ in Tiem}, k \text{ in Muelle}\} : \sum\{i \text{ in Caj}\} (X[i,t,k]) \leq 1;$

- Archivo de datos.

Conjuntos

set Caj := Caja1 Caja2 Caja3 Caja4 Caja5 Caja6 Caja7 Caja8; #cajas

set Obj := llantas retrovisor direccionales cojines protectores motor farolas exosto
frenos amortiguadores chasis guardabarros tanque; # objetos

set Tiem := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13; # Tiempo de producción de la linea,
horizonte en el que se analiza la producción de una moto.

set Muelle := 1 2 3; # número de muelles

Parámetros

param V:=

llantas 4.0

retrovisor 1.0

direccionales 2.0

cojines 3.0

protectores 2.0

motor 6.0

farolas 3.0

exosto 3.0

frenos 1.0

amortiguadores 2.0

chasis 7.0

guardabarros 3.0

tanque 5.0;

param LT:=

Caja1 1.0

Caja2 1.0

Caja3 1.0

Caja4 1.0

Caja5 1.0

Caja6 1.0

Caja7 1.0

Caja8 1.0;

param C: llantas retrovisor direccionales cojines protectores motor farolas exosto
frenos amortiguadores chasis guardabarros tanque:=

Caja1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0

Caja2 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0

Caja3 0 2 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0

Caja4 0 0 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0

Caja5 0 0 0 2 2 0 0 0 0 0 0 0 1

Caja6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 0 0 0

Caja7 0 0 0 0 0 0 0 0 1 2 0 0 0

Caja8 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0;

param R: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13:=

llantas 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0

retrovisor 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0

direccionales 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 2 0

cojines 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0

protectores 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0

motor	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
farolas	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1
exosto	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
frenos	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0
amortiguadores	0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0 2 0
chasis	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
guardabarros	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0
tanque	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;