



Programación coordinada de producción y distribución para maximizar despachos directos desde planta: caso de estudio

Javier David López Ovalle ^{a,c}, Mayra Alejandra Sánchez Cuéllar ^{a,c}

Juan Pablo Caballero Villalobos ^{b,c}

^aEstudiante de la Maestría en Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

Las operaciones de producción y distribuciones son claves para la cadena de suministro y para lograr un desempeño operativo óptimo, deberían integrarse y planificarse de manera coordinada. Es por ello que esta investigación propone la aplicación de una metodología coordinada de programación de producción y distribución con el fin de minimizar los costos logísticos (almacenamiento, transporte y producción) y el tiempo de disponibilidad de producto en una multinacional de consumo masivo de tal manera que se puedan aumentar los despachos directos. Para esto, se aplica una metodología de dos etapas. La primera, una mate-heurística que evalúa secuencias de producción en términos de costos de producción y distribución a través de un algoritmo GRASP y un MIP relajado. La segunda, un MIP que resuelve el VRP con entregas divididas. Este trabajo plantea la maximización de despachos directos desde planta de un portafolio de SKU's predefinido como forma de generar ahorros y minimizar tiempos de disponibilidad, logrando un aumento del 25% del despacho directo y un ahorro en promedio el 32% de los costos logísticos actuales. El problema abordado presenta un entorno de máquina paralelas y evalúa el modelo de optimización con variaciones en los actuales portafolios de productos despachados de forma directa desde la planta, con el fin de proponer nuevos portafolios de despachos directos, logrando agregar 3 productos más.

Keywords: *Production distribution problem, Production scheduling, Integrated scheduling, Production and distribution operations, Split VRP, Parallel Machine, Matheuristic*

1. Antecedentes

De acuerdo con Dempster (2012), la programación es “el arte de asignar recursos a tareas para asegurar la terminación de estas tareas en un tiempo razonable”. Más puntualmente, la programación en la planificación de producción es la asignación de recursos de planta, maquinaria, personal y materiales para obtener secuenciados de producción con sus respectivos tiempos de inicio y finalización de cada operación (Jahed & Moghaddam, 2021). De igual forma, Jahed & Moghaddam (2021), afirman que el problema de programación en la planificación de producción es uno de los temas más relevantes en la investigación de operaciones. Lo anterior es, en parte, por la complejidad de este.

El estudio de los sistemas de producción es, inicialmente, complejo a nivel gerencial y decisional por la cantidad de entidades e interacciones que tiene. Entidades como ingenieros, científicos, gerentes, plantas, productos, restricciones, clientes, etc. (Chaouch et al., 2020). Sin embargo, la relevancia de este problema no solo se debe a su complejidad, sino al gran requerimiento de excelencia que exigen las empresas en su área de producción. Lo anterior debido a que las empresas constantemente se encuentran con la necesidad de minimizar sus costos y tiempos de disponibilidad de producto (Naderi & Ruiz, 2010).

La programación de trabajos también es compleja a nivel computacional. Esta es identificada como un problema NP duro debido a la heterogeneidad en los recursos, puesto que pertenecen a diferentes áreas administrativas con diferentes políticas de gestión (Yousif et al., 2015). Ahora bien, el principal objetivo de la programación de producción es determinar, de acuerdo con un criterio de optimización, las secuencias de operación en las máquinas y, con frecuencia también, determinar las rutas de los trabajos en el taller de producción. Algunos de los criterios usados son: minimizar el número de trabajos retrasados; maximizar la tasa de producción; minimizar el tiempo de espera, la tardanza máxima, la tardanza total o los costos. El criterio más usado en la literatura es minimizar el tiempo de espera (Chaouch et al., 2017).

Los problemas de programación de producción fueron introducidos por Graham et al. (1979) y profundizados por Lawler et al. (1993) y Pinedo (2008). Adicionalmente, estos suelen clasificarse de acuerdo con 3 agrupaciones. La primera hace referencia al entorno de la máquina, la segunda a las características del trabajo o trabajos y la tercera al criterio de optimización (Moons et al., 2017). Por ejemplo, Moon et al (2017), en su revisión de literatura “Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level”, generaliza ciertas características de producción que podrían determinar la clasificación de la segunda agrupación: número de plantas, procesamiento por lotes, operaciones de configuración, tiempos y costos de producción (los cuales pueden ser dependientes o independientes a las máquinas e incluso determinísticos o estocásticos), relaciones de precedencia, fecha de vencimiento de producción, fechas de lanzamiento de la producción. Otra característica del trabajo generalizada por Sharma & Jain (2015) fue la recirculación.

Algunas de las características, cuyo significado no es tan intuitivo, son: el procesamiento por lotes que es la producción de varios pedidos de clientes en forma paralela (p-batch) o secuencial (s-batching); las operaciones de configuración que son los tiempos y costos de configuración entre pedidos o lotes; la fecha de lanzamiento de la producción que es el momento más temprano en el que puede comenzar el procesamiento de un trabajo o pedido (Moons et al., 2017); y la recirculación que ocurre cuando un trabajo puede visitar una máquina más de una vez (Sharma & Jain, 2015).

De acuerdo con Moons et al (2017), el entorno de la máquina podría ser: una sola máquina (single machine), máquinas en paralelo (parallel machines), flujo en línea (flow shop), flujo intermitente (job shop) y, un adicional encontrado en la literatura open shop. En el entorno single machine y parallel machines los trabajos tienen solo una operación. La diferencia radica en que en el contexto de parallel machines existe m máquinas y un trabajo se procesa en una de las m máquinas paralelas. Por otro lado, cuando los trabajos tienen varias operaciones se usa job shop, flow shop y open shop. Mientras que en el flow shop los trabajos deben seguir la misma ruta a lo largo de las máquinas, en el job shop cada trabajo tiene su propia ruta predeterminada para las máquinas de visita. En el open shop las rutas no tienen restricciones de ordenamiento, son aleatorias y arbitrarias (Graham et al., 1979) (Pinedo, 2008).

El criterio de optimización, como ya fue mencionado, puede tener diferentes medidas de desempeño como los trabajos tardíos, las tardanzas, el makespan e incluso los costos. Esto haría parte de la minimización o maximización de un solo criterio, sin embargo, existen funciones objetivo con múltiples criterios, la cual sería otra división del criterio de optimización (Chaouch et al., 2020).

Finalmente, existen al menos otras dos formas de agrupar los problemas de programación de producción, las cuales son: método de solución y tipo de modelado del problema. Los métodos de solución pueden ser exactos, aproximaciones y “otros” como híbridos (Chaouch et al., 2020) (Sharma & Jain, 2015). En primer lugar, Chaouch et al (2020) afirman que los métodos exactos garantizan una solución óptima, pero solo se pueden aplicar a casos pequeños de problemas complejos puesto que en instancias grandes el tiempo de procesamiento no sería el ideal. Por otro lado, las aproximaciones, tal como su nombre lo indica, es una aproximación a la respuesta óptima, ofrece una solución de buena calidad en un tiempo razonable.

Algunos ejemplos de los métodos exactos son el método Branch and bound (B&B), la programación dinámica (DP) y los solvers empleados para solucionar modelos de programación lineal entera mixta (MILP). Entre las aproximaciones están las heurísticas como algoritmos voraces y reglas de despacho, y metaheurísticas como búsqueda tabú, algoritmo genético y optimización de colonias de hormigas (ACO), entre muchos otros. Por último, en “otros” tendríamos métodos como las mate-heurísticas y sim-heurísticas (Chaouch et al., 2020) (Sharma & Jain, 2015).

En segundo lugar, el tipo de modelado o programación puede ser estático o dinámico. Siendo estático cuando una vez realizada la planeación esta no puede ser modificada ni ningún trabajo puede ser agregado. Mientras que el dinámico es cuando pueden llegar más trabajos o pueden ser modificados continuamente a lo largo del tiempo en un sistema de fabricación (Chaouch et al., 2020) (Sharma & Jain, 2015).

Anglani et al (2005), dan una solución al problema de programación de la producción en un ambiente de máquinas paralelas con costos de set up dependientes a la secuenciación de los trabajos, para lo cual desarrollan un modelo de programación no lineal entera mixta, para luego proponer un modelo lineal equivalente. Al implementar el modelo lineal (MILP) propuesto, debido a los altos tiempos de procesamiento, deciden realizar una reducción del modelo con el cual les fuera posible obtener resultados de buena calidad. De otro lado, Mendes et al (2002), solucionaron por medio de algoritmos meméticos y búsqueda tabú el problema de programación de máquinas paralelas teniendo en cuenta tiempos de set up con el objetivo de minimizar el makespan. Ellos llegan a la conclusión de que el rendimiento del algoritmo que se use depende de los parámetros de las instancias, dado que para el caso de estudio por ellos planteado arrojó que con tiempos de set up bajos e inferiores a los tiempos de procesamiento el rendimiento de los algoritmos meméticos es mejor que la búsqueda tabú y de manera contraria en escenarios/instancias en donde los tiempos de proceso son grandes la búsqueda tabú tiene un mejor rendimiento. De igual forma, Balin (2010),

desarrolla el problema de programación de trabajos en un ambiente de máquinas paralelas con la finalidad de minimizar el makespan. Ellos hacen uso de un software de simulación en el que se implementó como método de solución el algoritmo genético. Este software parametriza cada centro de trabajo como un paso del algoritmo en donde la población inicial se compone de la generación de números aleatorios.

En muchos sistemas de producción los productos se entregan desde la fábrica a centros de distribución, almacenes e incluso directamente a los clientes. Sin embargo, los modelos de programación tradicionales se centran en determinar secuencias sin tener en cuenta la coordinación entre el programa de producción y los planes de entrega (Li et al., 2005). Lo anterior lo hacen asumiendo que hay vehículos y/o capacidad de almacenamiento infinita, lo cual se aleja de la realidad. Chen (2010), afirma que las operaciones de producción y distribuciones son claves para la cadena de suministro y que, para lograr un desempeño operativo óptimo, deberían integrarse y planificarse de manera coordinada. De hecho, Moons et al. (2017), afirman que el enfoque descoordinado no siempre resultará en una solución óptima general. Entendiéndose un enfoque coordinado como el trabajo conjunto entre diferentes áreas para tomar decisiones de planeación.

Tal como fue mencionado al inicio, las empresas encuentran dos grandes objetivos en la programación de producción: minimizar costos y minimizar el tiempo de disponibilidad del producto. Ambos objetivos enfocados al nivel de servicio y a las utilidades de la empresa, puesto que generar buenos precios de venta y tener el producto a tiempo aportan valor al cliente y por supuesto, a la maximización de utilidades. En busca de estos objetivos en la producción se encuentran retos como la cantidad de máquinas, los tiempos de alistamiento, la cantidad de tareas, las restricciones de secuencia y demás particularidades ya mencionadas. Sin embargo, en empresas grandes, como las multinacionales, hay que tener en cuenta otros factores como exportaciones e importaciones, cantidad de clientes, capacidad de almacenamiento, sistemas de distribución y demás factores que podrían influir sobre estos dos objetivos.

De hecho, Moons et al. (2017), afirman que estos dos objetivos están siendo buscados por las empresas debido al actual entorno empresarial competitivo y esto también es buscado por empresas multinacionales. Es por ello que la presente propuesta plantea un enfoque coordinado en donde la programación de producción tenga en cuenta: estatus de suministro en centros de distribución (nacional), planes de distribución de despachos directos y la capacidad de almacenamiento de la planta. Lo anterior en un caso aplicado en una multinacional de consumo masivo.

Actualmente, dicha multinacional aplica un enfoque descoordinado y manual, sin implementar métodos de optimización y buscando oportunidades de despachos directos dado un portafolio de productos puntual y una programación de producción ya hecha. Entendiéndose portafolio de producto como un grupo de SKUs sobre los cuales aplicar despacho directo.

Sin embargo, de acuerdo con la revisión realizada en esta investigación un enfoque coordinado y la implementación de métodos de optimización generarían una mejora en coberturas de suministro y ahorros. Un ejemplo de ello son los ahorros estimados por la empresa de al menos €100.000 anuales por implementar una programación de producción integrada con la distribución de despacho directos de forma manual. De hecho, Moons et al. (2017), afirman que un enfoque coordinado podría generar mejoras hasta de un 40% en comparación con un enfoque descoordinado.

De igual forma, otra intención de la propuesta planteada es evaluar los despachos directos con otro portafolio de productos, es decir con un mayor número de SKUS pues hay una gran oportunidad de códigos a seleccionar, sobre todo en la categoría de Personal Care. La evaluación y comparación de propuestas se haría en términos de los siguientes costos logísticos: almacenamiento, transporte y

producción. Por otro lado, este enfoque coordinado requerirá que se deban analizar dos características más de las ya mencionadas respecto al problema de programación de producción. Estas son características del inventario y de la distribución.

En la realidad, entre la etapa de producción y la de despacho hay un almacenamiento de producto terminado en la planta. De esta manera, existirán las siguientes características: capacidad de inventario y costo de mantenimiento de inventario. Para este caso puntual, no solo hay almacenamiento de búfer, sino uno reservado para los despachos directos, el cual está ubicado físicamente en un espacio diferente. Por otro lado, habrá unas características de la distribución. Estas son: flota (número) de vehículos y su heterogeneidad (propiedades de vehículos serán idénticos o no y sus capacidades); viajes múltiples (un vehículo puede realizar múltiples viajes durante el horizonte); viajes múltiples por partición de pedidos (teniendo en cuenta el plan de producción en ocasiones no es posible despachar el pedido a un cliente de manera completa, lo cual implica realizar más de un viaje a ese cliente); datos de transporte tales como tiempo de viaje, costos de transporte, tiempos de servicio (carga y descargue); y restricciones de tiempo de entrega (como fechas de vencimiento) (Moons et al., 2017).

De acuerdo con Moons et al. (2017) algunos de los métodos de solución presentados en la literatura para resolver el enfoque coordinado son: softwares de optimización, métodos exactos, heurísticas, recocido simulado, búsqueda tabú, búsqueda local iterada, algoritmos genéticos, algoritmos meméticos, búsqueda de vecindario grande (adaptativa), optimización de colonias de hormigas y simulación. Siendo los más usados en su revisión de literatura: softwares de optimización, heurísticas, algoritmos genéticos, búsqueda tabú y métodos exactos.

Boudia et al. (2006), resuelven el problema de producción y distribución de un producto con el objetivo es minimizar el costo total teniendo en cuenta los niveles de inventario, la distribución y las configuraciones de producción, para lo cual de manera inicial desarrollaron un modelo lineal entero, el cual no fue funcional debido al tamaño del problema. Por este motivo, los autores deciden implementar las metaheurísticas GRASP y path relinking, tanto de forma separada como de forma integrada. Al realizar la implementación de los modelos, se encuentra que se obtiene mejor desempeño con el GRASP vinculado al path relinking que con la sola implementación del GRASP.

Naso et al. (2007), aborda el problema coordinado bajo el entorno de máquina single machine con más de una planta. Para solucionarlo de manera coordinada lo divide en dos subproblemas. En el primer subproblema se determinan los programas de producción haciendo uso de un algoritmo genético híbrido. Mientras que en el segundo subproblema se generan rutas de entrega mediante una heurística constructiva. Los resultados generados son comparados con cuatro heurísticas constructivas. Por otro lado, Viegutz y Knust (2014), proponen para el entorno single machine dos heurísticas basadas en la búsqueda tabú (TS) en un contexto de químicos industriales con vida útil limitada. Ambas heurísticas solucionan el problema de manera coordinada solo que una lo hace de manera separada, tal como Naso et al., y otra de forma simultánea o integrada. En su investigación el enfoque de TS integrado conduce, en promedio, a mejores resultados que el separado.

Siguiendo en el entorno single machine, Low et al. (2013, 2014), aplica dos versiones del algoritmo genético en un contexto de un centro de distribución. Uno de estos es un genético adaptativo y usa valores iniciales que son actualizados de forma dinámica. Lo interesante de esta investigación es que el uso del enfoque de solución es determinado por la cantidad de clientes. Adicionalmente, Low et al. afirma que el uso de diferentes tipos de vehículos le permitió generar menos costos totales. Otras metodologías aplicadas en este entorno son los algoritmos codiciosos con visión de futuro (Hurter y Van Buer, 1996).

De otro lado, es posible que, en el proceso de distribución se identifique la necesidad de particionar las cantidades que se despachan a un cliente, esto puede ocurrir debido a restricciones de capacidad del vehículo o incluso a la cantidad de producto disponible para despacho. Dado esto, se encuentra la variación del VRP que incluye entregas divididas, en el cual se elimina la restricción en la que cada cliente es visitado una sola vez, es decir, que las entregas divididas o entregas parciales son permitidas (Archetti, Speranza, 2012). Esta variación fue incluida en la literatura por Dror y Trudeau (1990), quienes demostraron que, por medio de las entregas divididas es posible obtener ahorros tanto en número de vehículos usados como en los costos de viaje. Este tipo de problema corresponde a un problema NP duro, para el cual se han desarrollado diversos métodos de solución entre los cuales se resaltan:

Autor	Método	Resultados / Conclusiones
Dror and Trudeau (1989-1990)	Algoritmo de búsqueda local diseñado solo para casos en los cuales la demanda de cada cliente es inferior a la capacidad del vehículo. Este método consta de dos movimientos: a) dividir la visita a un cliente en diferentes rutas teniendo en cuenta la capacidad residual para atender la demanda de un cliente que ha sido dividido; b) añadir rutas considerando un cliente que ha sido dividido, lo elimina en todas la rutas en donde este está presente y genera una nueva ruta con ese único cliente	Los principales ahorros se obtienen cuando las demandas de los clientes son grandes.
Archetti, Hertz and Speranza (2006)	Método SPLITABU: Búsqueda Tabú. Este método exige únicamente dos parámetros de entrada a) Tamaño de la lista tabú y b) Número máximo de iteraciones que se pueden ejecutar sin que mejore la mejor solución encontrada.	El método arroja mejores resultados en instancias en las cuales las demandas de los clientes son inferiores a la capacidad del vehículo. A pesar del tiempo de procesamiento que requiere arroja mejores resultados que el método propuesto por Dror y Taudeau.
Archetti, Savelsbergh and Speranza (2008)	Heurística basada en optimización tomando como base el método SPLITABU, en donde se genera un modelo de programación MIP con el fin de encontrar las mejores rutas a seguir en el proceso de distribución.	Al aplicar el método, dado el tamaño del problema se procede con la relajación y solución de este. Las rutas obtenidas son priorizadas según diferentes criterios como por ejemplo los costos, lo cual contribuye a que los resultados sean mucho más eficientes que los dos métodos previos.

Finalmente, Shaikh et al. (2011) resuelven el problema de programación de producción y gestión de inventario de una multinacional de consumo masivo a través de un modelo de programación entera mixta (MIP). Este artículo es de especial interés para esta investigación debido a que es implementado en un contexto similar al presente y propone una alternativa ingeniosa para instancias grandes. Ellos plantean dos métodos de solución para abordar el problema de programación de producción, el primero resuelve todo el problema a través de un solo modelo MIP. Mientras que el segundo resuelve el problema dividiéndolo en dos subproblemas.

Este segundo enfoque, aplica el modelo presentado en el primer método, pero sin tener en cuenta las restricciones asociadas con la secuencia de los productos en las maquinas. De esta manera reduce las variables binarias del modelo, reduce el tiempo de corrida y obtiene una asignación de productos a las máquinas. Posteriormente, aplica otro modelo MIP para resolver la secuencia de las maquinas como si fuera un problema del agente viajero (TSP). Este segundo método es aplicado para

instancias grandes, entendiéndose instancias grandes plantas países donde hubiese más de dos plantas.

A pesar de que este artículo no resuelve el problema de transporte, su modelo matemático puede ser adaptado para incluirlo a través de la creación de nuevos parámetros, variables y restricciones. Asimismo, como su división en subproblemas puede ser aplicado para separar los problemas de secuencias de máquinas y de secuencias de clientes a visitar para el caso de despachos directos nacionales.

De esta manera, se propone una técnica de solución que aborde el problema de manera coordinada y que además lo haga con una lista de características que generalmente en la literatura no se consideran simultáneamente. En primer lugar, un ambiente de producción de máquinas paralelas con el problema de distribución. En segundo lugar, la inclusión de inventario limitado para consolidar vehículos en un contexto coordinado y un número limitado de vehículos con diferentes tipos de estos. Finalmente, se propone una metodología para evaluar propuestas de ahorro en el problema de producción y distribución, más puntualmente con la propuesta de diferentes portafolios de producto a despachar de forma directa.

2. Justificación

El valor para el cliente, entendiendo valor como la percepción del cliente acerca de una empresa y sus productos o servicios, es una de las características clave de una empresa exitosa. Ésta aparece como una de las mejores opciones estratégicas para diferenciar una empresa (McFarlane, 2013) y se puede dividir en cuatro elementos: servicio, calidad, imagen y precio, según Weinstein (2012). Por tanto, para tener éxito en la generación de valor del cliente es fundamental contar con una buena planificación de recursos. Y dado que la planificación estratégica estudia las decisiones actuales y futuras de una empresa, adaptar la empresa a los requerimientos del cliente es la mejor manera de lograr el mejor nivel de servicio. La planificación de recursos es una herramienta de toma de decisiones que tiene un impacto sustancial en los costos, las ventas y la rentabilidad (Mani et al., 2015; Perdikaki et al., 2011)

La planificación de producción tiene una gran influencia en la minimización de costos, el aumento de la productividad y consecuentemente en el nivel de servicio. Es decir que dicha programación afecta directamente el nivel de servicio y por tanto el éxito de una empresa. De hecho, Chaouch et al. (2020) afirman que en una economía altamente competitiva la calidad del servicio es lo que marca la diferencia entre una empresa y otra.

Adicionalmente, Naderi & Ruiz (2010), afirman que la programación de producción enfrenta constantemente el desafío de reducir sus costos y tiempos de comercialización. Y para lograr esto Moons et al. (2017) afirma que en el actual entorno empresarial competitivo un enfoque coordinado de la producción y la distribución podría mejorar el rendimiento general de la empresa. De acuerdo con Geismar et al. (2008) esta integración evitaría ineficiencias en los cronogramas, lo cual, según Gao, Qi y Lei (2015), podría resultar en un aumento de costos y una disminución de nivel de servicio. Reimann et al. (2014) refuerza esta idea afirmando que para generar un alto rendimiento y una satisfacción de los clientes es necesario integrar etapas de la cadena de suministro y no realizarlo secuencialmente.

Chen (2004,2005) y Sarmiento & Nagi (1999), afirman que al tener una visión coordinada se generarían ahorros de costos y mejoras de eficiencia. Sin embargo, tal como menciona Moons et al.

(2017) las empresas prefieren tener un enfoque descoordinado por dos razones principales: el nivel de complejidad individual de cada problema y los diferentes departamentos e incluso empresas que manejan estas áreas.

En este sentido, la presente investigación presenta un método de solución con enfoque coordinado que sea de fácil acceso para las empresas y con tiempos razonables de corrida. Abordando un problema NP duro debido a su heterogeneidad en los recursos, puesto que pertenecen a diferentes áreas administrativas con diferentes políticas de gestión (Yousif et al., 2015). Esto a través de la optimización de las fechas de entrega de producción, de tal manera que se logren consolidar vehículos para despacho directo sin excesos de inventario, pero cumpliendo con las coberturas esperadas de suministro en el centro de distribución. Para ello se debe desarrollar el problema de programación de producción teniendo en cuenta el despacho de producto terminado hacia dos centros de distribución y despachos directos a clientes, lo cual aportaría no solo a una multinacional que genera miles de empleos en Colombia, sino que daría la oportunidad de aumentar contrataciones para reforzar despachos directos. Asimismo, quedaría una herramienta aplicable al contexto colombiano.

3. Coherencia

El proyecto planteado desarrolla un problema típico de investigación de operaciones y de producción, por lo cual estaría acorde con el programa de la Maestría en Ingeniería Industrial. Asimismo, haría uso de herramientas de optimización para abordar un problema NP duro.

4. Objetivo general:

Diseñar una herramienta para la programación coordinada de la producción y la distribución de producto de una planta de producción con el fin de minimizar costos logísticos (almacenamiento, transporte, producción) y maximizar los despachos directos de un portafolio de SKUs preseleccionados.

5. Objetivos específicos:

- 5.1 Diseñar una metaheurística que aborde de manera integrada el problema de programación de producción y distribución de producto minimizando costos logísticos (almacenamiento, transporte, producción) y maximizando los despachos directos desde planta de un portafolio de SKUs predefinido y asegurando las coberturas esperadas en dos centros de distribución.
- 5.2 Evaluar el impacto de los resultados teóricos de la herramienta de programación en términos de costos logísticos de almacenamiento, transporte y producción.
- 5.3 Proponer una metodología para la presentación y selección de otros portafolios de SKUs de despacho directo a los actuales, pero con ahorro de costos logísticos similares o mayores al actual.

6. Metodología

Objetivos	Actividades	Métodos o herramientas	Entregables
1. Diseñar una metaheurística que aborde de manera	Estimar los valores de los parámetros del modelo.	Modelamiento matemático	Modelo matemático

Objetivos	Actividades	Métodos o herramientas	Entregables
integrada el problema de programación de producción y distribución de producto minimizando costos logísticos y maximizando los despachos directos desde planta de un portafolio de SKUs predefinido y asegurando las coberturas esperadas en dos centros de distribución.	Plasmar las características, limitaciones y función objetivo en términos de modelamiento matemático.	Programación y optimización	Modelo, heurística o metaheurística
	Diseñar el modelo matemático.		
2. Evaluar el impacto de los resultados teóricos de la herramienta de programación en términos de costos logísticos de almacenamiento, transporte y producción.	Ejecutar la técnica de solución propuesta con los datos pronósticos de la empresa.	Estadística	Tabla comparativa y análisis
	Medir los indicadores y costos logísticos de la solución, comparando los resultados reales y los obtenidos con la implementación del método.		
3. Proponer una metodología para la presentación y selección de otros portafolios de SKUs de despacho directo a los actuales, pero con ahorro de costos logísticos similares o mayores al actual.	Aplicar diagrama de Pareto a las ventas de todos los productos que hacen parte de la familia de productos seleccionada.	Estadística	Pareto y lista de productos
	Establecer un criterio de selección y seleccionar conjunto de SKUs para ingresar en el portafolio.		
	Ejecutar la técnica de solución con los datos pronóstico de la empresa, agregando por subconjuntos o propuestas los productos del portafolio seleccionado.		Tabla comparativa, gráficos y análisis
	Analizar el impacto de la herramienta con base en la comparación entre el portafolio inicial y las propuestas generadas para poder presentar las que cumplan con el ahorro esperado.		

Resolver los problemas integrados de programación de producción y rutas de vehículos con métodos exactos es difícil para instancias grandes (Moons et al., 2017). Sin embargo, de acuerdo con la literatura, el problema suele ser abordado de forma simultánea o particionada (en subproblemas). Y una visión de partición podría permitir la aplicación de métodos exactos sin desmejorar la calidad de las respuestas. Un ejemplo de ello son Shaikh et al. (2011) que, aunque no resuelven el problema coordinado, logran mantener la calidad de la solución para un problema de gestión de inventarios y programación de producción particionando el problema de una forma estratégica. Asimismo, Meinecke y Scholz-Reiter (2014) lograron resolver el problema coordinado de programación de producción y de transporte a través de modelamiento matemático.

Es por ello que la metodología de solución coordinada propuesta en esta investigación es la siguiente:

1. Modelo MIP para el problema de programación de producción y distribución de producto sin tener en cuenta decisiones de secuencia de productos en máquinas ni secuencia de clientes en vehículos.
2. Modelo MIP o heurística para el problema de secuencia de productos en cada máquina.
3. Modelo MIP o heurística para el problema de secuencia de clientes en vehículos.

Por último, las limitaciones y supuestos bajo los cuales se aplican los métodos propuestos:

- Los métodos se aplicarán sobre una sola planta.
- Se asume un problema determinístico confiando en que la empresa tiene un departamento enfocado en pronósticos. A los pronósticos se le llamara cuota y cada cliente o mercado tiene una cuota.
- Existe una lista de clientes o países predefinidos que permiten los despachos directos.
- La cuota de los clientes será agrupada en mercados, exceptuando los clientes predefinidos para despacho directo. Los centros de distribución tendrán una cuota que abarcan varios mercados. Por tanto,
- El modelo no tendrá en cuenta el problema de planificación de materiales, pero tendrá parámetros suministrados por los planeadores que restrinjan la producción de acuerdo con las limitaciones de materiales.
- El horizonte de planeación se toma con periodicidad semanal.
- El modelo no tendrá en cuenta los tiempos de parada de las máquinas que tienen por objeto realizar mantenimiento de estas.
- No se considera ninguna restricción de antecesores y predecesores, toda vez que la familia de productos que elegida no posee este tipo de restricciones.

7. Desarrollo del proyecto

7.1 Objetivo 1: Diseñar una metaheurística que aborde de manera integrada el problema de programación de producción y distribución de producto minimizando costos logísticos y maximizando los despachos directos desde planta de un portafolio de SKUs predefinido y asegurando las coberturas esperadas en dos centros de distribución.

La primera etapa del proyecto tuvo como objetivo el diseño de una metaheurística que integrara los problemas de programación de la producción y distribución buscando la minimización de los costos logísticos asociados, para lo cual se desarrollaron las siguientes actividades:

7.1.1 Estimación de los valores de los parámetros del modelo: con base en el contexto del problema, y teniendo en cuenta los supuestos planteados en el capítulo 6 de este documento, se establecen las condiciones, conjuntos, parámetros y variables a tener en cuenta en el desarrollo del problema.

7.1.2 Plasmar las características, limitaciones y función objetivo en términos de modelamiento matemático: con el propósito de diseñar el modelo matemático se realizó la siguiente subdivisión del problema.

- a. Desarrollo de un primer modelo (en adelante Modelo 1) en el cual se integra el problema de producción, secuenciación y distribución y contempla los siguientes supuestos:
- ✓ Para las variables de cantidad de producción y despacho, la granularidad de los periodos es de 2 horas. Sin embargo, para las variables binarias de asignación de máquinas la granularidad de los periodos es de 8 horas. Se determina de esa manera debido a que la ocupación de los vehículos se mueve en múltiplos de ese valor.
 - ✓ Las variables de producción solo permiten cambios de SKU en turnos de 8 horas.
 - ✓ Existen vehículos que están reservados para las entregas de los centros de distribución, por lo tanto, a estos se les debe tener en cuenta la ocupación del vehículo.
 - ✓ Las ocupaciones de un vehículo que va a un centro están estandarizadas teniendo en cuenta tiempo de cargue, tiempo de tránsito, tiempo de descargue y tiempo de tránsito de regreso. Estos tiempos cambian dependiendo del centro de destino.
 - ✓ Los vehículos para despachos directos son solicitados al equipo de transporte y teóricamente se cuenta con vehículos infinitos. Por tanto, se debe estimar el tamaño del conjunto V a un número suficiente de vehículos que puedan salir en una hora.
 - ✓ Existen diferentes tipos de vehículo dependiendo de su capacidad de carga. Sin embargo, no se hace uso de un conjunto de tipo de vehículo ya que se tiene un conjunto de vehículos que nos permite caracterizar e identificar cada elemento del conjunto con una capacidad de carga.
 - ✓ Cada vehículo debe salir con una ocupación mínima.
 - ✓ Existen diferentes tipos de vehículos que dependen del tipo de producto que transportan, es decir, un vehículo no puede ir con productos alimenticios y de aseo en un mismo viaje.
 - ✓ El cumplimiento de la demanda se evalúa de forma semanal, por tanto, existe un conjunto llamado W que tiene los periodos de tiempo t referentes al final de una semana. De esta manera, existen unos pedidos pendientes semanales vs. el pronóstico semanal $EDsdw$. Sin embargo, también existen ordenes en firme, las cuales deben cumplirse en el horizonte de planeación, y su parámetro asociado es $FPOsd$.
 - ✓ Existe un inventario objetivo para el final del horizonte de planeación de las plantas, el cual existe para adelantar la construcción de la venta del siguiente horizonte de planeación. Su parámetro asociado es $OIsP$.
 - ✓ Las horas de uso de una maquina no pueden ser mayor a lo que equivale en horas un periodo t . Es decir, si la granularidad de los periodos está en horas, en un periodo t , la maquina no puede usarse más de una hora.
 - ✓ Se utiliza una aproximación de los tiempos de set up ya que en este modelo no se está considerando la secuencia de un producto a otro, solo si existe un cambio entre periodos en una máquina.
 - ✓ Dado que este modelo no tiene en cuenta la secuencia de clientes (es decir, no minimiza distancias), se crea un subconjunto de clientes que no pueden o no deben estar en una misma ruta debido a cambio de regiones, zonas y/o de distancias. El subconjunto asociado corresponde a DDd .
 - ✓ Las variables $Disp$ y B son categorizadas como variables enteras (i) debido a que los despachos desde las planas se realizan en pallets y el cumplimiento de facturación se refleja en pallets exactos.
 - ✓ La capacidad de producción por producto está asociada a las restricciones del MRP.
 - ✓ La empresa cuenta con lotes mínimos de producción, por lo tanto, para asegurar que al final del horizonte de planeación se haya producido lo que se requiere de cada SKU sin tener restricciones de horas de inicio de producción, se agrega al conjunto T unos periodos excedente, los cuales corresponden al siguiente horizonte de planeación.

- ✓ Con base al anterior supuesto, se crea un subconjunto llamado *TINimp*, el cual indica cuales son los periodos iniciales en que una máquina estará ocupada en un producto. Esta información se extrae de la corrida del modelo del anterior horizonte de planeación o de los planes en marcha reales que tenga la planta para inicios del horizonte de planeación.

Dados los supuestos relacionados, el modelo relacionado se describe a continuación:

Conjuntos

T Periodos
V Vehículos
D Destinos
P Plantas
S SKU's
M Máquinas
G Canales o gerencias
K Tipos de producto
C Centros
R Clientes
H Tipo de contenido en el vehículo
SM_m Productos que se pueden hacer en la máquina m
SD_d Productos que pueden ser entregados en el destino d
MS_s Máquinas que pueden producir el SKU s
A_m Arcos de transición del producto i en S a j en S permitidos en la máquina m
AF_{sm} Productos que pueden seguir el SKU s en la máquina m
AP_{sm} Productos que pueden anteceder al SKU s en la máquina m
SH_h SKU's que pueden ir en un mismo vehículo con tipo de contenido n
W Periodos finales de cada semana
VH_h Vehículo v que corresponde al tipo de vehículo h
RG_g Cliente r que corresponde a la gerencia g
O Plantas y destinos
RUT Arcos (a,e) factibles
VC_c Vehículos reservados para ir al centro c
VCN Vehículos que no están reservados para ir al centro c
SK_k SKU s que son del tipo k
TT_{su} Periodos requeridos para hacer el lote mínimo de producción si se inicia en el turno u
SS Productos iniciados en 0
RP Clientes y Plantas
TIN_{im} Periodos iniciales que estará ocupada la maquina m en el producto i
DD_d Destinos que no pueden estar en la misma ruta de un vehículo que va hacia d
DG_g Destinos a través de los cuales se puede satisfacer la demanda del canal g

Parámetros

D_{sd} Demanda pronosticada para el SKU s y el destino d (toneladas)
ED_{sgw} Demanda esperada para el SKU s del canal g en el periodo w (toneladas)
ConvP_s Conversión a pallets del SKU s (pallet/tonelada)
CP_{sm} Costo de producción (ton) del SKU s en la máquina m (\$/ton)
PT_{sm} Tiempo de procesamiento del SKU s en la máquina m
ST_{ijm} Tiempo de set up de pasar de pasar del producto en la máquina m
CapM_{mt} Capacidad en horas de la máquina m en el periodo t
MinP_s Producción mínima del SKU s
CapProd_s Producción máxima del SKU s
CT_{ae} Costo de transporte de ir de a hasta e
CFT Costo fijo de transporte según el tipo de vehículo h
CS_{ijm} Costo de set up de pasar del producto i al j en la máquina m
CB_{sd} Costo de pedidos pendientes de SKU s al destino d
CHP Costo de mantener inventario en la planta
CL_s Costo de incumplir la política de inventario del SKU s en la planta
CapP Capacidad de almacenamiento de la planta
ConvV_s Conversión de volumen del SKU s
OI_s Inventario objetivo del SKU s
CapV_v Capacidad en toneladas del vehículo v
CapVol_v Capacidad en volumen del vehículo h
CapVP_v Capacidad en pallets del vehículo v
Dist_{ae} Distancia que hay entre a y e
Invl_s Inventario inicial del SKU s
RD_{sct} Restricción de despacho del SKU s al centro c por capacidades de inventario en el centro c en el periodo t (esto no se usa porque no es muy usual, pero puede pasar)
MinV_v Ocupación mínima del vehículo v (toneladas)
MinVol_h Ocupación mínima del vehículo h (volumen)
MinVP_h Ocupación mínima del tipo de vehículo h (pallets)
Bin_{sd} Pedidos pendientes del SKU s del cliente d del final de la semana del mes anterior
factV_{ae} 1 si el arco a,e es factible; 0 en otro caso

TransitCOL Tiempo de tránsito entre la planta y el centro de distribución
FPO_{sd} Ordenes en firme durante el mes del SKU s a entregar en el destino d

ProdIn_{md} Producto inicial en la máquina m en la planta p
Veh_{vd} 1 si el vehículo v va al destino d; 0 en otro caso

Variables de decisión¹

vPP_{smdvt} Cantidad en toneladas del SKU s producido en la maquina m, durante el periodo t para ser enviado/facturado en el vehículo v que se dirige hacia el destino d
iDisp_{sdrv} Cantidad en pallets del SKU s producido en la planta que se enviara al destino d en el periodo t a través del vehículo v.
vI_{st} Inventario en toneladas del SKU s en la planta al final del periodo t
iB_{sgw} Pedidos pendientes en pallets del sku s del canal g en el periodo w (semana)
vEI_s Exceso de inventario (en toneladas) con relación al inventario objetivo del SKU s en la planta al final del horizonte de planeación
vLI_s Faltante de inventario (en toneladas) con relación al inventario objetivo del SKU s en la planta al final del horizonte de planeación
vUT_{mt} Horas de uso de la maquina m durante el periodo t
vHOC_{vt} hora de disponibilidad del vehículo v en el periodo t
bDep_{vtd} 1 si el vehículo v que inicio proceso de cargue de la planta para ir hacia el destino d al final del periodo t. 0 en otro caso
bUS_{smt} 1 si el SKU s se produce en la maquina m de la planta p durante el periodo t. 0 en otro caso.

Función Objetivo

$$(1) \quad \min Z: \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} CP_{sm} * vPP_{smdvt} + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} CFT * bDEP_{vtd} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} CHP * vI_{st} + \sum_{s \in S} CL_s * vLI_s + \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \sum_{w \in W} CB_{sd} * vB_{sgw}$$

Restricciones

$$(2) \quad vI_{st} = vI_{s(t-1)} + \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} vPP_{smdvt} - \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} iDisp_{sdrv} * ConvP_s \quad \forall s \in S; \forall t \in T; t > 0$$

$$(3) \quad vI_{s0} = InvI_s \quad \forall s \in S$$

$$(4) \quad \sum_{d \in D_g} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T; t \leq w} iDisp_{sdrv} + iB_{sgw} - iB_{sg(w-168)} = ED_{sgw} \quad \forall s \in S; \forall g \in G; \forall w \in W$$

$$(5) \quad \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} vDisp_{sdrv} \geq FPO_{sd} \quad \forall s \in S, \forall d \in D$$

$$(6) \quad bDep_{vtd} \leq 1 - \frac{\sum_{i \in DD_d} bDep_{vtd}}{|DD_d|} \quad \forall v \in V; \forall t \in T; \forall d \in D$$

$$(7) \quad vI_{s|T|} - \sum_{d \in D} iB_{sd|T|} * ConvP_s - vEI_s + vLI_s = OI_s \quad \forall s \in S; \forall w \in W$$

$$(8) \quad iB_{sg0} = Bin_{sg} \quad \forall s \in S; \forall g \in G$$

$$(9) \quad \sum_{s \in S} iDisp_{sdrv} \leq bDep_{vtd} * CapVP_v \quad \forall d \in D; \forall v \in V; \forall t \in T$$

$$(10) \quad \sum_{m \in M_s} \frac{iPP_{smdvt}}{ConvP_s} = iDisp_{sdrv} \quad \forall v \in V; \forall t \in T; \forall s \in S; \forall d \in D$$

$$(11) \quad \sum_{s \in S} iDisp_{sdrv} \geq MinV_v * bDep_{vtd} \quad \forall d \in D; \forall v \in V; \forall t \in T$$

$$(12) \quad vHOC_{v0} = \sum_{d \in D: d = \text{centro nacional}} bDep_{v0d} * (TransitCOL) \quad \forall v \in VC1$$

$$(13) \quad vHOC_{vt} = vHOC_{v(t-1)} + \sum_{d \in D: d = \text{centro nacional}} bDep_{vtd} * (TransitCOL) \quad \forall v \in VC1; \forall t \in T$$

$$(14) \quad \sum_{d \in D} bDep_{vtd} * t * 2 \geq vHOC_{v(t-1)} \quad \forall t \in T; t > 0; \forall v \in VCN$$

$$(15) \quad bDep_{vtd} \leq 1 * Veh_{vd} \quad \forall d \in D; \forall t \in T; \forall v \in V$$

$$(16) \quad \sum_{s \in S} iDisp_{sdrv} \leq bDep_{vtd} * CapVP_v * Veh_{vd} \quad \forall d \in D; \forall v \in V; \forall t \in T$$

$$(17) \quad \sum_{v \in S_{K_k}} vI_{st} \leq CapI_k; \quad \forall t \in T, \forall k \in K$$

$$(18) \quad vUT_{mt} = \sum_{v \in V} \sum_{v \in V} \sum_{s \in SM_m} vPP_{smdvt} * PT_{sm} \quad \forall m \in M; \forall t \in T; t < |T|$$

$$(19) \quad \sum_{u \in UIN_{sm}} bUS_{smu} = 1 \quad \forall s \in S, \forall m \in M$$

¹ El nombre de la variable se antecede con las letras v, b, i según el tipo de variable. Para el caso de variables libres se identifican con la letra (v). Las variables binarias se identifican con la (b) y las variables enteras con la letra (i).

$$(20) \quad \sum_{\forall d \in D} \sum_{\forall t \in T_{su}} vPP_{smdvl} \geq MinP_s * bUS_{smu} \quad \forall s \in S, \forall m \in M, \forall u \in U$$

$$(21) \quad vUT_{mt} \leq CapM_{mt} \quad \forall m \in M, \forall t \in T$$

$$(22) \quad \sum_{\forall d \in D} \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall t \in T_{u}} vPP_{smdvl} \leq CapProd_s * bUS_{smu} \quad \forall s \in S, \forall m \in M, u \in U$$

Las ecuaciones (2) y (3) corresponden a restricciones de inventario. La ecuación (2) establece el balance del inventario y la ecuación (3) establece el inventario inicial. La ecuación (4), satisface el cubrimiento de la demanda teniendo en cuenta los pedidos pendientes. La ecuación (5) por su parte corresponde al cubrimiento mínimo de la demanda, teniendo en cuenta los pedidos en firme de despacho directo y los del centro de distribución en caso de que los haya. La ecuación (6), activa aquellos clientes que pueden ubicarse en una misma ruta. Por su parte, la ecuación (7) corresponde a la política de inventario y la ecuación (8) al nivel de pedidos pendientes iniciales. Las ecuaciones (9 a 11), relacionan los despachos con la salida de vehículos, balancean los despachos con el nivel de producción y aseguran los despachos mínimos. Las ecuaciones (12 a 14) hacen referencia a: la hora inicial que marca la disponibilidad de vehículos del centro de distribución (12), la hora de disponibilidad del vehículo en el centro de distribución (13), la ocupación de los vehículos que realizan despachos directos (14). La ecuación (15), relaciona la asignación de vehículos por el tipo de cargue. A su vez, la ecuación (16) asegura que lo que se envíe y cargue en el vehículo no supere la capacidad de este. Con respecto al inventario, la ecuación (17) garantiza que el inventario en toneladas del SKU s al final del periodo t no sea mayor al espacio disponible para almacenar ese inventario. Adicionalmente, se relaciona el uso de la máquina con las cantidades en toneladas del SKU s que se produce teniendo en cuenta su tiempo de procesamiento (18). La hora de inicio de ocupación de la máquina se establece con la ecuación (19).

Finalmente, las ecuaciones (20 a 22), corresponden a las restricciones de producción, asegurando: la producción mínima a cumplir por cada SKU s (20), la capacidad de producción en horas (21) y la capacidad de producción por SKU s (22).

La implementación del modelo 1 se realizó a través de Gusek², tomando como instancia de prueba la información de producción y despachos realizados en el mes de marzo, Sin embargo, dado el tamaño del problema, no fue posible obtener una respuesta. Dado lo anterior, se optó por la opción del uso de una segunda herramienta, siendo esta Neos Server³, con la cual, al igual que en el primer caso, y debido a los altos tiempos de procesamiento el solver no generó ninguna respuesta.

- b. Se diseñó un segundo modelo (en adelante modelo 2), el cual se alimenta de los resultados de producción que se obtienen mediante la implementación del modelo 1, volviéndolos factibles, y busca dar solución únicamente al problema de secuenciación. Para el desarrollo de este modelo, como supuesto adicional se contempló que la granularidad de los periodos es de ocho (8) horas.

El modelo 2 se presenta a continuación:

² Gusek es una herramienta que permite la resolución de problemas de optimización de GLPK en lenguaje matemático. <http://gusek.sourceforge.net>

³ Neos Server hace referencia a un servicio online que facilita la resolución de problemas de optimización numérica. *NEOS Server for Optimization* (neos-server.org)

Conjuntos

T Periodos
 D Destinos
 S SKU's
 M Máquinas
 G Canales de venta
 SM SKU's que se pueden hacer en la máquina m
 SD Productos que pueden ser entregados en el destino d
 MS Máquinas que pueden producir el SKU s
 A Arcos de transición del SKU i en S a j en S permitidos en la máquina m
 AF Productos que pueden seguir el SKU s en la máquina m
 AP Productos que pueden anteceder al SKU s en la máquina m
 TT Periodos requeridos para hacer el lote mínimo de producción si se inicia en el turno t

UIN Turnos iniciales que estará ocupada la máquina m en el producto i

Parámetros

EP_{st} Demanda esperada para el SKU s en el periodo t (toneladas)
 PT_{sm} Tiempo de procesamiento del SKU s en la máquina m
 ST_{ssm} Tiempo de set up de pasar del producto i al j en la máquina m
 $CapM_m$ Capacidad en horas de la máquina m en el periodo t
 $MinP_s$ Producción mínima del SKU s
 $CapProd_s$ Producción máxima del SKU s
 CB_s Costo de pedidos pendientes del SKU s
 Bin_s Pedidos pendientes del SKU s

Variables de decisión

$vPP_{smt} \geq 0$ Cantidad en toneladas del SKU s producido en la máquina m durante el periodo t
 $vB_{st} \geq 0$ Pedidos pendientes en pallets del SKU s en el periodo t
 $vUT_{mt} \geq 0$ Horas de uso de la máquina m durante el periodo t
 $vUS_{smt} \begin{cases} 1 & \text{Si el SKU } s \text{ se produce en la máquina } m \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
 $vCH_{ssmt} \begin{cases} 1 & \text{Si el SKU } i \text{ en } S, \text{ antecede al producto } j \text{ en } S \text{ la máquina } m \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
 $vBEF_{ssmt} \begin{cases} 1 & \text{Si el SKU } i \text{ en } S, \text{ precede al producto } j \text{ en } S \text{ la máquina } m \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
 $iRK_{smt} \geq 0$:

Función Objetivo

$$(23) \quad \text{Min } Z: \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} CB_s * vB_{st}$$

Restricciones

$$(24) \quad \sum_{m \in M} vPP_{smt} + vB_{st} - vB_{s(t-1)} = EP_{st} \quad \forall s \in S; \forall t \in T: t > 0$$

$$(25) \quad vB_{s0} = Bin_s \quad \forall s \in S$$

$$(26) \quad \sum_{s \in S: (s,m) \in SM} vPP_{smt} * PT_{sm} + \sum_{i \in S} \sum_{j \in S: (i,j,m) \in A} (vBEF_{ijmt} * ST_{ijm} + vCH_{ijm(t-1)} * ST_{ijm}) = vUT_{mt} \quad \forall m \in M; \forall t \in T: t > 0$$

$$(27) \quad vUT_{mt} = CapM_{mt} \quad \forall m \in M; \forall t \in T: t > 0$$

$$(28) \quad vPP_{smt} \leq 50 * vUS_{smt} \quad \forall s \in S; \forall m \in M; \forall t \in T: t > 0$$

$$(29) \quad \sum_{j \in S: (j,i,m) \in AP} vCH_{jim(t-1)} + \sum_{j \in S: (j,i,m) \in AP} vBEF_{jimt} - \sum_{j \in S: (j,i,m) \in AF} vCH_{ijmt} - \sum_{j \in S: (j,i,m) \in AF} vBEF_{ijmt} = 0 \quad \forall i \in S; \forall m \in M; \forall t \in T: t > 0$$

$$(30) \quad \sum_{j \in S: (j,i,m) \in AF} vCH_{ijmt} + \sum_{j \in S: (jim) \in AF} vBEF_{ijmt} = vUS_{imt} \quad \forall i \in S; \forall m \in M; \forall t \in T: t > 0$$

$$(31) \quad iRK_{jmt} - iRK_{imt} + |SM| * (1 - vBEF_{ijmt}) \geq 1 \quad \forall i \in S; \forall j \in S; \forall m \in M; \forall t \in T: t > 0$$

$$(32) \quad \sum_{s \in S: (s,m) \in SM} vUS_{smt} \leq 1 \quad \forall m \in M; \forall t \in T: t > 0$$

La ecuación (23), que corresponde a la función objetivo del modelo, minimiza el costo de pedidos pendientes del SKU s en el periodo t .

La ecuación (24), satisface el cubrimiento de la demanda teniendo en cuenta los pedidos pendientes. La ecuación (25) balancea el nivel de pedidos pendientes iniciales. La ecuación (26), hace referencia a las horas de uso de las máquinas, indicando que los tiempos de uso (procesamiento de SKU y set ups) no difieren del tiempo total de uso de la máquina en horas. Por su parte, la ecuación (27) indica que el tiempo total de uso de la máquina en horas debe coincidir con la capacidad de uso de la maquina en horas. Mediante la ecuación (28), se establece la capacidad de producción del SKU s . Las ecuaciones (29) y (30), corresponden a las restricciones de secuenciación de máquinas por medio de la relación de productos que anteceden y preceden en cada máquina. La ecuación (32) establece que una máquina puede procesar un solo producto en el periodo t .

Con la finalidad de revisar la validez del modelo 2, se usó la instancia del modelo 1. Sin embargo, dado que este modelo requiere la programación de producción, y teniendo en cuenta que el modelo 1 no convergió a ningún resultado, se tomaron las producciones reales del mes de marzo que suministró la compañía, con lo cual fue posible alimentar los parámetros del modelo y de esta forma realizar una prueba del modelo.

De manera inicial el modelo 2 fue implementado en Gusek, herramienta en la cual el modelo tomó un tiempo de procesamiento superior a 20 minutos para obtener una respuesta factible. Posteriormente, el modelo se envió a Neos. Sin embargo, los tiempos de respuesta no fueron diferentes a los tiempos que arrojó Gusek. Por este motivo y debido a la robustez del modelo, se descartó el uso del modelo 2 para la resolución del problema.

c. Se desarrolló un tercer modelo (modelo 3) que toma como datos de ingreso las soluciones de los modelos 1 y 2. El modelo 3 tiene por objetivo dar solución al problema de distribución.

Los supuestos adicionales que se contemplaron en este modelo son:

- ✓ La granularidad de los periodos t es ser en horas.
- ✓ La producción ingresa a este modelo como un parámetro, el cual es $PPst$.
- ✓ Existen vehículos que están reservados para las entregas de los centros de distribución, por lo tanto, a estos se les debe tener en cuenta la ocupación del vehículo.
- ✓ Los tiempos de ocupación de un vehículo que va al centro de distribución están estandarizados teniendo en cuenta tiempo de cargue, tiempo de tránsito, tiempo de descargue y tiempo de tránsito de regreso.
- ✓ Existen diferentes tipos de vehículo dependiendo de su capacidad de carga. Sin embargo, no se hace uso de un conjunto de tipo de vehículo ya que se tiene un conjunto de vehículos que nos permite caracterizar e identificar cada elemento del conjunto con una capacidad de carga.
- ✓ Las variables $iDisp$ e iB son categorizadas como variables enteras (i) debido a que los despachos desde las planas se realizan en pallets y el cumplimiento de facturación debe verse en pallets exactos.

El modelo 3 se presenta a continuación:

Variables de decisión

$iDisp_{sdvt}$ Cantidad en pallets del SKU s producido en la planta que se enviara al destino d en el periodo t a través del vehículo v .

vI_{st} Inventario en toneladas del SKU s en la planta al final del periodo t

iB_{sg} Faltantes en pallets del SKU s del canal g

iBN_{sg} Faltantes o excesos del SKU s del canal g

iBC_s Faltantes en pallets del SKU s Vs. El cumplimiento esperado del centro de distribución

$iBCN_s$ Faltantes o sobrantes en pallets del SKU s Vs. El cumplimiento esperado del centro de distribución

$bDep_{vt}$ 1 si el vehículo v es usado en el periodo t , o en caso contrario

Función objetivo

$$(33) \quad \min Z: \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} vI_{st} * CHP + \sum_{s \in S} CBC * iBC_s + \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} CB * iB_{sg} + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} bDep_{vt} * CFT_v + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} CVT_d * iDisp_{sdvt}$$

Restricciones

$$(34) \quad vI_{s1} = InvI_s + PP_{(s-1),0} - \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} iDisp_{sdv1} * ConvP_s \quad \forall s \in S$$

$$(35) \quad vI_{st} = vI_{s(t-1)} + PP_{(s-1)(t-1)} - \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} iDisp_{sdvt} * ConvP_s \quad \forall t \in T$$

$$(36) \quad \sum_{d \in DGS_{g-1}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} iDisp_{sdvt} + iBN_{sg} + \sum_{d \in DGS_{g-1}} DispIn_{sd} = ED_{sg} \quad \forall s \in S; \forall g \in G$$

$$(37) \quad iB_{sg} \geq iBN_{sg} \quad \forall s \in S; \forall g \in G$$

$$(38) \quad \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} iDisp_{sdvt} \leq FPO_{sd} - DispIn_{sd} \quad \forall s \in S; \forall d \in D$$

$$(39) \quad \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} iDisp_{sdvt} \leq CapVP_v * bDep_{vt} \quad \forall v \in V; \forall t \in T$$

$$(40) \quad \sum_{s \in S} iDisp_{sdvt} \leq CapVP_v * Veh_{vd} \quad \forall v \in V; \forall t \in T; \forall d \in D$$

$$(41) \quad \sum_{s \in S} vI_{st} * 1/ConvP_s \leq CapP \quad \forall t \in T$$

$$(42) \quad \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} iDisp_{s1vt} + iBCN_s + DispIn_{s1} = FPO_{s1} * phas \quad \forall s \in S$$

$$(43) \quad iBC_s \geq iBCN_s \quad \forall s \in S$$

$$(44) \quad \sum_{v \in V} bDep_{vt} \leq 4 \quad \forall t \in T$$

$$(45) \quad \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} iDisp_{sdvt} \geq MinVP_v * bDep_{vt} \quad \forall t \in T; \forall v \in V$$

Las restricciones (34) y (35) corresponden al equilibrio de inventario. La ecuación (36) corresponde al cumplimiento de demanda por canal, teniendo en cuenta que cada cliente satisface la demanda de un canal en específico, esto se da a través del subconjunto DGS . De igual forma esta ecuación tiene en consideración $DispIn$, que es el cumplimiento de la demanda de semanas pasadas. La ecuación (38) asegura que no se envíe mayor producto al solicitado por despacho directo. En este mismo sentido se encuentra la restricción (42), que nos brinda el cumplimiento esperado del centro de distribución, el cual esta determinado por un porcentaje estimado de suministro llamado *phas*. Las ecuaciones (37) y (43), calculan los faltantes de los cumplimientos mencionados respectivamente. La restricción (39) corresponde a la capacidad máxima de un vehículo, mientras que la restricción (45) corresponde a la ocupación mínima de un vehículo. La ecuación (40) asegura que un vehículo v no sea asignado a un cliente que este fuera de su zona geográfica. Finalmente la restricción (41), restringe la capacidad de inventarios, y la ecuación (44) restringe la capacidad de carga de vehículos de despacho directo en planta.

7.1.3 Definir el método exacto, heurístico o metaheurístico que sea más conveniente para resolver el problema propuesto: en la implementación de los modelos 1 y 2, a causa de los altos tiempos de procesamiento y al tamaño del problema no fue posible obtener resultados que permitieran realizar un análisis a la situación de la empresa. Por esta razón,

se descartó el uso de estos modelos para la resolución del problema integrado de programación de producción, secuenciación y distribución.

Por lo anterior, se buscó implementar un método alternativo que homologara el planteamiento inicial, siendo este una meta-heurística, en la cual se aplica la metaheurística Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP), y un modelo matemático relajado. Esto con el fin de trabajar de manera integrada el problema de secuenciación de producción y distribución.

La lógica de la meta-heurística consiste en que el GRASP va iterando diferentes secuencias de producción y el modelo relajado resuelve el problema de VRP con entregas divididas. El planteamiento se realizó de esta forma debido a los pequeños tiempos de corrida del modelo 3.1, el cual es una versión relajada del modelo matemático 3, los cuales se encuentran en el literal c de la sección 7.1.2 y final de la sección 7.1.3 respectivamente.

El GRASP es una metaheurística de inicio múltiple (Lin and Kernighan, 1973), la cual se compone de dos fases, una fase constructiva y una fase de búsqueda local. (Casas-Ramírez et al., 2018) indican que el inicio múltiple se debe al proceso aleatorio que se ejecuta en la fase constructiva, fase en la cual se obtiene una solución factible con cada iteración para dar continuidad a la segunda fase, la cual busca mejorar la solución hallada en la primera fase (Boudia et al., 2007). El Procedimiento general de esta metaheurística se detalla en el pseudocódigo 1.

Pseudocódigo 1 Procedimiento general del GRASP

```
Procedure Grasp ()
1   Read Input ()
2   BestSolution = m
3   For  $i=1$  to Solutions do
4     Construct Greedy Randomized Solution (solution)
5     K-Opt neighborhood (solution)
6     If  $w(\text{solution}) < w(\text{Best Solution})$  then
7       Best Solution = Solution
8     End If
9   Next
10  End
```

Para la resolución del problema, el uso del GRASP permite la obtención de múltiples y buenas respuestas en su fase constructiva, esto es debido a su componente aleatorio, el cual aporta diversidad en las soluciones iniciales. Adicionalmente, esta fase, debido a su flexibilidad permite la fácil adaptación de las condiciones y restricciones del problema para la generación de soluciones, que, aunque se realiza de manera aleatoria, es posible controlarla mediante la asignación de criterios de selección, lo que permite realizar una exploración del espacio eficientemente evitando caer en algún óptimo local.

Con el fin de entender la aplicación del GRASP en la presente investigación, en la figura 1 se aprecia la representación de solución del problema, la cual consiste en una lista de duplas producto-turno por cada máquina. Para ello, se estableció junto con el line scheduler de la

empresa un máximo de cambios de productos semanales por máquina que, para este caso, es de cuatro cambios.

Figura 1 Representación de la solución

Máquinas / Asignación	Cambio 1		Cambio 2		Cambio 3		Cambio 4	
	Producto	Turnos	Producto	Turnos	Producto	Turnos	Producto	Turnos
Máquina 1	0	2	2	6	2	7	2	6
Máquina 2	*	*	*	*	*	*	*	*
Máquina 3	*	*	*	*	*	*	*	*
Máquina 4	*	*	*	*	*	*	*	*
Máquina 5	*	*	*	*	*	*	*	*
Máquina 6	13	7	13	6	19	3	11	5

De esta manera, la fase constructiva del GRASP asigna duplas factibles a cada máquina hasta llenar su capacidad. Entendiéndose capacidad como la cantidad de turnos que se pueden asignar en una semana, que para este caso es de 21 turnos. En el pseudocódigo 2 se puede apreciar el procedimiento correspondiente a la fase constructiva aplicada.

Pseudocódigo 2 Procedimiento fase constructiva

Procedure Construct Greedy Randomized Solution (solution)

- 1 Solution={}
- 2 **While** Solution not finished
- 3 Update AdaptiveGreedyFunction
- 4 MakeRCL (RCL)
- 5 α = Select Elementat Random (RCL)
- 6 Solution =Solution + $\{\alpha\}$
- 7 **End while**
- 8 Calculate Objective Function Calling MIP
- 9 **End**

La función de utilidad aplicada en la fase constructiva es calculada con base en los costos de producción, alistamiento de máquina, faltantes y excesos de demanda. Es decir, que en esta fase no se tienen en cuenta los costos relacionados al problema de distribución. Sin embargo, al terminarse la generación de una solución, se invoca el modelo 3.1 con el fin de evaluar el costo de una solución en términos de los costos de producción y distribución. Esto se hace de esta manera para no incurrir en el tiempo de corrida del modelo matemático en la evaluación de la función de utilidad de cada elemento de una posible solución.

El GRASP cuenta con una fase de búsqueda local. Dicha fase busca mejorar la calidad de las respuestas obtenidas en la fase constructiva, no obstante, la evaluación de la calidad de cada cambio implica la ejecución del modelo 3.1, así que para minimizar los posibles cambios se aplicó la búsqueda local a través de una vecindad *k-opt*. El movimiento consiste en el intercambio de k-duplas en una máquina, es decir, un intercambio de la secuencia de productos.

De igual forma, con el ánimo de limitar la cantidad de movimientos a evaluar se agregaron los siguientes criterios en la evaluación de candidatos: a) el cambio no es entre duplas de un mismo producto y b) el cambio representa una mejora en los tiempos de alistamiento de la

máquina. Esta segunda condición se dio debido a que el principal criterio de secuenciación para la empresa es la optimización de los tiempos de alistamiento. El pseudocódigo correspondiente a esta fase se presenta a continuación.

Pseudocódigo 3 Procedimiento k-opt neighborhood

Procedure k-Opt Neighborhood (solution)
1 Initialize the current solution
2 Repeat
3 Select a candidate solution from the k-opt neighborhood of the current solution
4 **If** k-opt Change for \neq products **and** set up time improves
5 Evaluate the candidate solution's objective function value
6 **If** the candidate solution improves the current solution
7 Update the current solution with the candidate solution
8 **Else**
9 Exit the loop (local optimum reached)
10 Until stopping criterion is met
11 **End**

Posteriormente, se aplicó relajación al modelo 3, obteniendo el modelo 3.1, en el cual se eliminan las variables binarias. Esto permite obtener tiempos de procesamiento menores a un minuto.

El modelo 3.1 se presenta a continuación:

Variables de decisión

- $iDisp_{sdvt}$** Cantidad en pallets del SKU s producido en la planta que se enviara al destino d en el periodo t a través del vehículo v .
- vI_{st}** Inventario en toneladas del SKU s en la planta al final del periodo t
- iB_{sg}** Pedidos pendientes en pallets del SKU s del canal g
- $iT_{v,td}$** Número de viajes que realiza el vehículo v con tipo de viaje td (despacho directo o centro de distribución)
- iBN_{sg}** Faltantes o excesos del SKU s del canal g
- iBC_{sg}** Faltantes en pallets del SKU s Vs. El cumplimiento esperado del centro de distribución
- $iBCN_{sg}$** Faltantes o sobrantes en pallets del SKU s Vs. El cumplimiento esperado del centro de distribución

Función objetivo

$$(46) \quad \min Z: \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} vI_{st} * CHP + \sum_{s \in S} CBC * iBC_s + \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} CB * iB_{sg} + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} CBV * (CapVP_v - iDisp_{sdvt}) + \sum_{v \in V} \sum_{t \in TD} iT_{vt} * CFT_v + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} iDisp_{sdvt} * CVT_d$$

Restricciones

$$(47) \quad vI_{s0} = InvI_s + PP_{(s-1),0} - \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} iDisp_{sdv1} * ConvP_s \quad \forall s \in S$$

$$(48) \quad vI_{st} = vI_{st} + PP_{(s-1)(t-1)} - \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} iDisp_{sdvt} * ConvP_s \quad \forall t \in T2$$

- (49) $\sum_{d \in DGS_{g-1}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} iDisp_{sdvt} + iBN_{sg} + \sum_{d \in DGS_{g-1}} DispIn_{sd} = ED_{sg} \quad \forall s \in S; \forall g \in G$
- (50) $iB_{sg} \geq iBN_{sg} \quad \forall s \in S; \forall g \in G$
- (51) $\sum_{v \in V} \sum_{t \in T} iDisp_{sdvt} \leq FPO_{sd} - DispIn_{sd} \quad \forall s \in S; \forall d \in D2$
- (52) $\sum_{s \in S} \sum_{d \in D} iDisp_{sdvt} \leq CapVP_v \quad \forall v \in V; \forall t \in T$
- (53) $\sum_{s \in S} iDisp_{sdvt} \leq CapVP_v * Veh_{vd} \quad \forall v \in V; \forall t \in T; \forall d \in D$
- (54) $\sum_{s \in S} vI_{st} * 1/ConvP_s \leq CapP \quad \forall t \in T$
- (55) $iT_{v1} = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} iDisp_{s1vt} / CapVP_v \quad \forall v \in V$
- (56) $iT_{v2} = \sum_{s \in S} \sum_{d \in D2} \sum_{t \in T} iDisp_{sdvt} / CapVP_v \quad \forall v \in V$
- (57) $\sum_{v \in V} \sum_{t \in T} iDisp_{s1vt} + iBCN_s + DispIn_{s1} = FPO_{s1} * phas \quad \forall s \in S$
- (58) $iBC_s \geq iBCN_s \quad \forall s \in S$
- (59) $\sum_{s \in S} \sum_{d \in D2} \sum_{v \in V2} iDisp_{sdvt} \leq 4 * 57 \quad \forall t \in T$

Con el fin de asegurar un uso adecuado de los vehículos en términos de la ocupación se penalizó en la función objetivo la cantidad de pallets faltantes para llenar un vehículo. Así mismo, se realizó una estimación de la capacidad de cargue de los vehículo de despacho directo a través de la restricción (59) y la variable vT es una aproximación de la cantidad de viajes que se realizan por despacho directo y hacia el centro de distribución. Finalmente, las restricciones asociadas al mínimo y máximo de ocupación de un vehículo ya no tienen en cuenta la variable binaria $bDep$.

7.2 Objetivo 2: Evaluar el impacto de los resultados teóricos de la herramienta de programación en términos de costos logísticos de almacenamiento, transporte y producción.

El método utilizado para comparar los resultados obtenidos por el modelo vs los resultados reales de la empresa fue el de diferencias de medias a través de una prueba T pareada, usando `stats.ttest_rel()` de la biblioteca SciPy de python y de esta forma poder determinar si las diferencias medias son estadísticamente significativas. Para ello se revisan los siguientes valores: la diferencia de medias, la desviación estándar de la diferencia, la estadística t y el valor-p. La prueba T pareada evalúa si la diferencia media es significativamente diferente de cero, lo que indica una diferencia significativa entre el modelo y los resultados reales. De igual forma, esta se usa para datos emparejados y permite comparaciones con muestras pequeñas.

7.3 Objetivo 3: Proponer una metodología para la presentación y selección de otros portafolios de SKUs de despacho directo a los actuales, pero con ahorro de costos logísticos similares o mayores al actual.

La última etapa del proyecto contempla el planteamiento y ejecución de una metodología que permita a la compañía realizar la inclusión de productos al portafolio de productos ya existentes dentro de los productos que se encuentran catalogados en los despachos directos. El desarrollo de esta etapa se realiza con base en los productos y clientes que hacen parte de la familia de productos objeto de estudio en este documento.

La inclusión de productos puede darse en dos vías: a) la inclusión de un nuevo producto y, b) la inclusión de un producto que ya existe en la compañía pero que no ha sido adquirido por ninguno de los clientes de despachos directos o que no ha tenido más del 10% de participación

en las ventas. El método que se plantea relaciona la opción b) antes descrita, esta se ejecuta siguiendo las siguientes actividades:

7.3.1 Metodología para inclusión de nuevos productos al portafolio de despachos directos

- a. **Aplicar diagrama de Pareto a las ventas de todos los productos de la empresa por cliente:** esta primera actividad contempla la aplicación de la regla o principio de Pareto, con la cual podremos identificar con mayor facilidad cuales son los productos que representan el 80% del valor de las ventas de la compañía. Al realizar la aplicación de este principio en este estudio, obtendremos el listado de los códigos de los productos candidatos a ser incluidos dentro del paquete de productos de despachos directos buscando como beneficio, no solo el incremento del portafolio de productos, sino también el incremento en las ventas. Este listado en adelante se llamará *lista de productos candidatos*, la cual reúne el 20% de los productos que está generando el 80% de las ventas.
- b. **Análisis de la lista de productos candidatos:** una vez obtenida la lista de productos candidatos, se realiza la validación de cuales de esos productos ya se encuentran incluidos en los despachos directos. Al realizar esta marcación, la lista de productos candidatos es actualizada dejando únicamente los productos que no se encuentran en despachos directos. Esta lista la llamaremos *lista de candidatos actualizada*, para la cual se mantendrá el orden de priorización que se obtuvo para cada código de producto candidato en el Pareto del numeral 1.
En el caso en que los productos incluidos en la lista de productos candidatos ya se encuentren en despachos directos, se tomarán productos de manera descendente conforme a su respectiva participación en las ventas.
- c. **Estimar cuota de la lista de candidatos actualizada:** se debe estimar la cuota de cada uno de los productos incluidos en la lista de candidatos actualizada, esta estimación se realiza con las cuotas iniciales de despacho directo de códigos similares en términos de marca y gramaje. Si es un nuevo gramaje, se tomará como referencia un gramaje similar.
- d. **Ejecución del modelo 3:** se ejecuta el modelo 3 con el objetivo de garantizar el cumplimiento de los despachos directos previamente comprometidos. Es decir, que se toma el plan de producción resultante en el objetivo 2, y se ajustan las cuotas de despacho directo incluyendo la estimación de la cuota de la lista de candidato actualizada dentro de los parámetros de entrada del modelo 3 con el fin de evaluar el comportamiento de este en términos de las capacidades de cargue, producción e inventario, permitiendo determinar la viabilidad de incluir uno o varios de los productos de la lista de candidatos actualizada al portafolio de productos de despacho directo existente. Así mismo, permitiendo calcular los costos logísticos y el porcentaje de cumplimiento de la cuota de demanda.
- e. **Evaluación de los criterios de selección:** al obtener los resultados de la ejecución del modelo 3, en el caso en que la inclusión de un producto sea favorable, se deben validar los siguientes indicadores:

- **Porcentaje de cumplimiento de cuota:**

$$\% \text{ Cumplimiento de cuota} = \frac{\text{Cuota entregada}}{\text{Total de la cuota comprometida}} * 100$$

- **Costos logísticos:** hace referencia a la suma de los costos de producción, costos de almacenamiento, transporte y faltantes.

Si al realizar la evaluación de los dos indicadores se obtiene un cumplimiento de despacho directo superior al 60% y adicionalmente se obtienen ahorros en costos superiores a los ahorros generados en el objetivo 2, la inclusión del producto es aceptada. En caso contrario, el producto es descartado y se continua el proceso de evaluación con el siguiente producto de la lista de candidatos actualizada.

8. Resultados y análisis

8.1 Objetivo 1: con la aplicación del método descrito en el numeral 7 de esta investigación se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 1 Resultados obtenidos en el mes de marzo

MARZO	WK1	WK2	WK3	WK4
% Cumplimiento Despacho Directo	22.49%	52.67%	63.76%	90.34%
% Ocupación de vehículos Despacho Directo (Truckfill)	91.02%	88.63%	86.00%	88.95%
Mula	9	12	3	6
Doble Troque	15	21	11	27
% Mula	37.50%	36.36%	21.43%	18.18%
% Doble troque	62.50%	63.64%	78.57%	81.82%
Costos logísticos Modelo	\$38,106,078.80	\$ 16,057,743.78	\$ 7,300,713.12	\$ 3,625,224.74

Con base en la tabla 1, se puede decir que el porcentaje de cumplimiento del despacho directo muestra un aumento progresivo a lo largo del mes de marzo, logrando un cumplimiento del 90.34% de cumplimiento al final del mes.

De otro lado, el porcentaje de ocupación de los vehículos de despacho directo no presentan mayor variabilidad entre cada semana, manteniéndose entre el 86% y el 91%.

El comportamiento de los costos logísticos disminuye considerablemente semana a semana, lo cual representa una ventaja competitiva para la empresa, ya que las operaciones logísticas se están realizando de forma más eficiente.

Tabla 2 Resultados obtenidos en el mes de abril

ABRIL	WK1	WK2	WK3	WK4
% Cumplimiento Despacho Directo	33.59%	65.92%	90.37%	97.34%
% Ocupación de vehículos Despacho Directo (Truckfill)	91.65%	86.74%	87.59%	93.61%
Mula	22	16	9	0
Doble Troque	17	30	28	12
% Mula	56.41%	34.78%	24.32%	0.00%
% Doble troque	43.59%	65.22%	75.68%	100.00%
Costos logísticos Modelo	\$ 23,725,417.92	\$ 9,424,287.50	\$ 4,271,469.84	\$ 3,688,328.93

De acuerdo con la tabla 2, el porcentaje de cumplimiento del despacho directo muestra un aumento progresivo a lo largo de las cuatro semanas del mes de abril, logrando un cumplimiento del 97.34% de cumplimiento.

Así mismo, para el porcentaje de ocupación de los vehículos que realizan despacho directo, se observa que mensualmente este indicador se encuentra entre el 85% y el 94%.

Los vehículos que realizan despachos directos son de tipo Mula y Doble Troque, para los cuales, el número de viajes realizados en el mes de abril tienen un comportamiento con tendencia a la baja para el caso de las mulas, y que para el caso de los vehículos de tipo doble troque se observa un incremento en el número de viajes entre las semanas 1 a 3, pero que en la semana 4 disminuyen a más del 50%.

Con respecto a los costos logísticos, se observa que a medida que culmina cada semana, los costos disminuyen significativamente, lo que puede indicar una mayor eficiencia en las operaciones logísticas de la empresa.

Finalmente, se realiza una breve comparación entre los resultados obtenidos para el mes de marzo vs. Los obtenidos en el mes de abril, encontrando que:

a. En marzo, el porcentaje de cumplimiento del despacho directo comienza en 22.49% en la semana 1 y aumenta gradualmente hasta llegar al 90.34% en la semana 4. En abril, el porcentaje de cumplimiento es significativamente más alto en todas las semanas, comenzando en 33.59% en la semana 1 y alcanzando un 97.34% en la semana 4. Esto indica una mejora considerable en la eficiencia y precisión del despacho directo en abril en con respecto al mes de marzo.

Es válido aclarar que los cumplimientos de despacho directo se dieron respetando los porcentajes de cumplimiento del centro de distribución por semana. En este sentido, se esperaba tener un cumplimiento del 30%, 70%, 100% y 125% en las semanas 1 a 4 respectivamente y esta premisa se está cumpliendo en cada mes se cumple

b. En marzo, el porcentaje de ocupación de vehículos en el despacho directo muestra cierta variabilidad, pero se mantiene en niveles altos. En abril, también se observa una variabilidad en este porcentaje, pero en general, los valores son ligeramente más bajos que en marzo.

c. En marzo, la cantidad de viajes realizados por cada tipo de vehículo muestra cierta variabilidad, pero de manera general, la cantidad de viajes aumenta hasta la semana 3 y luego disminuye en la semana 4 para ambos tipos de vehículos. En abril, se observa una disminución en la cantidad de viajes en vehículos tipo mula a lo largo de las semanas, llegando a 0 en la semana 4, mientras que la cantidad de viajes en vehículos tipo doble Troque muestra un aumento progresivo en todas las semanas.

d. Los costos logísticos del modelo disminuyen significativamente en cada semana tanto en marzo como en abril. Sin embargo, los costos logísticos en abril son considerablemente más bajos en comparación con marzo. En abril, los costos son de \$23,725,417.92 en la semana 1 y disminuyen hasta \$3,688,328.93 en la semana 4, mientras que en marzo son de \$38,106,078.80 en la semana 1 llegando a \$3,625,224.74 en la semana 4. Esto indica una mejora sustancial en la eficiencia y reducción de costos logísticos durante abril.

En conclusión, los resultados del mes de abril reflejan mejoras significativas en comparación con los resultados del mes de marzo en términos de cumplimiento del despacho directo, mayor porcentaje de uso de vehículos de tipo doble Troque en lugar de

mula, y una reducción notable en los costos logísticos del modelo, los cuales indican un mejor desempeño y eficiencia en las operaciones logísticas durante el mes de abril.

8.2 Objetivo 2: como parte del análisis de los resultados obtenidos tras desarrollar el objetivo 2, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por el modelo y los resultados reales de la compañía para las semanas comprendidas en los meses de marzo y abril, con el objetivo de validar la existencia de una diferencia significativa entre los resultados. La comparación de los resultados se realizó mediante la aplicación de diferencia de medias contemplando los indicadores de porcentaje de cumplimiento de demanda por semana, número de vehículos usados por semana, porcentaje de ocupación de los vehículos por semana y costos logísticos semanales.

Para cada indicador se puede concluir:

a. Porcentaje de cumplimiento de la demanda

Al obtener una diferencia de medias de 0.179, se puede concluir que, en promedio para los despachos directos, el modelo cumple la cuota de demanda un 17.9% más de lo que ejecuta la empresa actualmente, lo cual significa que la tasa de cumplimiento de despachos directos del modelo se encuentra entre un 90% y un 97%.

b. Número de vehículos

De acuerdo con estadístico, se puede afirmar que el modelo desarrollado realiza la asignación de vehículos de forma más eficiente que la forma en la que la empresa lo hace actualmente. Esto debido a que, según los resultados obtenidos, el modelo usa aproximadamente 31 vehículos menos para realizar los despachos directos.

c. Porcentaje de ocupación de los vehículos

Al igual que el indicador de cumplimiento de demanda, el comportamiento del porcentaje de ocupación de los vehículos del modelo es superior en un 24.9% sobre el porcentaje de ocupación actual de la compañía.

Al integrar este indicador con el indicador de número de vehículos usados por semana, se observa que el incremento del porcentaje de ocupación de vehículos repercute en la disminución del número de vehículos requeridos para realizar las entregas.

d. Costos Logísticos

Finalmente, al validar el comportamiento de los costos logísticos, se encuentra un ahorro de 11.443.917 unidades monetarias, sobre los costos logísticos actuales, valor que corresponde a un ahorro de un 32% sobre los costos actuales de la compañía. Este valor se debe al menor valor del gasto que se ejecuta por el mayor aprovechamiento del espacio de los vehículos (ocupación de los vehículos), lo cual como se mencionó previamente se traduce en la disminución del número de vehículos requeridos para dar cumplimiento a la demanda.

De manera general, con los resultados de cada indicador descrito previamente, se refleja la importancia de trabajar los problemas de programación de la producción y distribución de manera integrada. El hecho de que se evidencie *i)* una disminución en el número de vehículos usados, *ii)* una mayor ocupación de los vehículos y *iii)* un menor valor de los costos logísticos

se debe no solo a la relación existente entre cada uno de estos indicadores. Sino que también corresponde al hecho de que desde el momento en que se realiza la programación de la producción se está proyectando el cómo se realizará la distribución, lo que permite que la producción sea más flexible y amigable con la forma en que agrupa y completa los pedidos, garantizando a su vez el cumplimiento de la demanda.

Los resultados de los indicadores antes descritos se detallan en la tabla 3.

Tabla 3 Diferencia de medias

	Cumplimiento Despachos Directos	Número de Vehículos	Ocupación de vehículos	Costos logísticos
Diferencia de medias	0.178875755	-31.25	0.249196478	-11,443,917.4
Valor estándar de la diferencia	0.124471756	15.63449711	0.253255203	7602462.337
Prueba T	3.802153818	-5.288288320	2.603349898	-3.982625381
Valor p	0.006695968	0.0011377507	0.0352528455	0.005306096

8.3 Objetivo 3:

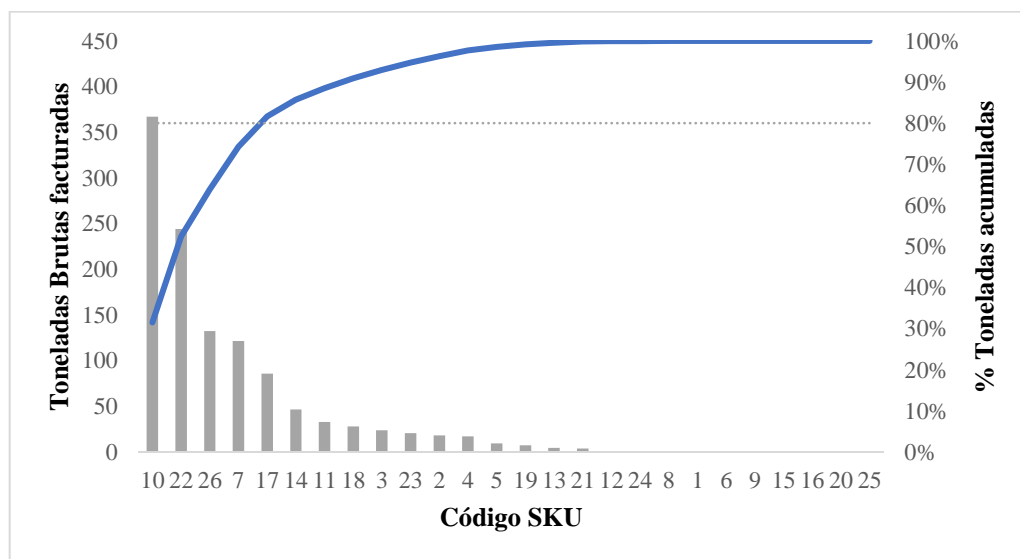
8.3.1 Aplicación de la metodología planteada

Al realizar la aplicación del método antes descrito en el problema descrito en este documento, se obtiene:

b. Diagrama de Pareto

Para realizar la construcción del diagrama de Pareto, se toman las ventas de los últimos 6 meses de los productos que hacen parte de la familia de productos y clientes a los que se realizan despachos directos y que fueron parametrizados en la etapa 1.

Figura 2 Diagrama de Pareto de las Ventas en toneladas



De acuerdo con el diagrama de Pareto en la figura 2, se obtiene el listado de productos candidatos, la cual reúne un total de cinco (5) códigos de producto relacionados en la tabla 4.

Tabla 4 Lista de productos candidatos

No.	Código de producto	% participación en ventas
1	10	31.52%
2	22	20.98%
3	26	11.37%
4	7	10.43%
5	17	7.38%

- c. Análisis lista de productos candidatos y lista de productos actualizada
Se realiza la marcación de la lista de productos candidatos identificando aquellos códigos de producto que no se encuentran en despachos directos y se actualiza el listado, obteniendo la lista de candidatos actualizada que se presenta en la tabla 5.

Tabla 5 Lista de productos candidatos actualizada

No.	Código de producto	% participación en ventas
1	22	20.98%

No obstante, el producto 22 es un producto que próximamente será discontinuado, debido a que sufrió una actualización en sus características, el cual será reemplazado por un nuevo código de producto. Motivo por el cual, este código es inválido para la selección y aplicación de la metodología. Por lo anterior, se seleccionaron los siguientes códigos con mayor participación en ventas para evaluar la posibilidad de ser incluidos dentro del portafolio de productos con despacho directo. A pesar de que estos códigos no se encuentran dentro de la lista Pareto, se tomaron con el objetivo de probar el método propuesto.

- d. Estimación de la cuota de los productos en la lista actualizada
La estimación de la cuota consistió en aplicar el promedio a la demanda inicial de despacho directo de los productos con características similares a los productos en proceso de evaluación para inclusión.

Finalmente, según los criterios, se fueron seleccionando uno en uno códigos, hasta poder agregar 3. A partir del tercer código, se perdían los ahorros del modelo, aunque se lograba cumplir con al menos el 60% de su cuota. Y aplicando la diferencia de medias a través de la T, se puede afirmar que la diferencia media entre con los resultados sin el nuevo portafolio y con el nuevo portafolio es de -\$87,615.64. Esto indica que, en promedio, los costos logísticos disminuyeron en -\$87,615.64 sobre este valor si se agregan los 3 códigos obtenidos por la metodología. Esta mejora solo representa un 5% de ahorro, lo cual se podría deber a sus bajos volúmenes de venta, ya que no correspondieron a los códigos Pareto.

La desviación estándar de la diferencia de costos logísticos entre los dos meses es de 50,453.24 unidades monetarias. Esta medida de dispersión indica que hay una variabilidad moderada en los cambios de costos logísticos y esto, según la prueba, tiene un p valor es 0.0025 y al ser menor que el umbral de significancia típico de 0.05, sugiere que esta diferencia es estadísticamente significativa.

9. Conclusiones y trabajo futuro

En este proyecto se obtuvo una herramienta para resolver de manera integrada el problema de producción y de distribución de producto en un caso aplicado de una multinacional de consumo masivo. El problema de secuenciación de producción se encuentra en un entorno de máquinas paralelas y el problema de distribución es conocido en la literatura como VRP con entregas divididas (Split VRP), ambos problemas NP duros. El método de solución propuesto está compuesto por dos etapas, siendo la primera una mate-heurística que aplica la metaheurística GRASP con un modelo matemático relajado, y la segunda un modelo matemático entero mixto.

En la primera etapa se resuelve el problema de producción, pero evaluando una función objetivo que sirve como aproximación al problema de distribución. Es decir, se evalúan soluciones teniendo en cuenta costos de producción y de transporte. Lo cual resulta en producciones objetivo que toma la segunda etapa del método de solución, el cual es un MIP que resuelve el Split VRP.

Este método resuelve el problema en una planta con 6 máquinas y 26 productos y se utiliza el software CPLEX a través de Python para correr los modelos matemáticos. En esta investigación se encontró una forma de modelar el problema con un tiempo de procesamiento corto (de aproximadamente 1 minuto) para lo que se considera una instancia mediana. No obstante, se recomienda que para futuros trabajos se analice una heurística que permita utilizarse como método de evaluación de las soluciones del GRASP en instancias grandes.

En la investigación se aplica un método determinístico que aborda el problema integrado, lo cual no es usual en la literatura. Sin embargo, se recomienda que en futuras investigaciones se pueda agregar las paradas de las maquinas, la variabilidad a los tiempos de producción y alistamiento, y variabilidad en los tiempos de entrega de los vehículos.

La solución propuesta no requiere una asignación manual de despachos directos como actualmente se hace y la solución permite a la empresa continuar con las decisiones de semanas pasadas. Incluso, es posible solucionar solo el problema de distribución con las producciones que la empresa proporcione. Por otro lado, a través de la metodología propuesta en el tercer objetivo, se puede medir la rentabilidad y viabilidad de ampliar el portafolio de despacho directo. Llegando a la conclusión que se puede ampliar a 3 códigos más de los que se cuenta actualmente.

Finalmente, el método aplicado en esta investigación combina metodologías reconocidas por sus buenos resultados en la literatura y las integra en una sola herramienta, llegando a obtener ahorros del 32% de los costos logísticos actuales. Obteniendo así una herramienta integral y útil para ser aplicada en contextos empresariales o académicos.

10. Bibliografía

- Archetti, C., Bianchessi, N., & Speranza, M. G. (2011). A column generation approach for the split delivery vehicle routing problem. *Networks*, 58(4), 241–254. <https://doi.org/10.1002/net.20467>
- Archetti and M.G. Speranza, *The split delivery vehicle routing problem: A survey*, Springer-Verlag, New York, 2008, pp. 103–122
- Archetti, C., & Speranza, M. G. (2012). Vehicle routing problems with split deliveries. *International Transactions in Operational Research*, 19(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2011.00811.x>
- Archetti, C., Speranza, M. G., & Hertz, A. (2006). A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem. *Transportation Science*, 40(1), 64–73. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0103>
- Artigues, C., Belmokhtar, S., Feillet, D., & Saint, M. De. (2004). A New Exact Solution Algorithm for the Job Shop Problem with Sequence-Dependent Setup Times. *Régin J-C and Rueher M (Eds) Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems.*, 37–49.
- Anglani A., Grieco A., Gerriero E., Musmanno R. Robust Scheduling of Parallel Machines with Sequence-Dependent Set-up Costs. *European Journal of Operational Research*, volumen 161 (número 3), 2005: 704-720.
- Beatty, S. E., Mayer, M., Coleman, J. E., & Lee, J. (1996). *Customer-Sales Associate Retail Relationships*. 72(3), 223–247.
- Boudia, M., Louly, M. A. O., & Prins, C. (2007). A reactive GRASP and path relinking for a combined production-distribution problem. *Computers and Operations Research*, 34(11), 3402–3419. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.02.005>
- Casas-Ramírez, M. S., Camacho-Vallejo, J. F., González-Ramírez, R. G., Marmolejo-Saucedo, J. A., & Velarde-Cantú, J. M. (2018). Optimizing a Biobjective Production-Distribution Planning Problem Using a GRASP. *Complexity*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3418580>
- Chaouch, I., Driss, O. B., & Ghedira, K. (2017a). A Modified Modified Ant Colony Optimization algorithm for the Distributed Job Shop Scheduling Problem. *Procedia Computer Science*, 112, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.267>
- Chaouch, I., Driss, O. B., & Ghedira, K. (2017b). A Survey of Optimization Techniques for Distributed Job Shop Scheduling Problems in Multi-factories. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 574, 369–378. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57264-2>
- Chaouch, I., Driss, O. B., & Ghedira, K. (2017c). *Weaknesses of Ant System for the Distributed Job Shop Scheduling Problem*. 1(9th International Conference on Enterprise Information Systems), 574–581. <https://doi.org/10.5220/0006332405740581>
- Chaouch, I., Driss, O. B., & Khaled, G. (2020). A review of job shop scheduling problems in multi-factories. *Int. J. Operational Research*, 38(2), 147–165.

- Chen, Z. (2004). *Integrated Production and Distribution Operations: Taxonomy, Models, and Review* (Kluwer Academic Publishers (ed.)). D. Simchi-Levi, S.D. Wu, and Z.-J. Shen.
- Chen, Z. (2010). *Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling : Review and Extensions*. 58(1), 130–148. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0688>
- Chen, Z., & Vairaktarakis, G. L. (2005). *Integrated Scheduling of Production and Distribution Operations*. 51(4), 614–628. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0325>
- Dempster, M. A. (2012). *Deterministic and Stochastic Scheduling: Proceedings of the NATO Advanced Study and Research Institute on Theoretical Approaches to Scheduling Problems held in Durham, England, July 6–17, 1981*.
- Devapriya, P., Ferrell, W., & Geismar, N. (2017). *Integrated production and distribution scheduling with a perishable product*. 259, 906–916. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.019>
- Dror, M., Trudeau, P., 1989. Savings by split delivery routing. *Transportation Science* 23, 141–145.
- Feo, T. A., & Resende, M. G. C. (1995). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 6(2), 109–133. <https://doi.org/10.1007/BF01096763>
- Festa, P., & Resende, M. G. C. (2009). An annotated bibliography of GRASP – Part I: Algorithms. *International Transactions in Operational Research*, 16(1), 1–24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2009.00663.x>
- Gao, S., Qi, L., & Lei, L. (2014). Integrated Batch Production and Distribution Scheduling with Limited Vehicle Capacity. *Intern. Journal of Production Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.08.017>
- Geismar, H. N., Laporte, G., Lei, L., Sriskandarajah, C., & Laporte, G. (2008). *The Integrated Production and Transportation Scheduling Problem for a Product with a Short Lifespan The Integrated Production and Transportation Scheduling Problem for a Product with a Short Lifespan*. 21–33. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1060.0208>
- Graham, R. L., LAWLER, E. L., LENSTRA, J. K., & KAN, A. H. G. R. (1979). OPTIMIZATION AND APPROXIMATION IN DETERMINISTIC SEQUENCING AND SCHEDULING : *Annals of Discrete Mathematics* 5, 5, 287–326.
- Hurter, A. P., & Van Buer, M. G. (1996). The newspaper production/distribution problem. *Journal of Business Logistics*, 85–107.
- Jahed, A., & Moghaddam, R. T. (2021). *Mathematical Modeling for a Flexible Manufacturing Scheduling Problem in an Intelligent Transportation System*. 14(1), 189–208. <https://doi.org/10.22059/ijms.2020.261618.673203>
- Jia, H., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., & Zhang, Y. F. (2007). *Integration of genetic algorithm and Gantt chart for job shop scheduling in distributed manufacturing systems*. 53, 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.024>
- Jia, H., J.Y., F., Nee, A. Y., & Zhang, Y. (2002). Web-based multi-functional scheduling system for a distributed manufacturing environment. *CONCURRENT ENGINEERING: Research and Applications*, 10(1), 27–39. <https://doi.org/10.1106/106329302024054>
- Jia, H., Nee, A. Y., Fuh, J. Y., & Zhang, y. (2003). A modified genetic algorithm for distributed scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, 351–362.

- Kim, S. C., & Bobrowski, P. M. (1994). Impact of sequence-dependent setup time on job shop scheduling performance. *International Journal of Production Research*, 1503–1520. <https://doi.org/10.1080/00207549408957019>
- Kim, S. C., & Bobrowski, P. M. (1997). *Scheduling Jobs with Uncertain Setup Times and Sequence Dependency*. 25, 437–447.
- Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., & Shmoys, D. B. (1993). *Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity*.
- Li, C., Vairaktarakis, G., & Lee, C. (2005). *Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations q*. 164, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.022>
- Lin, S., Kernighan, B.W., 1973. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations Research* 21, 498–516. An early random multistart local search technique.
- Liu, T., Chen, Y., & Chou, J. (2014). Solving Distributed and Flexible Job-Shop Scheduling Problems for a Real-World Fastener Manufacturer. *IEEE*, 2, 1598–1606.
- Low, C., Chang, C., Li, R., & Huang, C. (2014). Coordination of production scheduling and delivery problems with heterogeneous fleet. *Intern. Journal of Production Economics*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.014>
- Low, C., Hsu, C.-M., & Huang, K.-I. (2004). *Benefits of lot splitting in job-shop scheduling*. 773–780. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1785-9>
- Low, C., Li, R., & Chang, C. (2013). Integrated scheduling of production and delivery with time windows. *International Journal of Production Research*, 37–41.
- Lu, P.-H., Wu, M.-C., Tan, H., Peng, Y.-H., & Chen, C.-F. (2015). A genetic algorithm embedded with a concise chromosome representation for distributed and flexible job-shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1083-z>
- Mani, V., Kesavan, S., & Swaminathan, J. M. (2015). Estimating the impact of understaffing on sales and profitability in retail stores. *Production and Operations Management*, 24(2), 201–218. <https://doi.org/10.1111/poms.12237>
- McFarlane, D. (2013). The strategic importance of customer value. *Atlantic Marketing Journal*, 2(1), 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2010.12.017>
- Meinecke, C., & Scholz-reiter, B. (2014). A Heuristic for the Integrated Production and Distribution Scheduling Problem. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering, March*, Vol:8 No:2.
- Mendes A., Müller F., Franca P., Moscato P. Comparing MetaHeuristic Approaches for Parallel Machine Scheduling Problems with Sequence Dependent Setup Times. *Production Planning and Control*, volumen 13 (número 2), 2002: 143-154.
- Moghaddas, R., & Houshmand, M. (2008). Job-Shop Scheduling Problem With Sequence Dependent Setup Times. *IMECS 2008, II*, 19–21.
- Moons, S., Ramaekers, K., Caris, A., & Arda, Y. (2017). Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level : A review and discussion. *Computers & Industrial Engineering*, 104, 224–245. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.010>

- Naderi, B., & Azab, A. (2014). Expert Systems with Applications Modeling and heuristics for scheduling of distributed job shops. *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 41(17), 7754–7763. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.06.023>
- Naderi, B., & Ruiz, R. (2010). The distributed permutation flowshop scheduling problem. *Computers and Operation Research*, 37(4), 754–768. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.019>
- Naderi, Bahman, & Azab, A. (2015). An improved model and novel simulated annealing for distributed job shop problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7080-8>
- Naso, D., Surico, M., Turchiano, B., & Kaymak, U. (2007). *Genetic algorithms for supply-chain scheduling : A case study in the distribution of ready-mixed concrete*. 177, 2069–2099. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.019>
- Perdikaki, O., Kesavan, S., & Swaminathan, J. M. (2011). Effect of Traffic on Sales and Conversion Rates of Retail Stores. *Manufacturing & Service Operations Management*, 14(1), 145–162. <https://doi.org/10.1287/msom.1110.0356>
- Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling: Theory, algorithms and systems*.
- Reimann, M., Neto, R. T., & Bogendorfer, E. (2014). Joint optimization of production planning and vehicle routing problems: A review of existing strategies. *Pesquisa Operacional*, 34, 189–214. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2014.034.02.0189>
- Sarmiento, A. M., & Nagi, R. (1999). A review of integrated analysis of production– Distribution systems. *IIE Transactions*, 31, 1061–1074.
- Scholz-Reiter, B., & Thomas Makuschewitz. (2011). An approach for the sustainable integration of production and transportation scheduling. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 10(2), 158–179.
- Shaikh, N., Abril, D., Sánchez, D., & Rodríguez, E. (2011). Kimberly-Clark Latin America Builds an Optimization-Based System for Machine Scheduling. *Informs*, 41(5), 455–465.
- Shahmizad, M., Khancheh-zarrin, S., Mahdavi, I., & Mahdavi-Amiri, N. (2016). A Partial Delivery Bi-Objective Vehicle Routing Model with Time Windows and Customer Satisfaction Function. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, August. <https://doi.org/10.5901/mjss.2016.v7n4s2p102>
- Sharma, P., & Jain, A. (2015). *A review on job shop scheduling with setup times. D*. <https://doi.org/10.1177/0954405414560617>
- Viergutz, C., & Knust, S. (2014). Integrated production and distribution scheduling with lifespan constraints. *Annals of Operations Research Volume*, 293–318. <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1197-z>
- Weinstein, A. (2012). *Superior customer value: Strategies for winning and retaining customers* (3RD ed.). CRC Press- Taylor & Francis Group.
- Wu, M., Lin, C., Lin, C., & Chen, C. (2017). Effects of different chromosome representations in developing genetic algorithms to solve DFJS scheduling problems. *Computers and Operations Research*, 80, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.11.021>

Yousif, A., Nor, S. M., & Abdulla, A. H. (2015). *Job Scheduling Algorithms on Grid Computing : State-of- the Art*. 8(6), 125–140.

Ziaee, M. (2013). A heuristic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem. *The Journal of Supercomputing*, 67, 69–83. <https://doi.org/10.1007/s11227-013-0986-8>

11. Anexos

No	Modelo	Nombre Archivo
1	GRASP	<i>Modelo Grasp Final</i>
2	Modelo 3 sin relajación	<i>MIP 3 Binario</i>
3	Modelo 3.1 Relajado	<i>MIP 3.1 Relajado</i>
4	Programa Diferencia de medias	<i>Diferencia de medias</i>
5	Metodología inclusión nuevos productos (Objetivo 3)	<i>MIP Método Objetivo 3</i>