



Trabajo de grado en modalidad de aplicación

*Propuesta de rediseño de distribución de planta y adecuación
de políticas de inventario para Olitocompu y Olito Editores*

*Ana Carolina López Rodríguez^{a,c}, Alejandra Riaño Martínez^{a,c}, Maria José Vargas
Higuita^{a,c},*

Juan Carlos García Díaz. Ph.D^{b,c}

^a *Estudiante de Ingeniería Industrial*

^b *Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial*

^c *Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia*

Resumen de diseño en Ingeniería

The Facility Layout Planning Problem consists in defining the physical disposition of the elements of a company, such as machines and storage areas. For this, aspects as the minimum area for each machine, the flow of material, the movement of the workers, the mobility restrictions of some machines (because of its conditions, such as weight, size, noise), among others, should be considered.

Olitocompu and Olito Editores are companies that share the same production plant. It has three floors and a complicated infrastructure because some old houses compose it, for this reason, it has a lot of columns, walls, and different obstacles. The infrastructure is the cause for the problems with the available space for materials (raw material, products in process and products). Nowadays, the companies have accumulation of materials, which hinders productive operations due to deficiency of the inventory policies. Therefore, the solution for the facility layout problem is proposed.

The objective of this project is to propose a Plant Layout and an appropriate definition of inventory policies for the companies Olitocompu and Olito Editores, verifying it by simulation methods, to use efficiently the space of the production plant. To obtain the solution, the appropriate capacity for storage through the definition of inventory policies is defined. This is a NP-Hard problem because of the amount of restrictions and variables considered. For this reason, a metaheuristic is developed with the hybridization technique of the genetic algorithm. Finally, the impact of the solution is analyzed through performance indicators obtained from deterministic models of discrete events of the current situation and the proposed situation.

To guarantee good practices, the project is developed according to the standard ISO 13050, through the methodology DMAIC, which has the following phases: Define, Measure, Analyze, Improve and Control. To measure the quality of the obtained solution, it is compared with the current situation through deterministic models of discrete events, with the following performance indicators: distance traveled by the operators, average machine content and average time per queue unit. The metaheuristic is programmed in VBA Microsoft Excel, and deterministic models of discrete events in the software FlexSim.

The results obtained show the importance to make a Plant Layout, taking in account the storage areas defined from the inventory policies; in addition of the other aspects mentioned above. It shows a reduction of 16% in delayed orders in

delivery, 14.8% in distance traveled by operators, 40.6% of the average time per unit in queue and an increase of 11.3% in the average content of the machines.

1. Justificación y planteamiento del problema

Olitocompu y Olito Editores son dos empresas que comparten la misma planta de producción, por lo cual los recursos¹ necesarios para la realización de sus actividades son compartidos entre ellas la mayor parte del tiempo. Adicionalmente, Olitocompu se especializa en la impresión de productos offset siendo el principal proveedor de Olito Editores, empresa dedicada a la fabricación y comercialización de cuadernos y carpetas de línea escolar. Esta relación ha permitido la obtención de ventajas económicas al tener el control de dos eslabones de la cadena de suministro para Olito Editores, y poder manejar un flujo de caja más constante, ya que, por la estacionalidad de la demanda, Olito Editores maneja mayor flujo de capital en el primer semestre del año, caso contrario de Olitocompu, que maneja mayor flujo de capital en el segundo semestre. Se realizó el diagnóstico inicial para las empresas Olitocompu y Olito Editores con el fin de conocer las necesidades y oportunidades de mejora actuales. Se consideran las dos empresas, ya que éstas presentan una estructura de integración vertical.

1.1. DOFA

Ilustración 1. Matriz DOFA de las empresas Olitocompu y Olito Editores

DEBILIDADES	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> Falta de programación de mantenimiento preventivo en las máquinas y equipos, ya que actualmente sólo se realiza mantenimiento correctivo. Lo que tiene como consecuencia la interrupción temporal de la producción. La planta presenta limitación de espacio para el almacenamiento de inventario de materias primas, insumos y productos terminados. No se maneja un control de unidades faltantes y demanda insatisfecha, lo cual es relevante para la programación de la producción. Ausencia de una metodología para definir el stock de seguridad por cliente, ya que presentan exceso de productos obsoletos en inventario (unidades que no son compradas por los clientes). 	<ul style="list-style-type: none"> Vinculación y alianza con más clientes y proveedores a nivel local. La ubicación de las empresas facilita aumentar la comercialización de la marca. Olito Editores está exento del IVA, ya que la materia prima es dedicada a la manufactura de productos escolares.
FORTALEZAS	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> La planta se encuentra ubicada en el Barrio Galán, de Bogotá; esta zona es conocida porque se encuentran varias empresas que hacen parte del mismo mercado, esto facilita el acceso de los proveedores ya que se encuentran ubicados allí o en zonas cercanas. En Olito Editores existe un alto grado de innovación en los diseños de los productos. Las empresas cuentan con alianzas estratégicas con los proveedores facilitando la pronta entrega de materias primas e insumos y la garantía de la calidad de estos. 	<ul style="list-style-type: none"> Las ventas de Olito Editores se realizan sólo en los meses de octubre a febrero para la temporada escolar. Existen muchas empresas enfocadas en el área de litografía, lo que hace que haya alto nivel de competencia para Olitocompu. Alto nivel de competencia en Olito Editores, ya que hay marcas tradicionales de artículos escolares que dificultan abarcar la mayor parte del mercado.

Fuente: Construcción de autores.

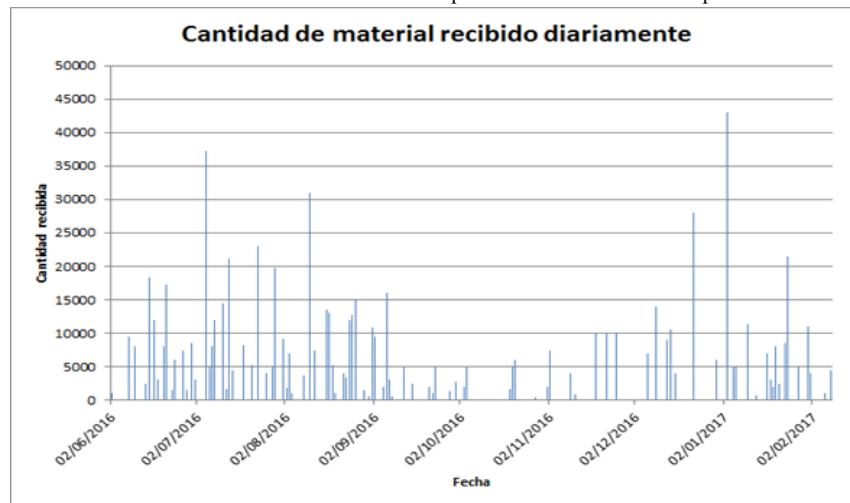
¹ Entre los recursos se consideran empleados, personal administrativo e insumos que se utilizan para ambas empresas.

1.2. Análisis de datos

Teniendo en cuenta la información evaluada en el DOFA, se analiza el Kardex de Olitocompu para identificar con qué frecuencia se realizan pedidos de materia prima e insumos, ya que cuenta con limitaciones de espacio para el almacenamiento de estos.

En el Kardex de Olitocompu se registra la recepción de los pedidos de materias primas por periodos de tiempo, es decir, se piden en ciertos meses del año artículos determinados. En ocasiones, la misma referencia de material se ordena en un lapso de tiempo menor a 5 días por motivos de falta de espacio de almacenamiento, disponibilidad de los proveedores o la variabilidad de la demanda. Adicionalmente, por el tipo de negocio, la producción se realiza por orden de pedido con corto plazo de entrega causando una continua recepción de material (Ver Ilustración 2) para satisfacer los pedidos. Esto hace que se emplee tiempo en la recepción y movimiento de materiales que puede ser aprovechado en las operaciones de producción. En todas las actividades relacionadas a la recepción de material y ubicación en el área de almacenamiento, se tarda alrededor de 30 minutos por pedido considerando que llegan pedidos entre 14 y 15 días al mes. Además, en ocasiones un pedido no se realiza en una sola orden de producción por falta de capacidad para almacenar material en la bodega, lo que conlleva más tiempo de producción a causa de los tiempos de preparación de material y maquinaria.

Ilustración 2. Cantidad de materias primas recibidas de Olitocompu



Fuente: Construcción de autores

Por otra parte, las empresas están funcionando al 100% de su capacidad de producción y sin embargo, se presentan retrasos en la entrega del 82% de los pedidos con un promedio de 5 días de retraso, según los datos obtenidos en el 2016 (Anexo 1).

1.3. Planteamiento del problema

Olitocompu comienza su trabajo a partir de la elaboración de tarjetas, afiches y libretas de impresión litográfica, posteriormente añade otros clientes como comestibles Italo, con los cuales empiezan a trabajar la línea de producción de cajas plegadizas, la que es la línea de producción principal de Olitocompu actualmente. En el año 2000, la empresa que hace algún tiempo había empezado a trabajar en la producción de agendas corporativas, decide incursionar en el mercado de artículos escolares creando una familia de productos de cuadernos cosidos y argollados. Esto provoca un rápido crecimiento de la compañía, que consiste en un aumento del tamaño de la planta de aproximadamente mil metros cuadrados para poder suplir la demanda de estos nuevos productos, el cual se realiza comprando la casa ubicada al lado izquierdo de la planta inicial y la

construcción de un tercer piso especializado en la elaboración de cuadernos, proyecto realizado en el año 2002.

Actualmente, la planta de producción de las empresas consta de 3 niveles, en el nivel 1 (Ilustración 3) se encuentra el área de corte, impresión y troquelado en formato grande de Olitocompu, además se encuentran las dos bodegas donde se almacenan el papel, el almacén de residuos contaminados que son provocados por las máquinas de impresión, el área de alistamientos de pedidos de pronta entrega hacia los clientes y un baño para los trabajadores.

Ilustración 3. Primer nivel de la planta



Fuente: Construcción de los autores.

Ilustración 4. Primer nivel de la planta



Fuente: Tomada por los autores.

En el nivel 2 (Ilustración 5) están ubicadas las diferentes áreas administrativas y áreas de producción. En la zona de producción, se encuentran áreas de operación que hacen parte de las dos empresas, está la zona de acabados de Olitocompu, donde están ubicadas una serie de estanterías con producto terminado de Olitocompu y usualmente hay inventario de devoluciones y material en proceso de Olito Editores. En el área de corte, hay una máquina de corte para formatos de tamaño mediano. Adicionalmente, hay una impresora especializada para la impresión de hojas para el cuaderno ferrocarril, una troqueladora y una zona de almacenamiento de insumos de tintas e insumos de tamaño pequeño.

Ilustración 5. Segundo nivel de la planta



Fuente: Construcción de los autores.

Ilustración 6. Segundo nivel de la planta



Fuente: Tomada por los autores.

En el nivel 3 (Ilustración 7) se encuentra todo lo relacionado con la producción de cuadernos de Olito Editores, dividido en dos zonas principales: una zona para cuadernos cosidos y la otra zona para cuadernos anillados. Alrededor de los puestos de trabajo hay almacenamiento de algunos insumos, como cartón para los cuadernos de pasta dura y se maneja inventario en proceso como carátulas terminadas. Hay un almacén donde se mantienen anillos para la producción de cuadernos, cajas de empaque de producto terminado y los troqueles. En este nivel, también se encuentran las zonas para los trabajadores como la cocina y los casilleros para hombres y mujeres.

Ilustración 7. Tercer nivel de la planta



Fuente: Construcción de los autores

Ilustración 8. Tercer nivel de la planta



Fuente: Tomada por los autores

Existen varias zonas de almacenamiento de inventario: materias primas e insumos, productos en proceso, productos terminados e inventario de las operaciones, tanto de Olitocompu como de Olito Editores en los tres niveles de la planta, por lo tanto, hay bastante flujo de materiales entre las operaciones, y las entradas y salidas de inventario. Además, algunas zonas de almacenamiento no están ubicadas de forma estratégica, estas se encuentran temporalmente en lugares donde hay espacio disponible, ya que no hay mucho espacio en la planta, lo que produce congestión del trabajo en proceso.

En resumen, la planta cuenta con 54 zonas de producción, las cuales están mencionadas en la Tabla 1, y que se podrán redistribuir para mejorar el flujo de material en la producción. Se espera dar un énfasis considerable en las zonas de almacenamiento, dado que cuando llega un pedido de materias primas e insumos, se busca un sitio para la ubicación, por lo que generalmente se deben reubicar las materias primas e insumos de pedidos anteriores. Además, optimizar el espacio en las zonas de almacenamiento es un aspecto que la empresa le ve oportunidad de mejora. Como se verá más adelante en la sección de Antecedentes, es importante determinar el tamaño de las zonas de almacenamiento y de producción, con el fin de asegurar que haya suficiente espacio, mientras las distancias de transporte de materiales sean mínimas de acuerdo con los flujos requeridos. Las políticas de inventarios eficientes permitirán determinar las capacidades adecuadas de las zonas de almacenamiento de materiales a lo largo de la cadena de producción.

Tabla 1. Zonas del área de producción

Piso	Zona	Cantidad
Primero	Almacenamiento	3
	Impresora	3
	Guillotina	1
	Estantería	2
	Troqueladora	2
Segundo	Almacenamiento de trabajo en proceso	2
	Almacenamiento	4
	Estantería	2
	Pegadora	1
	Acabados	2
	Troqueladora	1
	Impresora	1
	Guillotina	1
Total	54	

Piso	Zona	Cantidad
Tercero	Argollado	1
	Almacenamiento	5
	Plegadora	1
	Guillotina	1
	Carátulas	1
	Almacenamiento de trabajo en proceso	5
	Perforadora	2
	Ensamble cosido	1
	Cosedora	1
	Encintado	1
	Prensa	1
	Contadora	1
	Acabados	1
	Estantería	7

Fuente: Construcción de los autores

Por lo tanto, el planteamiento del problema es ¿Cómo rediseñar el esquema de distribución de la planta de producción de Olitocompu y Olito Editores, adecuando las políticas de inventario, para aprovechar eficientemente el espacio mejorando el control y flujo de inventario?

2. Antecedentes

En el diseño de planta para definir la ubicación de las actividades o departamentos de una empresa, se pueden utilizar dos formas, las cuales son: mediante métodos de análisis matemáticos que requieren computadores muy potentes para realizar las complejas iteraciones requeridas y encontrar una solución exacta, o con el uso de algoritmos heurísticos que buscan una solución aproximada dentro de ciertas tolerancias (Collazos, 2013). En años recientes, se ha empezado a trabajar con un nuevo tipo de algoritmos llamados metaheurísticos, definidos por Hillier y Lieberman (2010) como métodos que organizan la interacción entre los procedimientos de mejora local y las estrategias de más alto nivel, para crear un proceso que sea capaz de escapar de un óptimo local y realizar una búsqueda vigorosa de una región factible. Entre estos se encontraron algoritmos como el método de búsqueda tabú, el algoritmo genético, algoritmos basados en colonias de hormigas (ACO), templado simulado y enfoques híbridos, los cuales han sido aplicados en problemas de distribución de planta.

Sin embargo, aunque el rediseño de planta ha sido estudiado desde diferentes enfoques, los más estudiados han sido los de un solo piso, porque al aumentar el número de pisos en un problema de rediseño, se convierte en un problema NP-hard lo cual disminuye el número de investigaciones (Ahmadia, Pishvaei y Akbari, 2017). Aun así, cada día ha aumentado el uso de instalaciones verticales de múltiples pisos principalmente por los altos costos de terrenos en áreas urbanas o por facilidades de producción (Ahmadia, Pishvaei y Akbari, 2017). Por esto, autores como Bukchin y Tzur en 2014 o Anjos, Bernardi y Anjos en 2013, han decidido abordar este tema al igual que los expuestos en el Anexo 1, los cuales evalúan diferentes métodos por los cuáles solucionar este problema.

En el Anexo 1 se puede encontrar una tabla comparativa de diferentes metodologías utilizadas para solucionar el problema de rediseño de planta en múltiples pisos, esta se basa en la tabla encontrada en el artículo “A survey on multi-floor facility layout problems” publicado en 2017 por Ahmadia Abbas, Pishvaei Saman y Akbari Reza, donde se toman en cuenta 11 características de los problemas de distribución de planta en múltiples pisos, las cuáles son:

- El problema es estático o dinámico

- La dimensión de las zonas es un parámetro o una variable
- La ubicación de las zonas es un parámetro o una variable
- Elementos de transporte entre pisos (canales, elevadores y tubos)
- La cantidad de elementos de transporte es un parámetro o una variable
- La posición de elementos de transporte es un parámetro o una variable
- La forma de calcular la distancia entre departamentos
- La formulación es continua o discreta
- Cuál es el objetivo (Mín, Máx, Min-Máx, Max-Mín)
- Método de modelado: Tipo de algoritmo
- Método de modelado: Etapas

Adicionalmente, para poder evaluar qué tan comparable son los modelos al caso real se incluye la variable de número de departamentos para poder hacer una comparación de cuáles son los más similares, la cual se puede encontrar en el capítulo de metodología de este trabajo.

En el diseño de planta se reflejan ciertos aspectos comunes que generan un impacto beneficioso en la implementación de una metodología en una empresa según Leonardo Rivera, Luis Cardona, Laura Palacios y María Rodríguez (2012), el rediseño de distribución implica cambios en la localización de departamentos o áreas de la empresa buscando mantener la estructura general de ésta. El diseño impacta en el flujo de material, manejo de inventario, manejo de desperdicios, lugares adecuados de mantenimiento y las condiciones de los trabajadores. Al mejorar la suficiencia y utilización del espacio se logra impactar en la seguridad industrial y los flujos de producción buscando minimizar los costos de manejo de material y de transporte, ya que se espera mayor flexibilidad en las rutas para la producción, mejorando tiempos de proceso, niveles de inventario de producto en procesos y flujos cruzados o en reversa.

En una empresa de productos alimenticios se aplicó un modelo de gestión de inventarios de revisión periódica S, T, ya que se identificaron falencias en el nivel de servicio por no poseer políticas de inventarios (Vergara et. Al., 2013). Se seleccionó este modelo por su facilidad de implementación y control durante la fase de adaptación de la empresa a la gestión de inventarios, se validó mediante una prueba piloto de 6 semanas pronosticando la demanda de la empresa (estacional) y se obtuvo un incremento en el nivel de servicio para cada período estudiado. Por otra parte, en el artículo “Modelo de revisión periódica para el control del inventario en artículos de demanda estacional, una aproximación desde la simulación”, se estudia el modelo S, T analizando el nivel de servicio para demanda estacional. Y se observa que el modelo S, T presenta un desempeño aceptable para suplir la demanda (Vélez & Castro, 2002).

En el caso de estudio “Re-design warehouse plant layout for a food company” (Vetencourt, 2004) se puede observar la relación de las políticas de inventario con el diseño de la planta. A través de técnicas cualitativas se pueden identificar las necesidades de almacenamiento, los procesos de recepción y los estados del inventario para mejorar indicadores de producción. Para alcanzar la mejor solución de la situación, se considera el rediseño de planta en las zonas de almacenamiento principalmente para lograr promover el uso eficaz del personal, los equipos, el espacio y la producción, teniendo en cuenta las mejoras de las políticas de inventario en el rediseño se disminuyen las distancias recorridas, el retroceso y el tráfico cruzado; aumenta la seguridad y mejora la calidad de los productos y servicios.

Para desarrollar el rediseño de planta de manera satisfactoria, se define cuál es el área necesaria que se debe destinar para las zonas de almacenamiento. Para esto, teniendo en cuenta el tipo de demanda para cada una de las empresas, se agruparon los productos de acuerdo con sus características (Zandin, 2001); y, posteriormente se utilizan las fórmulas de las políticas de inventario seleccionadas, como se describe en el caso de estudio “Evaluation and Optimization of Inventory Policies and Production Layouts in Production Systems” (Järlid y Karlsson)

El desarrollo de un modelo de simulación es útil para observar de manera clara la situación de un proyecto

o empresa en un período de tiempo determinado, tal como se puede evidenciar en el artículo “La simulación con FlexSim, una fuente alternativa para la toma de decisiones en las operaciones de un sistema híbrido” (Simón, Santana, Macías, Piedra, 2013). En este artículo, se desarrolló un modelo de simulación, con el fin de visualizar la situación actual de una empresa productora de lácteos, obtener datos estadísticos, y los tiempos de cada una de las operaciones, para identificar las oportunidades de mejora.

Para desarrollar el modelo de simulación de los procesos, se decide usar FlexSim como herramienta de simulación basado en el estudio de la empresa de lácteos, realizando las modificaciones necesarias para la aplicación en el rediseño de planta y políticas de inventario en empresas pertenecientes a la industria del papel, y, se tendrán en cuenta algunas de las variables propuestas por Moya Marco, Acuña Jorge y Eckelman Carl, en su estudio de redistribución de planta en una empresa de muebles. También se decide tomar como variable estocástica la recepción de los pedidos más importantes tanto de Olitocompu como de Olito Editores, los demás datos son tomados como determinísticos debido a la complejidad del problema y las características de las empresas.

3. Objetivos

Proponer un rediseño de planta y definir políticas de inventarios adecuadas en las empresas Olitocompu y Olito Editores, verificando su viabilidad por medio de métodos de simulación, con el fin de aprovechar eficientemente el espacio, mejorando el control y flujo de inventario.

3.1. Objetivos Específicos

1. Realizar un diagnóstico que incluya los factores que afectan el manejo del inventario, así como las variables, parámetros y restricciones relacionados con el diseño actual de la planta en las empresas Olitocompu y Olito Editores.
2. Plantear políticas de inventario de materiales a lo largo de la cadena de producción (materias primas e insumos, productos intermedios y productos terminados), de tal manera que garanticen un adecuado aprovisionamiento de los recursos, y así mejorar la disponibilidad de estos.
3. Seleccionar, a partir de la literatura existente, e implementar un método de solución para el rediseño de planta que sea adecuado para la empresa.
4. Diseñar y desarrollar un modelo determinístico de eventos discretos en el software FlexSim, para evaluar el impacto de la propuesta de rediseño de planta y las políticas de inventario planteadas.
5. Realizar una evaluación del impacto de la propuesta de rediseño de planta y las políticas de inventario planteadas por medio de indicadores de desempeño.

4. Metodología

A continuación, se presenta la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo del trabajo:

4.1. Levantamiento de información de las empresas Olitocompu y Olito Editores

Para conocer la situación actual de las empresas, se analizan las variables, parámetros y restricciones que están involucradas en las operaciones. Para analizar los parámetros, se toma la base de datos de los pedidos realizados durante dos años y se analizan las referencias de los productos ordenados. Es decir, se revisa qué ruta siguen los pedidos dentro de la planta de producción, las fechas de llegada y salida, y cuál fue la cantidad de material (materias primas e insumos, producto en proceso y producto terminado) transportado entre cada par de zonas (máquinas y zonas de almacenamiento). Y, se calcula el flujo de material entre cada par de zonas, como la suma de la cantidad de material transportado dividido entre la cantidad de meses analizados (Anexo 1). Se debe tener en cuenta que la capacidad de producción de las empresas está al 100%.

Ya que los flujos de material entre cada par de zonas se encuentran en un rango bastante alto ([0, 36.666]), para facilitar el manejo de la información se toman flujos entre [0, 100] conservando la proporción de estos.

También, se realiza un levantamiento de información de los tiempos de procesamiento en las minutas de los operarios, en las que se lleva un registro diario de los tiempos que tardan realizando cada uno de los pedidos (Anexo 1). Se consulta con los operarios los tiempos de alistamiento de cada una de las máquinas al inicio de la jornada laboral, entre pedidos y al finalizar el día. Se realiza un levantamiento de las coordenadas de las zonas (posición actual) y de los obstáculos (paredes, escaleras, columnas, entre otros), para ubicarlos en el desarrollo de la meta-heurística con la técnica de hibridación.

4.2. Políticas de inventario

Para establecer el espacio adecuado para las zonas de almacenamiento, se tiene en cuenta que en Olitocompu se realiza la producción bajo orden de pedido (make to order); por lo tanto, algunos tipos de materias primas e insumos se piden al proveedor sólo cuando se necesitan. Y, por el contrario, en Olito Editores se trabaja por orden de producción (make to stock). Se plantean las políticas de inventarios a las materias primas e insumos de las empresas y se validan aplicando las políticas seleccionadas con los datos históricos de demandas del año 2016 a los productos “A”, obtenidos a partir de la realización de un análisis ABC de inventarios.

El análisis ABC de inventarios consiste en clasificar el inventario según la Ley de Pareto (80-20), en la que se tiene en cuenta su representación en dinero y frecuencia de uso; por lo tanto, los artículos “A” son los que tienen mayor importancia para la empresa (Olivos & Penagos, 2013).

En la validación de las políticas de inventarios se realiza una representación en Excel en donde se busca analizar el comportamiento del inventario inicial, el inventario final, el tamaño del pedido y el tiempo de revisión del nivel de inventario con respecto a los registros de la demanda diaria del año 2016.

Para el almacenamiento de materias primas e insumos, producto en proceso y producto terminado tanto de Olito Editores como Olitocompu, se define el espacio de almacenamiento de acuerdo al número de estibas necesarias para esto.

$$\text{Número de estibas} = \frac{\text{Área de almacenamiento necesario}}{\text{Área de la estiba}}$$

4.2.1. Materias primas e insumos

Para establecer la política o modelo de inventario adecuado para las materias primas e insumos, se tiene en cuenta que las empresas realizan la revisión de inventarios diariamente. A partir de esto, se decide aplicar el modelo de revisión periódica S, T, en donde cada T períodos se revisa el inventario y se pide la cantidad necesaria para llegar al nivel S (Velez y Castro, 2002). Estos cálculos se realizan teniendo en cuenta el nivel de servicio definido por las empresas que es del 95%.

$$S = ss + \mu_{T+\tau}$$

Ss = Stock de seguridad

$\mu_{T+\tau}$ = Media de la demanda durante el periodo de revisión y tiempo de reaprovisionamiento

Se halla el periodo de revisión (T) óptimo a través de la minimización de la función de costos de inventario utilizando la herramienta Solver de Excel. Donde, la función de costos de inventario del modelo S, T, es,

$$G(S, T) = \frac{K}{T} + c\lambda + h\left(\frac{\lambda T}{2} + ss\right) + \frac{p n(S)}{T}$$

K = Costo de ordenar
 c = Costo unitario
 λ = Demanda
 h = Costo unitario * interés
 p = Costo de faltante
 $n(S)$ = Cantidad de faltantes

Para este modelo se consideran los siguientes supuestos,

- La demanda durante el tiempo $T+\tau$ es aleatoria y estacionaria.
- Las órdenes se realizan cada T periodos.
- El tiempo de reaprovisionamiento (τ) es fijo.

Para verificar el supuesto de demanda aleatoria y estacionaria, se realizan pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (Alvarado y Obagi, 2008) en el software IBM SPSS Statistics 24, para saber la distribución estadística de la demanda de cada materia prima e insumo.

Una vez conocida la cantidad máxima a la que debe llegar el inventario (S), se calcula el volumen que ocupan las materias prima e insumos para definir el espacio de almacenamiento necesario. Se tienen en cuenta factores como la cantidad de unidades que se pueden apilar y las dimensiones de las estibas.

4.2.2. *Producto terminado*

Para estimar la capacidad de almacenamiento para producto terminado, se estima el nivel de producción de cada 2 días, ya que en Olitocompu usualmente el pedido se despacha al cliente el mismo día o el día siguiente que es terminada la orden de producción. Y, en Olito Editores se define la capacidad de almacenamiento de la producción diaria de producto terminado, ya que esta cuenta con una bodega externa en la que se almacenan los productos terminados, por lo tanto, al final del día los productos son transportados fuera de la planta en la que se está realizando el estudio.

4.2.3. *Producto en proceso*

Basados en la publicación “Diez elementos claves en el diseño logístico de un CEDI” de la Revista Logística (2016), para determinar el espacio para almacenamiento de producto en proceso se considera el 20% de la capacidad de almacenamiento de producto terminado, la cual se tiene en cuenta en el cálculo del tamaño de las zonas (máquinas) para la solución del rediseño de planta.

4.3. Meta-heurística

Para encontrar una solución al problema de rediseño de planta (múltiples pisos) de las empresas Olitocompu y Olito Editores, se plantea el uso del algoritmo genético; debido a que al estudiar los métodos existentes para solucionarlo (Anexo 2), se encuentra que los métodos con mayor similitud al caso de estudio son los encontrados en la Tabla 2. En estos, se ha demostrado que no es factible utilizar un método de solución exacto ya que es un problema con múltiples variables y restricciones, además, los obstáculos no han sido considerados en los estudios. También, se descarta el uso de la meta-heurística colonia de abejas (ACO) porque no se encuentra información disponible sobre la cantidad de departamentos o zonas para las que se ha aplicado esta metodología, por lo tanto, no hay certeza de que sea aplicable para el caso.

Adicionalmente, se decide dividir el problema en dos etapas. La primera etapa consiste en definir en qué piso de la planta se ubicarán las zonas (máquinas, zonas de almacenamiento), con base en las restricciones de la infraestructura y de las máquinas. En la segunda etapa, se ubican las zonas en los pisos definidos en la

primera etapa (Russell y Yavuz, 1997). Algunas zonas son fijadas en una posición específica porque involucran adaptaciones de infraestructura, controles exhaustivos o cumplimiento de requisitos legales, tales como, el almacén de tintas e insumos, almacén de troqueles, zonas de descanso, zona de lavado de tintas, oficinas y la impresora Speed 72.

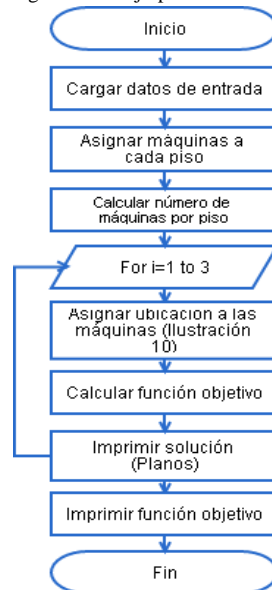
Tabla 2. Comparación modelos de resolución del problema

Referencia	Estático / Dinámico	Departamentos			Movimientos verticales			Distancias	Formulación		Resolución		
		Forma	Dimensiones	Cantidad	Tipo	Número	Posición		(Discreta Continua)	Función objetivo	Método de modelación	Método	Etapas
Nuestro caso	S	Rectangular	Parámetro	56	Elevador	Parámetro	Parámetro	Centro a centro					
Chraibi et al. (2014)	S	Rectangular	Parámetro	-	Elevador	Parámetro	Parámetro	Centro a centro	C	Min, Max	MIP	Exacto	1 (CPLEX)
Hosseini et al. (2013)	S	Rectangular	Parámetro	-	Elevador	Parámetro	Parámetro	Rectilínea	C	Min	OTRO	Heurística	1 (SLP method)
Chang and Lin (2006)	S	Rectangular	Parámetro	30	Elevador	Parámetro	Parámetro	Centro a centro	D	Min	OTRO	Heurística	2 (k-mean algorithm, Genetic algorithm and heuristic rules)
Hu and Lin (2006)	S	Rectangular	Parámetro	-	Elevador	Parámetro	Parámetro	Centro a centro	C	Min	FBS	Metaheurística	1 (Ant colony optimization)

Fuente: Generada por los autores con base en el estudio de Ahmadiya Abbas, Pishvaea Saman & Akbari Reza del 2017.

De esta manera se construye el modelo general (Ilustración 9) para la resolución de problema, el cual comienza ubicando cada máquina en un piso determinado, para luego asignarles una posición en cada piso utilizando el algoritmo genético (Ilustración 10) (Kumar et al., 2016), el cual se basa en la creación de múltiples generaciones (NumG) de soluciones factibles que mejoran progresivamente la solución final.

Ilustración 9. Diagrama de flujo para resolución del problema.



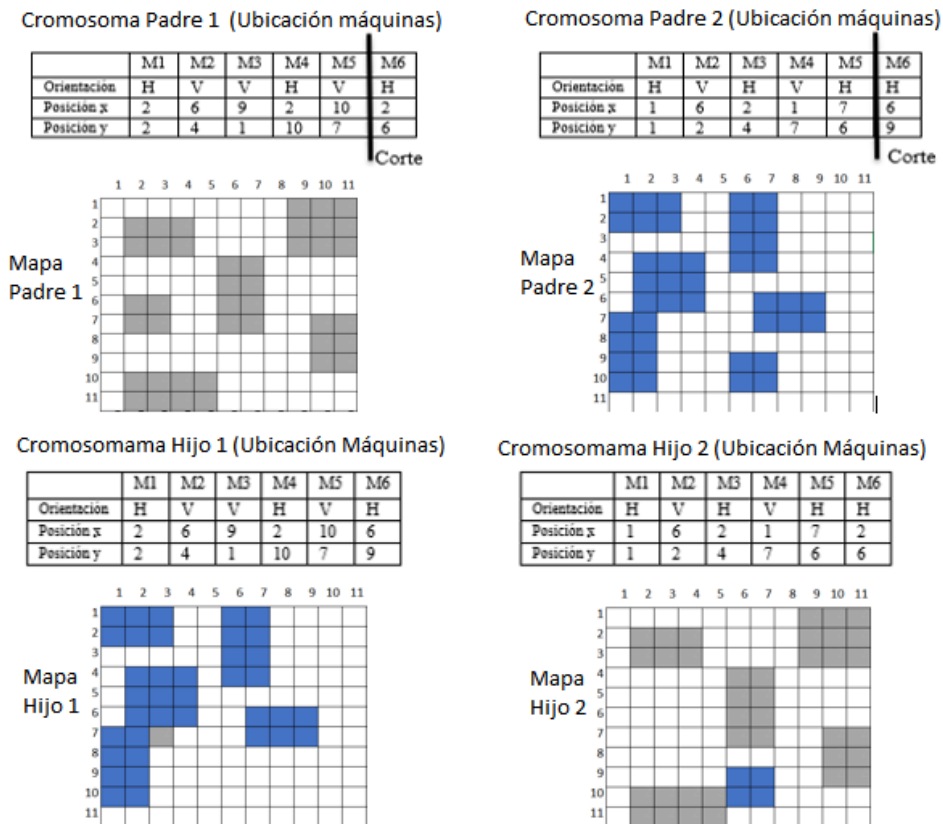
Fuente: Construcción de los autores

La creación de múltiples soluciones factibles se basa en dos actividades principales; la primera consiste en crear una población inicial base de la cual van a surgir las demás poblaciones. Esta población inicial es un conjunto de individuos con cromosomas diferentes, entendiendo que cromosoma en este problema es la ubicación en el plano XY de cada una de las máquinas y almacenamientos, esta ubicación está dada por tres variables que son: orientación de la máquina (Vertical, Horizontal), posición en X y posición en Y. Tomando estas posiciones y el punto de origen del plano desde la esquina superior derecha de cada máquina (Ilustración 11).

La segunda actividad, es la generación de una nueva población basada en la original. Esta generación se basa en cuatro procedimientos (Kumar, 2016) que son: cruce, selección, copia y mutación.

Cruce: Se realiza un cruce de un punto no destructivo, el cual es utilizado en los trabajos presentados por: Aiello G. & Scalia M. (2012), Misola M. & Navarro B. (2013), Kumar R, Kumar R & Bennis F. (2016). y Mazinani M., Abedzadeh M & Mohebal N. (2010) en los cuales se busca una solución a los problemas de redistribución de planta. En este cruce se toma una posición aleatoria entre [1...NumM], se realiza un corte en dos de los individuos seleccionados en la posición aleatoria; y se crean dos hijos combinando la primera parte del primer individuo con la segunda parte del segundo individuo y viceversa, como se ve en la Ilustración 11. Adicionalmente, para garantizar el número de cruces exitosos dada la magnitud del problema, se realizan múltiples iteraciones hasta encontrar un cruce factible para al menos un hijo.

Ilustración 11. Procedimiento de Cruce



Selección: Se realiza la selección por torneo probabilístico en la cual se genera un número aleatorio del intervalo [0...1], si la probabilidad del individuo que se esté evaluando es mayor al aleatorio se escoge este para ser el generador de la siguiente generación.

Copia: Se realiza cuando una de las soluciones originadas por el cruce no es factible, en este caso la solución no factible se reemplaza por una copia del mejor padre.

Mutación: A la mitad de los individuos generados se aplica una mutación que consiste en cambiar la ubicación de una de las máquinas de forma aleatoria y si este cambio mejora la función objetivo se realiza, de lo contrario se deja la solución existente.

Para encontrar la solución más cercana al óptimo por medio del algoritmo genético, se elabora un diseño en cuadro grecolatino (DCGL) donde se toman 10 niveles por cada factor, que en este caso son: el número de la cadena de aleatorios en Visual Basic Application, el número de poblaciones, el número de generaciones y la probabilidad de mutación; y se realiza la matriz de tal manera que cada prueba involucre una combinación de factores diferentes para un total de 100 pruebas, con el fin de evaluar diferentes soluciones que permitan disminuir las distancias entre máquinas considerando los flujos de materiales entre estas.

Los niveles que se toman para el número de la cadena de aleatorios son del -100 al -10, para el número de poblaciones son del 100 al 190, para el número de generaciones son del 55 al 95, y para la probabilidad de mutación son del 5% al 50%. Para los dos primeros factores se toman los valores en intervalos de 10 unidades y para los otros dos factores se toman valores en intervalos de 5 unidades.

4.4. Modelo determinístico de eventos discretos

Para medir el impacto de la solución, se realiza un modelo determinístico de eventos discretos de las empresas Olitocompu y Olito Editores en el software FlexSim, tanto de la situación actual como de la solución propuesta. Se tienen en cuenta:

- La dimensión de la planta: Se consideran las medidas reales de la planta y la ubicación de los obstáculos, las máquinas y zonas de almacenamiento.
- Zonas: Son las áreas requeridas para las zonas de almacenamiento y las máquinas, las cuales incluyen la dimensión de la máquina, las indicaciones de espacio necesario definido por el manual (instructivo) de cada una y el espacio para almacenamiento de producto en proceso.
- Los tiempos de procesamiento y de alistamiento de cada máquina: Se consideran los tiempos de cada pedido registrados por las empresas, ya que hay una gran variedad de referencias. Los tiempos de procesamiento dependen del tamaño y tipo de pedido, y los tiempos de alistamiento dependen de factores como el número de tintas necesarias para la impresión y el tamaño de los troqueles.
- Número de operarios: Cada máquina cuenta con un trabajador para su operación y además considera el personal necesario para los transportes de materiales, productos en proceso y productos terminados.
- Los pedidos: Para el modelo se toman 498 pedidos con su respectivo orden de llegada. Cada uno tiene un tamaño específico de unidades y un recorrido (ruta) que se observa en la Tabla 3, es decir, cada pedido tiene una secuencia la cual indica por qué máquina debe ser procesado. Hay pedidos que presentan la misma ruta.
- Tiempo de ejecución: El modelo se ejecuta para siete meses, el cual se toma un mes como período de calentamiento.
- Validación del modelo de la situación actual: Se verifica que las fechas de salida de los pedidos obtenidas en el modelo en FlexSim correspondan a las fechas de salida registradas en las empresas.

Tabla 3. Rutas de proceso

Ruta	Guillotina	Speed 76	Speed 102	SMRZ	Troqueladora	Estampado	Pegue	Acabados	Contadora	Carátulas	Mesa Cosido	Perforado	Mesa largollado	Máquina de coser	Cintas	Troqueladora cuadernos	Plegadora	Prensa	Trifiladora	Acabados cosido	
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					

Fuente: Construcción de los autores

Para realizar el modelo determinístico de eventos discretos de la propuesta de rediseño de planta en el software FlexSim, se cambia la ubicación de las máquinas y zonas de almacenamiento según la solución arrojada por la meta-heurística. Adicionalmente, se implementan las políticas de inventarios propuestas para la llegada de diez materias primas e insumos de categoría “A” (análisis ABC) y se consideran los espacios de almacenamiento obtenidos a partir de las políticas.

4.5. Medición del impacto de la propuesta

Para medir el impacto de la propuesta se realiza una comparación con el modelo determinístico de eventos discretos de la situación actual y la solución propuesta, obteniendo a través del software Flexsim los siguientes indicadores de desempeño: distancia recorrida por los operarios, contenido promedio de las máquinas y tiempo promedio por unidad en cola.

Se seleccionan los indicadores de desempeño para evaluar los transportes de los operarios entre cada par de zonas y conocer el flujo de material en las colas; y así determinar si la propuesta genera un impacto positivo en el porcentaje de ocupación de las máquinas que se relaciona con el porcentaje de entrega de pedidos a tiempo.

5. Componente de Diseño en ingeniería

5.1 Declaración de Diseño: Para el desarrollo del rediseño de planta y la definición de las políticas de inventario, se trabaja como diseño principal la meta-heurística con técnica de hibridación, la cual es definida

con ayuda de la literatura existente para obtener una solución del rediseño de planta con el objetivo de disminuir la distancia recorrida por los operarios en los transportes de material, agilizar los procesos, y así mejorar el desempeño de las empresas Olitocompu y Olito Editores. Las políticas de inventario para las materias primas e insumos, los productos en proceso y los productos terminados se establecieron con el fin de definir el espacio necesario para el almacenamiento para incluirlo en la solución del rediseño de la planta.

Se desarrollan modelos determinísticos de eventos discretos en el Software FlexSim para la situación actual de las empresas y para la situación propuesta, y así analizar los indicadores de desempeño.

5.2 Proceso de Diseño: Se inicia con el planteamiento de los espacios de almacenamiento definiendo políticas de inventario para materias primas e insumos, productos en proceso y productos terminados; teniendo en cuenta las condiciones del flujo de los pedidos y el nivel de producción establecido por las empresas.

Después, se programa la meta-heurística con la técnica de hibridación, en la que se garantiza la factibilidad de la solución obtenida según las restricciones del problema. Posteriormente, en el software FlexSim, se realizan los modelos determinísticos de eventos discretos para la situación actual de las empresas y de la situación propuesta, con el fin de medir el impacto de la propuesta presentada a través de indicadores de desempeño.

5.3 Requerimientos de desempeño: La solución propuesta mejora las falencias de las empresas relacionadas con el manejo de inventarios y la mejora del flujo de material durante la producción. Para esto, se tienen en cuenta los siguientes indicadores de desempeño: distancia recorrida por los operarios, contenido promedio de las máquinas y tiempo promedio por unidad en cola.

5.4 Pruebas de rendimiento: Para comprobar que la meta-heurística arroja una solución de mejora adecuada para la implementación en las empresas Olitocompu y Olito Editores, se desarrollan modelos determinísticos de eventos discretos para la situación actual y la solución propuesta, y se comparan entre sí mediante los indicadores de desempeño. Para validar que el modelo determinístico de eventos discretos de la situación actual representa la realidad, se introducen en el modelo los pedidos que llegaron en un período de 7 meses y se verifica el día de llegada y de salida de estos.

Para verificar que las políticas de inventario sean adecuadas, se realiza una simulación en Excel de entradas y salidas de insumos según la demanda diaria durante 6 meses; y, se verifica que se cumpla el nivel de servicio del 95%, el cual fue definido por las empresas.

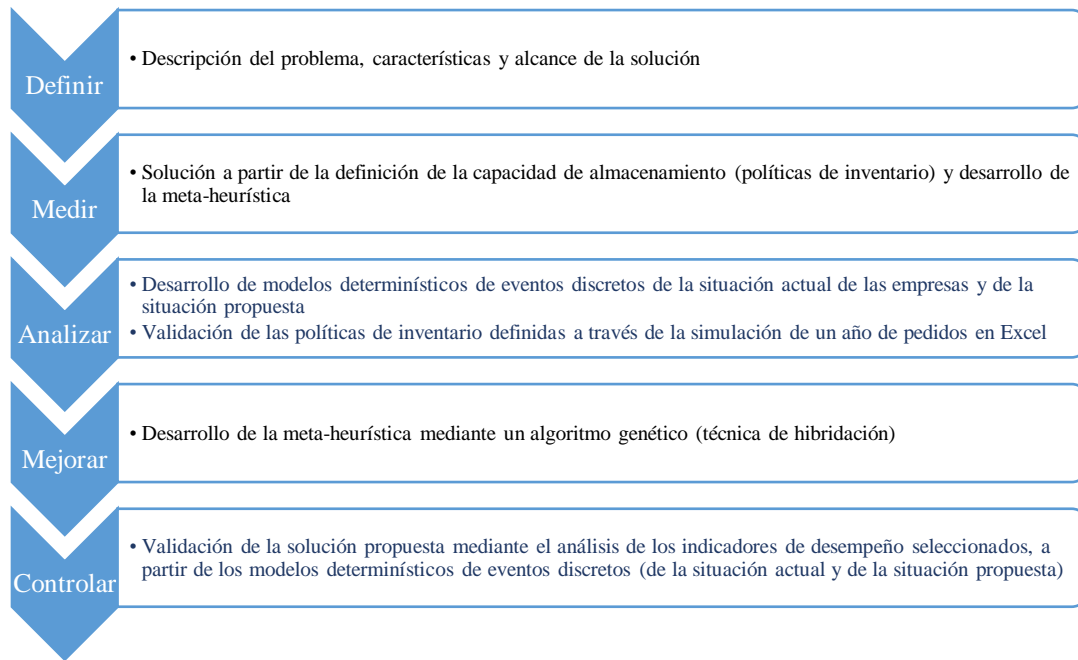
5.5 Restricciones: Para garantizar que la solución obtenida es factible se deben tener en cuenta las siguientes restricciones:

- Por políticas de las empresas y características de las máquinas no es posible cambiar de ubicación o de piso algunas estaciones de trabajo.
- El dimensionamiento de la planta, ya que no se permitieron cambios en la infraestructura. Se tuvo en cuenta que la planta tiene obstáculos fijos como columnas, paredes, escaleras, entre otros.
- El flujo de materiales entre estaciones de trabajo de acuerdo a las secuencias de producción de los artículos.
- El área mínima de cada estación de trabajo, según los manuales de las máquinas y el espacio requerido para la circulación del personal.

5.6 Cumplimiento del estándar: La norma y estándar para el proyecto, para garantizar las buenas prácticas, es la ISO 13053 (INEN, 2014); la cual consiste en la aplicación de métodos cuantitativos para velar

por la mejora continua de los procesos mediante la metodología DMAIC, la cual se aplicó de la siguiente manera:

Ilustración 12. Metodología DMAIC



Fuente: Construcción de los autores

6. Resultados

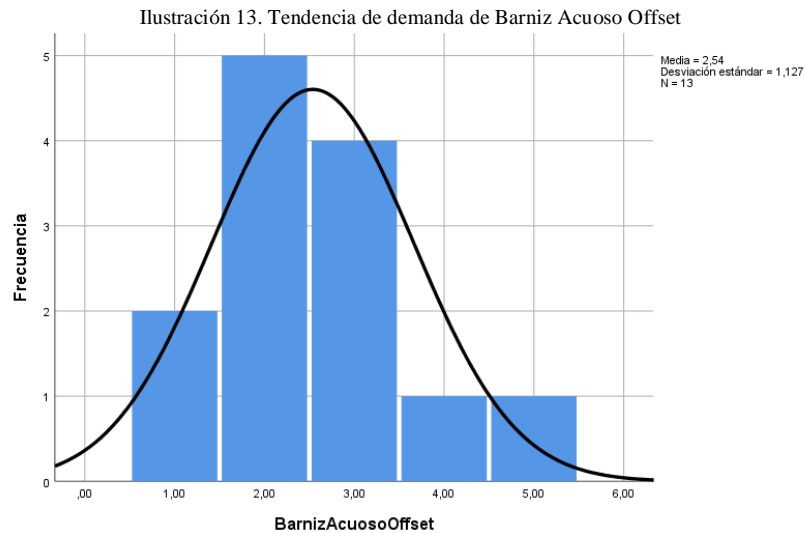
6.1 Levantamiento de información

A partir del levantamiento información se obtiene:

- Factores: Existen condiciones especiales para el manejo de inventario ya que algunos se ven afectados por aspectos ambientales como son la temperatura y la humedad.
- Parámetros: Para la solución del problema se conocen los flujos de material entre cada par de zonas, la demanda de los clientes y los tiempos de procesamiento y alistamiento para cada una de las máquinas dependiendo del tipo de producto ordenado. Se toman tiempos determinísticos ya que la variabilidad de los tiempos entre pedidos es muy baja.
- Variables: Se busca conocer la ubicación y orientación de las máquinas en la planta para minimizar los flujos de material entre cada par de zonas. Asimismo, se busca conocer la cantidad adecuada de pedido para las materias primas e insumos, con el fin de determinar espacios de almacenamiento para mejor aprovechamiento del espacio.
- Restricciones: Por petición de las empresas, se debe conservar la infraestructura actual de la planta por lo que se tienen en cuenta los obstáculos (columnas, paredes, escaleras, entre otros) para el desarrollo del rediseño. Además, se deben considerar las características de las máquinas ya que algunas no se pueden cambiar de piso por factores como peso, tamaño y exigencias de las empresas.

6.2 Política de inventario y capacidad de almacenamiento definida

Se realizan pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (Anexo 3) para la demanda de las materias primas e insumos en los meses evaluados, dando como resultado la tendencia a una distribución estadística normal. En la Ilustración 13 se observa el comportamiento de la demanda del material *Barniz Acuoso Offset*, y así mismo se aproxima el comportamiento de los demás materiales estudiados.



Fuente: Construcción de los autores

Al evaluar las condiciones de los inventarios y definir la política para cada tipo de inventario: materia prima e insumos, producto en proceso y producto terminado (Anexo 4); tanto para Olitocompu como Olito Editores, se determina la respectiva capacidad para estos. Los resultados son los siguientes:

Tabla 4. Políticas de inventario para materia prima e insumos

MATERIA PRIMA E INSUMOS		
OLITOCOMPU		
Descripción	S	T (Días)
MAULE C 14	5.980	7
MAULE C 16	5.247	7
BAJA DENSIDAD 300 gr	7.912	7
MAULE C 12	6.553	10
AMERICA C12	4.141	7
MAULE C 18	3.795	9
PROPALCOTE 200 gr	3.468	8
BOND 90 G	2.217	6
PROPALCOTE 90G	2.974	8
BOND 70	5.458	10
BAJA DENSIDAD 320G	4.043	14
BRISTOL 150G	2.870	11
ADHESIVO SEGURIDAD	438	10
PROPALCOTE 115G	2.891	11
BOND 60 G	4.071	12
ADHESIVO CORRIENTE	292	11
BOND 75 G	2.230	12
MANIFOL BLANCO	2.634	12
TINTAS		
AMARILLO FLINK SPEED 700 PLUS	11	8
MAGENTA FLINK SPEED 700 PLUS	13	10
MAGENTA RODAMINE	3	10
CYAN FLINK SPEED 700 PLUS	9	9
PURPURA ESPECIAL 102	7	10
NEGRO FLINK SPEED 700 PLUS	7	10
AZUL ESPECIAL 102	7	10
AMARILLO UV	4	17
BLANCO OPACO UV	3	15
ROJO ESCARLATA	3	15
CYAN UV	2	16
MAGENTA UV	3	20
MAGENTA FLUORESCENTE	2	21
VERDE FLUORESCENTE	3	22
AMARILLO FLUORESCENTE	3	23
AZUL BRONCE	3	20
BLANCO TRANSPARENTE PRAIMER UV	3	24
ROJO INDIO	3	22
NEGRO UV	3	24
ROJO ESCARLATA 032 UV	6	31
NARANJA BASICO	3	23
PURPURA 51511	24	57
VERDE BASICO	4	30
NARANJA FLUORESCENTE	6	41
OTROS INSUMOS		
BARNIZ BRILLANTE UV (OFFSET)	2	8
PEGANTE GOMA ANIMAL	99	11
POLYL 500	1	8
BARNIZ UV MATE SICURA	5	10
BARNIZ UV MATE	9	9
SUSTITUTO DE ALCOHOL	61	11
PEGANTE - POLY ACRYL 136	2	12
MANTILLA 64x74 FIBRA X 64	2	11
CINTA ANCHA CON LOGO	49	11
POLYL PC-39	3	16
PASTA ORO 54123 - 871C	3	19
CINTA DOBLE FAZ AMARILLA 6 MM	34	17
LIMPIADOR CPC PLATE	2	17
BARNIZ ACUOSO OFFSET	3	20
POLVO ANTIRREPINTE FLUMIX C.35	2	19
CINTA DOBLE FAZ AMARILLA 12 MM	13	23
GOMA GL-116	7	36
PASTA ANTITACK	6	40
CINTA TRANSPARENTE	23	39
SPRAY ANTISECANTE	7	46
CINTA DE ENMASCARAR	8	47
POLVO ANTIRREPINTE FLUMIX C.25	8	52

MATERIA PRIMA E INSUMOS		
OLITO EDITORES		
Descripción	S	T
BOND 60 GR	5.339	6
ADHESIVO ACTIVE (ALBUM)	1.095	5
PROPALCOTE 115G	1.993	5
MAULE C 18	1.083	6
OTROS INSUMOS		
CINTA ROJA PARA LOMO	287	12
CINTA NEGRA PARA LOMO	201	14
CINTA AZUL PARA LOMO	304	18
HILO BLANCO X 5000MTS	5	16
ESPONJAS VISKOVITA	5	29
PAÑOS WYPALL	610	46

Descripción	S	T
CAJAS DE EMPAQUE	923	5

Fuente: Construcción de los autores

Tabla 5. Capacidad de almacenamiento

MATERIA PRIMA E INSUMOS		
Descripción	Espacio para almacenamiento (m)	Número de estibas
PAPEL OLITOCOMPU	17,48 x 1,1	23
PAPEL OLITO EDITORES	4,56 x 1,1	6
TINTAS	3,8 x 1,1	5
OTROS INSUMOS OLITOCOMU	13,68 x 1,1	18
OTROS INSUMOS OLITO EDITORES	3,04 x 1,1	4
CAJAS DE EMPAQUE	3,8 x 1,1	5

PRODUCTO TERMINADO		
Descripción	Espacio para almacenamiento	Número de estibas
OLITOCOMPU	6,84 x 1,1	9
OLITO EDITORES	4,56 x 1,1	6

PRODUCTO EN PROCESO		
Descripción	Espacio para almacenamiento	Número de estibas
OLITOCOMPU	1,52 x 1,1	2
OLITO EDITORES	1,52 x 1,1	2

Fuente: Construcción de los autores

Las políticas de inventario se aplican a las materias primas e insumos de las empresas Olitocompu y Olito Editores. Al realizar la validación de las políticas de inventario se realiza una representación de la llegada de los pedidos en Excel para las materias primas e insumos que corresponden al 80% según el impacto en las empresas (Tabla 6). A partir de esto, se observa que las políticas de inventarios definidas logran satisfacer las necesidades de las empresas como en el ejemplo presentado en la Tabla 7, en donde se suple la demanda diaria con la cantidad de material ordenado hasta llegar al nivel S con la revisión de inventario cada T períodos, que en este caso se representan en días. La validación y el análisis ABC de inventarios se encuentra en el Anexo 4.

Tabla 6. Análisis ABC de inventarios

Análisis ABC de inventarios - 2016					
Artículo	Demanda MENSUAL	Valor artículo	Valor total	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Cajas Empaque	1230	\$ 1,567	\$ 23,134,600	2.89%	2.89%
MAULE C 14	17157.33333	\$ 630	\$ 129,709,440	16.20%	19.09%
MAULE C 16	11283.75	\$ 733	\$ 99,251,865	12.40%	31.48%
BAJA DENSIDAD 300 gr	11635.58333	\$ 594	\$ 82,938,438	10.36%	41.84%
MAULE C 12	9086.66667	\$ 630	\$ 68,695,200	8.58%	50.42%
AMERICA C12	9008.16667	\$ 520	\$ 56,210,960	7.02%	57.44%
MAULE C 18	5748.33333	\$ 807	\$ 55,666,860	6.95%	64.39%
PROPALCOTE 200 gr	7456.58333	\$ 482	\$ 43,128,878	5.39%	69.78%
BOND 90 G	10970.83333	\$ 210	\$ 27,646,500	3.45%	73.23%
PROPALCOTE 90G	6025	\$ 239	\$ 17,279,700	2.16%	75.39%
Barniz Brillante UV	2.91666667	\$ 391,460	\$ 13,701,100	1.71%	77.10%
Pegante Goma Animal	115.833333	\$ 9,500	\$ 13,205,000	1.65%	78.75%
BOND 70	6196.75	\$ 171	\$ 12,715,731	1.59%	80.34%

Fuente: Construcción de los autores

Tabla 7. Validación de las políticas de inventario del papel Maule C14

MAULE C 14

T	7
S	5.980

Días	Días pedido	¿Llega pedido?	Inventario inicial	Demanda	Inventario Final	Faltantes	¿Pedido?	Cantidad pedido
0	0	0	0	0	0	0	1	5980
1	7	1	5980	3650	2330	0	0	0
2	6	0	2330	2300	30	0	0	0
3	5	0	30		30	0	0	0
4	4	0	30		30	0	0	0
5	3	0	30		30	0	0	0
6	2	0	30		30	0	0	0
7	1	0	30		30	0	1	5950
8	7	1	5980		5980	0	0	0
9	6	0	5980	1800	4180	0	0	0
10	5	0	4180	650	3530	0	0	0
11	4	0	3530	2230	1300	0	0	0
12	3	0	1300		1300	0	0	0
13	2	0	1300		1300	0	0	0
14	1	0	1300		1300	0	1	4680
15	7	1	5980		5980	0	0	0

Fuente: Construcción de los autores

6.3 Solución de la meta-heurística

Al aplicar un diseño en cuadro grecolatino (Anexo 5) para encontrar la combinación de los parámetros (la cadena de aleatorios , el número de poblaciones, el número de generaciones y la probabilidad de mutación) que brinden la solución más cercana al óptimo del algoritmo genético, se obtienen los resultados que se observan en la Tabla 8.

Tabla 8. Pruebas parámetros algoritmo genético

Generaciones	Número de poblaciones									
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
50	37140	35390	37460	36850	38790	36080	33970	36370	37980	35700
55	37100	35750	35640	38610	30960	37710	36880	36310	35700	36670
60	35550	37030	39690	36040	37980	37310	38320	37610	35030	33120
65	38450	34170	36910	35000	34000	37800	36850	35570	38010	33040
70	35110	39430	36110	36390	39680	35030	36260	39230	38450	36420
75	34910	35260	36500	34750	36180	37420	36480	37730	37710	38980
80	36700	33720	33960	32150	37340	36510	36850	34700	37020	36410
85	36870	35330	32130	32180	36110	36110	35110	36990	35740	35990
90	35740	37800	37380	39200	33680	36960	36209	35432	39480	33610
95	35020	36130	35650	35740	35560	34240	36510	35630	33120	37860
Aleatorio	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
Probabilidad	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%

Fuente: Construcción de los autores

Con estos resultados se encuentra que el parámetro número aleatorio cambia el resultado de la Función objetivo, a un nivel de significancia del $\alpha=0,05$. Además, se concluye que los parámetros número de

poblaciones, probabilidad de mutación y número de generaciones no tienen un efecto importante, puesto que su correspondiente valor-p es mayor que 0.05, como se puede ver reflejado en la Tabla 9.

Tabla 9. Pruebas parámetros algoritmo genético

<i>Parámetros</i>	<i>SC</i>	<i>GL</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>P - value</i>	<i>Resultado</i>
Aleatorio	88926583.69		9	9880731.52	4.258.694.575	0.00024152 NO RECHAZA
Generaciones	35699693.29		9	3966632.59	1.709.658.505	0.10539024 RECHAZA
Poblaciones	11474835.69		9	1274981.74	0.549529943	0.83252347 RECHAZA
Probabilidad	25574741.69		9	2841637.97	1.224.774.518	0.2963181 RECHAZA
Error	146168285.8		63	2320131.52		
Total	307844140.2		99	3109536.77		

Fuente: Construcción de los autores

Los parámetros que se modifican son los presentados en la Tabla 10, la cual refleja los parámetros con los que se obtiene la mejor solución encontrada para la propuesta de rediseño de planta. Para esta solución, los parámetros tomados en cuenta son el número de la cadena de aleatorios en Visual Basic Application, el número de poblaciones, el número de generaciones y la probabilidad de mutación.

Probabilidad de mutación: Se escoge una probabilidad de mutación del 25%, la cual es mayor a la comúnmente utilizada de 2% (Gestal); ya que la mutación seleccionada estudia los cambios en la posición de las máquinas, evalúa si estos cambios mejoran la función objetivo y realiza cambios en la solución sólo cuando esta evaluación sea favorable. Es decir que, por la complejidad del problema por sus restricciones, es difícil encontrar una buena solución factible con una menor probabilidad de mutación.

Aleatorio: Ya que, para la generación de la población inicial como los cruces de las nuevas generaciones, se utilizan valores aleatorios generados por el software sobre el cual se está trabajando (Excel Visual Basic), este ofrece una opción para el programador de fijar un número negativo de $[0...-\infty]$ del cual va a depender que la cadena de número aleatorios sea la misma cada vez que se ejecute el código. Esto trae como resultado que sea un parámetro determinante en el código, debido a que su cambio afecta todo el algoritmo produciendo cambios significativos.

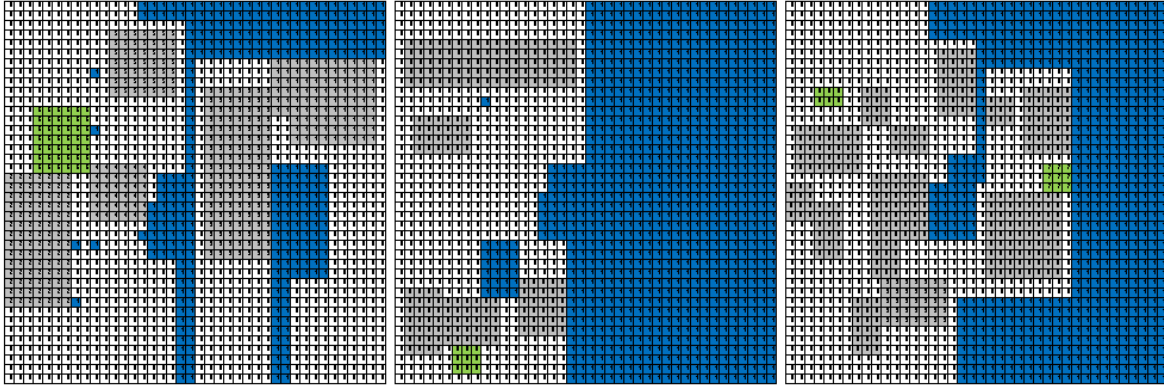
Tabla 10. Parámetros algoritmo genético

Numero de poblaciones	Numero de generaciones	Probabilidad de mutación	Aleatorio	FO piso 1	FO piso 2	FO piso 3	Resultado final
140	55	0.25	-80	15515	2815	12630	30960

Fuente: Construcción de los autores

Finalmente, por medio del algoritmo desarrollado (Anexo 6) se obtiene la solución presentada en la Ilustración 14, en la cual se puede identificar la propuesta final de ubicación de maquinaria en Olito Editores y Olitocompu para cada piso. Las áreas de color gris representan las zonas de trabajo o máquinas, las zonas verdes son áreas de almacenamiento determinadas por el estudio de políticas de inventario realizado y las áreas azules corresponden a los espacios no disponibles u obstáculos del problema.

Ilustración 14. Solución final Meta-heurística



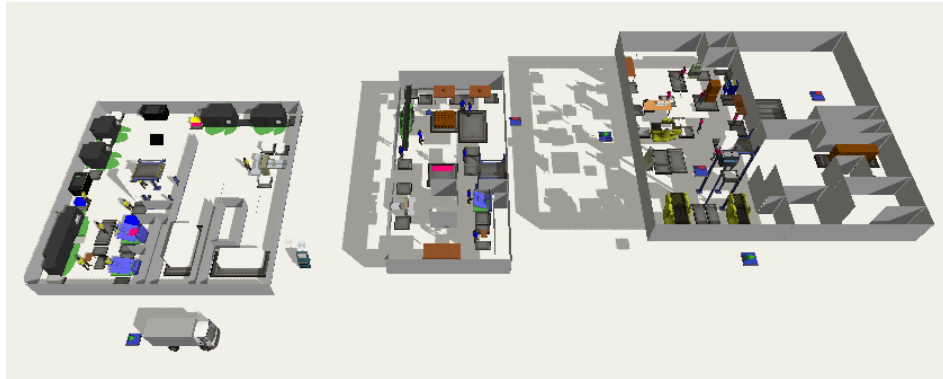
Fuente: Construcción de los autores

6.4 Modelos determinísticos de eventos discretos

En los modelos determinísticos de eventos discretos es posible observar los recorridos de cada pedido, en la planta de las empresas, desde la llegada de las materias primas e insumos hasta la salida del producto final. Estos recorridos muestran el paso por las máquinas, desplazamientos de los operarios y zonas de almacenamiento necesarias para la producción, que a su vez involucra el transporte de los pedidos entre pisos.

En la Ilustración 15 se puede observar el diseño de la planta en el modelo determinístico de eventos discretos, en FlexSim, de la situación actual de la empresa (Anexo 7).

Ilustración 15. Simulación configuración actual



Fuente: Construcción de los autores

En la Ilustración 16 se puede observar el rediseño de la planta en el modelo determinístico de eventos discretos, en FlexSim, de la solución propuesta (Anexo 8) obtenida por la meta-heurística.

Ilustración 16. Solución propuesta



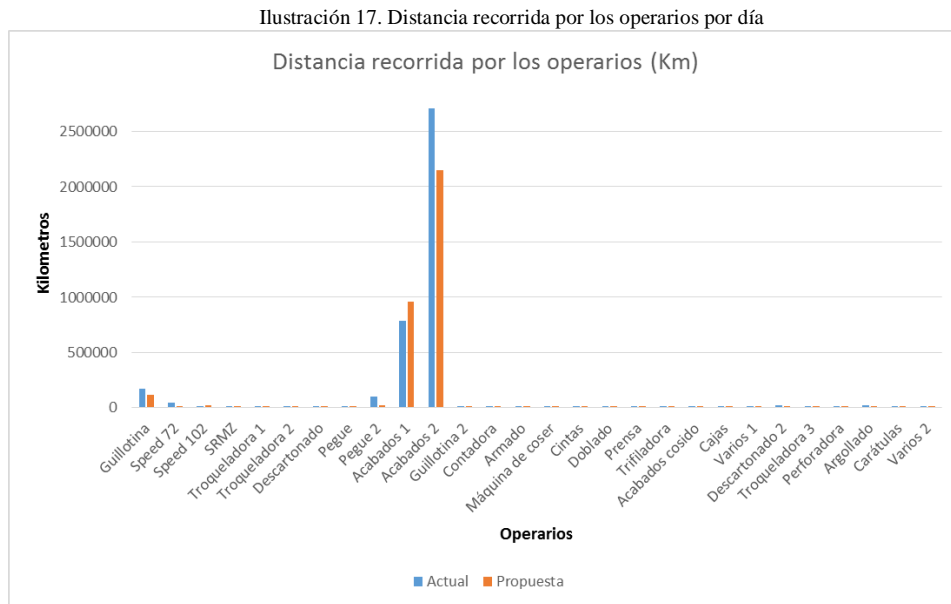
Fuente: Construcción de los autores

6.5 Impacto de la propuesta

Al ejecutar el modelo determinístico de eventos discretos de la situación actual y de la solución propuesta, se comparan los siguientes indicadores (Anexo 9) obtenidos por medio de FlexSim:

- Distancia recorrida por los operarios: En el modelo de la situación actual se observa que las distancias recorridas por los operarios se encuentran entre un rango de 30 km y 2706570 km en los 6 meses, estas incluyen los desplazamientos para transportar el material y realizar las operaciones. En la solución propuesta se observa que las distancias recorridas por los operarios están entre 25 km y 2148410 km en los 6 meses.

Al analizar la diferencia de la distancia recorrida por cada operario (Ilustración 17), se obtiene una reducción total del 14,8% con la solución propuesta.

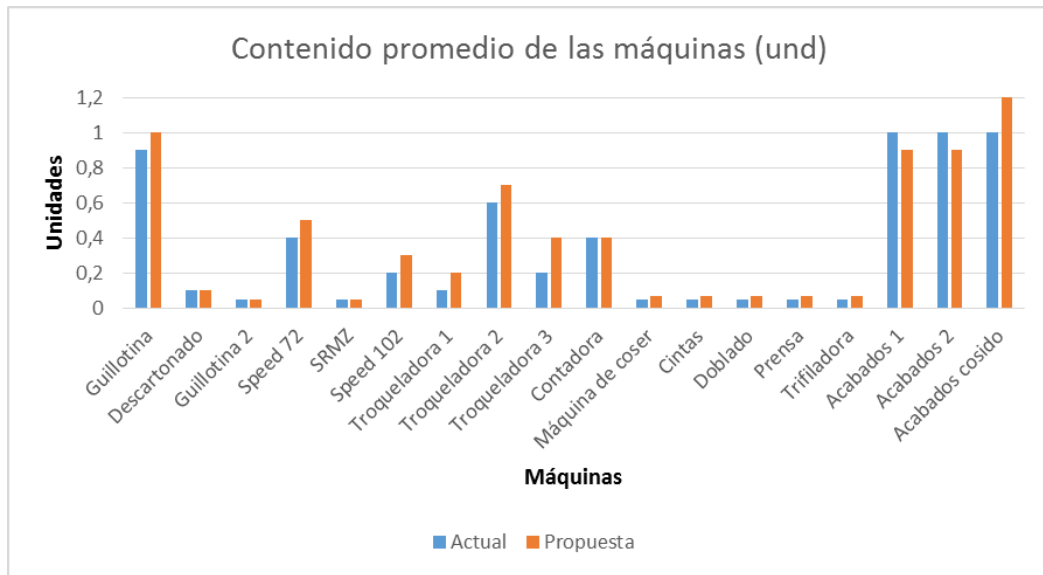


Fuente: Construcción de los autores

Los operarios de acabados son lo que presentan mayor distancia recorrida en comparación a los demás operarios, ya que en esta operación los productos se manejan en un formato pequeño y el transporte de estos se realiza en canastas, por lo que los operarios deben realizar varios viajes para transportar el material.

- Contenido promedio de las máquinas: En la Ilustración 18 se puede observar un incremento del contenido promedio de las máquinas, en la solución propuesta, del 11,3% con respecto a la situación actual. Lo que significa que las máquinas procesan mayor cantidad de unidades, por consecuencia de la disminución de las distancias recorridas por los operarios, por lo tanto, los operarios ocupan menos tiempo en transporte de materiales y más tiempo en el operación de las máquinas.

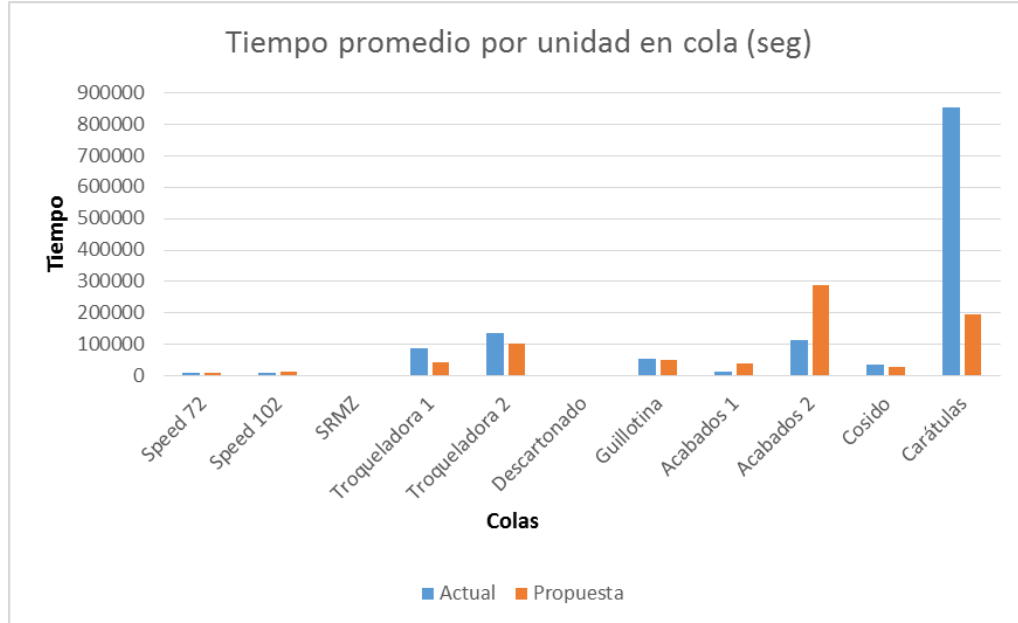
Ilustración 18. Contenido promedio de las máquinas



Fuente: Construcción de los autores

- Tiempo promedio por unidad en cola: En la Ilustración 19 se puede observar una reducción del 40,6% del tiempo promedio que una unidad se encuentra en cola en modelo de la solución propuesta con respecto al modelo de la situación actual. Esto quiere decir que se reducen las colas ya que las unidades son procesadas con mayor agilidad.

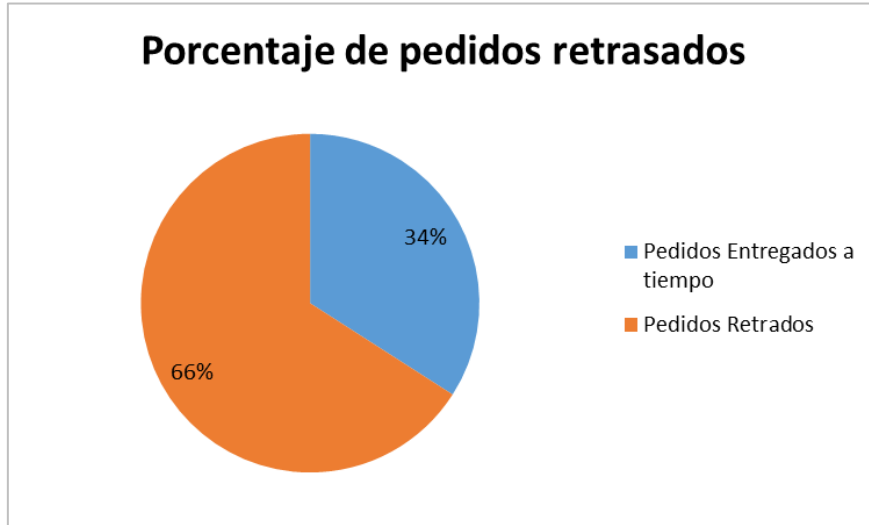
Ilustración 19. Contenido promedio de las máquinas



Fuente: Construcción de los autores

Adicionalmente, al ejecutar los modelos se impacta en la fecha de entrega de los pedidos, ya que se disminuye a un 66% la cantidad de pedidos retrasados (Ilustración 20) y se presenta una disminución a 4 días promedio de retraso en las entregas.

Ilustración 20. Porcentaje de pedidos retrasados



Fuente: Construcción de los autores

7 Conclusiones y recomendaciones

Después de analizar la situación actual de las empresas se concluye que existen falencias en cuanto al porcentaje de pedidos entregados a tiempo, el flujo de material y carencia de políticas de inventario por lo cual se decide definir políticas de inventario que suplan las necesidades actuales y hacer un rediseño de planta mediante un algoritmo genético.

Al estudiar el problema en conjunto acerca de la mejora de las políticas de inventario y la redistribución de planta, se observa que es posible definir la capacidad de almacenamiento necesario para la materia prima, insumos, producto en proceso y producto terminado, permitiendo tener mayor información de la cantidad necesaria para realizar los pedidos de material y no generar retrasos para la producción durante el tiempo de reaprovisionamiento, la cantidad más adecuada de material para pedir a los proveedores y el tiempo de revisión del inventario.

En el desarrollo de la solución del rediseño de planta es importante considerar el espacio de almacenamiento definido a través de las políticas de inventario, ya que es indispensable conocer las áreas que ocupan las máquinas para las operaciones y las áreas propuestas para el almacenamiento. Se encuentra una solución factible a través de una meta-heurística con algoritmo genético para la distribución de planta obteniendo como resultado una disminución del 16% de pedidos retrasados en la entrega, debido a que existe un impacto por la reducción de distancia recorrida por los operarios en un 14,8%, un incremento del 11,3% del contenido promedio de las máquinas y una reducción de 40,6% del tiempo promedio por unidad en cola.

Se recomienda plantear la solución del rediseño de planta para las empresas Olitocompu y Olito Editores, teniendo en cuenta la posibilidad de realizar cambios en la infraestructura, ya que esto influye en el desarrollo de la solución y en los resultados obtenidos.

8 Glosario

Kardex: Es un registro de manera organizada para mantener el control de los movimientos de entrada y

salida de cada una de las referencias o productos que conforman el inventario de un almacén. (Sapag, 2007)

Inventario de materia prima o insumos: Son aquellos en los cuales se contabilizan todos los materiales que no han sido modificados por el proceso productivo de las empresas. (FIAEP, 2014)

Inventarios de productos en proceso: Son aquellos materiales que han sido modificados por el proceso productivo de la empresa, pero que todavía no son aptos para la venta. (FIAEP, 2014)

Inventario de productos terminados: Son los productos que van a ser ofrecidos a los clientes, es decir que se encuentran aptos para la venta. (FIAEP, 2014)

CRAFT: Es un modelo donde se configura la ubicación de las áreas que genere menor costo a la empresa. Inicia con la determinación de los costos de las instalaciones y la determinación del centroide de cada una de las áreas, luego evalúan todas las posibles ubicaciones de las áreas que pueden ser adyacentes entre sí o ser del mismo departamento. (Mejía, Wilches, Galofre & Montenegro, 2011)

ALDEP: Una técnica tradicional utilizada en la construcción de distribuciones donde se utiliza la aleatorización para seleccionar los departamentos a ubicar y realizar desempates. (Mejía, Wilches, Galofre & Montenegro, 2011)

COFAD: Es una rutina de mejoramiento que permite un cálculo más realista de los costos de manejo de materiales a comparación del método CRAFT. La entrada es una distribución inicial y una matriz desde-hacia. La matriz de costos de movimiento se reemplaza por ecuaciones de costo de movimiento para equipo alternativo de trayectoria fija y equipo alternativo de trayectoria variable. (López, 1996)

9 Tabla de Anexos o Apéndices

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace corto (https://goo.gl/)	Relevancia para el documento (1-5)
1	Consolidado de pedidos	Propio	Excel	https://drive.google.com/file/d/1Qhry3ibxab-CIoPIR_KZ7P88zvLJddnF/view?usp=sharing	4
2	Cuadro Metodologías	Propio	Word	https://drive.google.com/open?id=1rjiA-H-SbVr86qPOi0oeOOvjnWXIUAsk	2
3	Pruebas de bondad de ajuste	Propio	SPSS	https://drive.google.com/open?id=1bdeMP_1V_jehD1eVn8Hlmrn4Iaw9t1ED	3
4	Políticas de inventario y capacidad de almacenamiento	Propio	Excel	https://drive.google.com/open?id=1XiquElca8PiglAJbqOjsbO88P8K5pBRO	5
5	Diseño en cuadro grecolatino	Propio	Excel	https://drive.google.com/open?id=1nuxEyaoOo-I1w4fbp-LrKz3GiRJ7gNTL	3
6	Algoritmo Genético	Propio	Excel	https://drive.google.com/open?id=1mOkibuQBD_ygjLxgVoh_rbz0CHu8CBqq	5
7	Simulación - situación actual	Propio	FlexSim	https://drive.google.com/open?id=1LqXBFCmlGGc8o_WyLOLd5xLw2bNqf5N	5

8	Simulación - propuesta de rediseño	Propio	FlexSim	https://drive.google.com/open?id=1LMW1glYwwvKJk5Dvhw5n2esMJYwmjWzK	5
9	Evaluación del impacto	Propio	Excel	https://drive.google.com/open?id=11dNjN-hqT3DxMOyzJV45sQ5L6uP0u7m	5

Referencias

- Acuña M., Moya M. J. y Eckelman C. (2002). Evaluación de alternativas de distribución en planta por medio de simulación. *Tecnología en Marcha*, 15(1), 44-59.
- Ahmadia A., Pishvaea S. y Akbari R. (2017). A survey on multi-floor facility layout problems. *Computers & Industrial Engineering*, 107, 158-170.
- Aiello G. y Scalia M. (2012). A multi objective genetic algorithm for the facility layout problem based upon slicing structure encoding. *Expert Systems With Applications*. 39(12), 10352-10358.
- Aguirre S., Ardila W., Figueroa L. y Romero D. (2105). Parametrization and evaluation of Inventory Policy (s, Q) in Hospitals: A case of study in Barranquilla. *Prospect*, 13(1), 99-105.
- Alvarado J. y Obagi J. (2008). *Fundamentos de inferencia estadística*. Bogotá, Colombia: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- Anjos M., Bernardi S. y Anjos M. F. (2013). A two-stage mathematical-programming method for the multi-floor facility layout problema. *Journal of the operational research society*, 64 3, 352-364.
- Anjos M. y Vieira M. (2017). Mathematical optimization approaches for facility layout problems: The state-of-the-art and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 261, 1-16.
- Bukchin Y. y Tzur M. (2014). A new MILP approach for the facility process-layout design problem with rectangular and L/T shape departments. *International Journal of Production Research*, 52(24), 7339-7359.
- Collazos V. C. J. (2013). *Rediseño del sistema productivo utilizando técnicas de distribución de planta*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia.
- FIAEP. (2014). Control y manejo de inventario y almacén. Recuperado de: <http://fiaep.org/inventario/controlymanejodeinventarios.pdf>. [Consulta: 14 abr 2017].
- Gestal M. Introducción a los Algoritmos Genéticos. Depto. Tecnologías de la información y las comunicaciones. Universidade da Coruña. Recuperado de: <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/aagg.html> [Consulta 14 abr 2017]
- Hillier F. y Lieberman G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. México D.F, México: Editorial Mc Graw Hill.
- Järlid E. y Karlsson J. Evaluation and Optimization of Inventory Policies and Production Layouts in Production Systems. *Division of production management, LHT*. Recuperado de: http://www.pm.lth.se/fileadmin/pm/Exjobb/Exjobb_2014/Jaerlid_Emilie_Karlsson_Jenny/Evaluation_And_Optimization_Of_Inventory_Policies_And_Production_Layouts_In_Production_Systems_Article.pdf [Consulta 10 jul 2017]
- Kumar R, Kumar R y Bennis F. (2016). Modified genetic algorithms for solving facility layout problems. *Cross Mark*.
- López P. J. (1996). *Notas de Distribución de Planta*. México: Azcapotzalco.
- Mazinani M., Abedzadeh M y Mohebal N. (2010). Dynamic facility layout problem based on flexible bay structure and solving by genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 929-943.

- Misola M. y Navarro B. (2013). Optimal Facility Layout Problem Solution Using Genetic Algorithm. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 7(8), 16-22.
- Mejía A. H. y Galofre V. M. (2008). Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos. *Prospectiva*, 6(2), 39-45.
- Mejía A. H., Wilches A. M. J., Galofre V. M. & Montenegro Y. (2011). Aplicación de metodologías de distribución de plantas para la configuración de un centro de distribución. *Scientia et Technica*, 49, 63-68.
- Nahmias S. (2009). Production and operations analysis. Mc Graw Hill. Sexta edición.
- Olivos A. S. y Penagos V. J. (2013). Modelo de Gestión de Inventarios: Conteo Cíclico por Análisis ABC. *INGENIARE*. 8(14), 107-111.
- Puspasari K. (2014). *An Approach to Capacity Planning of Distribution Warehouses for X-Firm* (Tesis de maestría). University of Twente, Países Bajos
- Revista de Logística. (2016, enero). *Diez elementos claves en el diseño logístico de un CEDI*. Recuperado de: <https://revistadelogistica.com/actualidad/diez-elementos-claves-en-el-diseno-logistico-de-un-cedi/>. [Consulta: 17 ago 2017].
- Rivera, Cardona, Palacios, Rodriguez (2012). Selección de alternativas de redistribución de planta: un enfoque desde las organizaciones. *Revista S&T*, 10(23), 9-26.
- Russell D. y Yavuz A. (1997). Alternative approaches to solve the multi-floor facility layout problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 16, 192-203.
- Sapag N. (2007). *Proyectos de inversión*. México: Pearson Educación de México S.A.
- Simón M. I., Santana R. F., Granillo M. R. & Piedra M. V. M. (2013). La simulación con FlexSim, una fuente alternativa para la toma de decisiones en las operaciones de un sistema híbrido. *Científica*, 17(1), 39-49.
- Velez M. y Castro C. (2002). Modelo de Revisión Periódica para el Control del Inventario en Artículos con Demanda Estacional una Aproximación desde la Simulación. *DYNA*. 69(137), 23-34.
- Vetencourt S. R. J. (2004). Re-design warehouse plant layout for a food company. University of Wisconsin-Stout, Estados Unidos.
- Yueli L., Jiangtao M. y Yucheng. (2015). Optimal Buyer's Replenishment Policy in the Integrated Inventory Model for Imperfect Items. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1-10. Doi:10.1155/2016/5382329
- Zandin. K.B. Maynard's Industrial Engineering Handbook, fifth edition. Inventory Management and Control, Access Engineering.