PLANEACIÓN COORDINADA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN A TRAVÉS DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

YEIDY CARDOZO MORANTES

KAREN SILVANA CARRILLO CARREÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES

BUCARAMANGA

2015

PLANEACIÓN COORDINADA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN A TRAVÉS DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

YEIDY CARDOZO MORANTES

KAREN SILVANA CARRILLO CARREÑO

Trabajo de grado presentado para optar al título de

Ingeniero Industrial

Director:

JAVIER ARIAS OSORIO
Ingeniero de Sistemas, MBA.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES

BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA.

Este proyecto está dedicado,

A Dios

Principalmente por las todas las bendiciones recibidas a lo largo de mi vida, por ser esa fuerza que me impulsaba a seguir adelante, y por ser la motivación para llevar a cabo este proyecto.

A mis padres

Por su apoyo incondicional durante todos mis proyectos, aun a pesar de las dificultades siempre me impulsaron a continuar con cada meta que emprendía. Los amo mucho.

A mis familiares

A mi hermano Guillermo y mis primos Wilson y Darly por todo apoyo y motivación a lo largo de mi carrera, y a todos mis tíos y primos que me acompañaron durante el cumplimiento de este sueño.

A mi director de proyecto

A Javier Arias por transmitirnos todos sus conocimientos, por la paciencia y comprensión, adicionalmente por brindarnos la oportunidad de trabajar junto a él.

A Karen Silvana y María Fernanda

A Silvana por no solo ser mi compañera sino cómplice de todas mis aventuras, por darme su apoyo incondicional para sacar adelante este proyecto, que junto con Mafe me brindaron un linda amistad, cariño, apoyo y paciencia. Las quiero mucho.

A mis amigos

Paola, Andrés Felipe Cruz, Andrés Blanco, Greidy, July, Cindy Nathalia, Camila y demás que juntos a ellos viví experiencias inolvidables que me ayudaron a crecer personal y profesionalmente.

YEIDY CARDOZO MORANTES.

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto por darnos salud para lograr mis objetivos, inteligencia, sabiduría, paciencia, entendimiento y la capacidad para llevar a cabo este proyecto.

A mi madre Belcy

Por su total apoyo en todo momento, por sus consejos, por la motivación constante por la confianza y por los grandes valores que me ha inculcado y por ser el pilar de mi vida. ¡Te quiero mucho!

A mis familiares

A mis tíos Nubia Almeyda y Alberto Carreño, que me demuestran cada día su apoyo incondicional y lo importante que soy para ustedes, a mis primos y familia que han sido mi motor para alcanzar cada uno de mis sueños y metas.

A mi profesor

A Javier Arias Osorio, por todo el conocimiento trasmitido, su tiempo, por la paciencia con la que nos orientó a lo largo de este trabajo y por habernos permitido trabajar y aprender muchas cosas junto a él.

A Yeidy y María Fernanda

A Yeidy que más que mi compañera de proyecto es mi amiga, y un gran apoyo en todo momento y sobre todo por emprender esta aventura de crecer, junto a María Fernanda que nos apoyamos en nuestra formación profesional, quienes han sido incondicionales, cómplices de mil aventuras y que hicieron que mi carrera universitaria estuviera cargada de lindos momentos de amistad y gratos recuerdos.

A mis amigos

Gracias a Dios son muchos y los mejores: Danny, Nathalia M, Marco, Leonardo Jheysson, Gerardo, Andrés, Natalia C, Diego M, Daniela, Jessica, Mayra, Román y demás personas que tuve la oportunidad de conocer, gracias a ustedes por estar ahí en los buenos y malos momentos, por compartir sonrisas, por sus consejos y por su grandiosa amistad a lo largo de todo este tiempo, su complicidad es el mejor recuerdo que me llevo de mi vida universitaria.

…"*se requiere de muchos estudios para ser profesional, pero se requiere de toda una vida para aprender a ser persona"*

KAREN SILVANA CARRILLO CARREÑO

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ANEXOS

RESUMEN

TITULO: PLANEACIÓN COORDINADA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN A TRAVÉS DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN. *

AUTORES: Yeidy Cardozo Morantes, Karen Silvana Carrillo Carreño. **

PALABRAS CLAVES: Producción y distribución, ruteo de vehículos, PSD, CLSP y PVRP.

DESCRIPCIÓN

Debido a la importancia que en la actualidad posee la programación y distribución y los modelos de optimización aplicados en este, se considera relevante el progresivo estudio investigativo estableciendo como principal propósito desarrollar un marco de investigación para resolver la planeación coordinada de producción y distribución por separado e integrado, abordando diferentes métodos de optimización. En el documento como primera medida se realizó una conceptualización de los términos relacionados con el desarrollo del trabajo presentado como, tipos de problemas de optimización, programación de la producción, ruteo de vehículos, planeación de la producción y distribución integrada (PSD), técnicas de optimización entre otras. A continuación se menciona la metodología y la orientación realizada para la elaboración de esta investigación.

Para iniciar se realizó una revisión a la literatura observando cómo se ha llevado a cabo este problema, mencionando algunos trabajos, los cuales ayudaron a plantear los modelos del problema por separado e integrado. Se describe el problema dando a conocer un horizonte de planeación la cantidad a producir en la planta de cada uno de los tipos de productos demandados por los centros de distribución, son satisfechos en el periodo y entregados a partir del diseño de rutas. Se realizan experimentos computaciones analizando la integración de las actividades en un solo modelo y el comportamiento de los modelos de producción y distribución por separado, con la finalidad de estudiar las implicaciones de cada uno en cuanto a convergencia y eficiencia de las soluciones encontradas. Para esto se analizaron varias instancias sobre los diferentes escenarios, donde se generan soluciones optimas por métodos exactos (Software GAMS/ CPLEX) y otras técnicas de optimización heurísticas y Metaheurísticas (Software MATLAB). Finamente se presentan los análisis de los resultados y conclusiones obtenidas en la investigación con el fin de dejar el trabajo abierto para futuras investigaciones.

[*] Trabajo de Grado

[**] Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y empresariales. Director: Javier Arias Osorio, Ingeniero de sistemas.

ABTRACT

TITLE: COORDINATED PLANNING OF THE PRODUCTION AND DISTRIBUTION THROUGH OPTIMIZATION PROBLEMS *

AUTHORS: Yeidy Cardozo Morantes, Karen Silvana Carrillo Carreño. **

KEYWORDS: Production, distribution, vehicle routing, PSD, CLSP y PVRP.

DESCRIPTION

Because of the importance that currently possess the programming and distribution and the optimization models applied in this, it is considered relevant the progressive research study with the main purpose to develop a research framework to resolve the coordinated planning of production and distribution separately and integrated, taking into account different optimization methods. In the document as a first step it is done a conceptualization of terms related with the development of work presented, like, types of optimization problems, programming of the production, vehicle routing, production planning and distribution integrate (PSD), optimization techniques, among others. Then it is mentioned the methodology and the guidance made for the development of this research.

To start it is realized a review to the literature observing how it carried out this problem, mentioning some works, which helped to propound the models of the problem separately and integrated. It is described the problem revealing a planning horizon, the quantity to be produced at the plant in each of the types of products demanded by the distribution centers, are satisfied in the period and delivered as from the design of routes. It is realized computational experiments to analyze the integration of the activities in a unique model and the behavior of production and distribution models by separate, in order to study the implications of each in terms of convergence and efficiency of the found solutions. For this, it is analyzed several instances about the different scenarios, where it is generated optimal solutions by exact methods (Software GAMS/CPLEX) and other optimization techniques heuristics and metaheuristics (Software MATLAB). Finally, it is presented the analysis of the results and conclusions obtained in the research in order to leave the way open for future investigations.

---

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisico-mecanicas. Escuela de Estudios Industriales y empresariales. Director: Javier Arias Osorio, Systems engineer.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la programación de la producción y la distribución juega un papel fundamental en las industrias, ya que gracias a esto se logra suplir la demanda existente. El estudio de esta problemática desde el punto de vista de la optimización matemática busca minimizar los costos, tiempos, distancias y mejorar el servicio al cliente; además le permite a la empresa generar una ventaja competitiva frente a su competencia y con ello lograr un valor agregado en su producto y/o servicio.

El problema de la programación coordinada de la producción y la distribución es un problema considerado NP-Hard[5], debido a que involucra en su interior a un problema de optimización combinatoria de ese tipo como es el problema de ruteo de vehículos. Lo anterior conlleva a que al crecer la cantidad de clientes a distribuir el problema aumente de tal manera que se encuentran dificultades a la hora de darle solución por medio de métodos exactos, pasando al uso de procedimientos de tipo heurísticos y metaheurísticos, sacrificando la obtención de una solución óptima por una solución factible.

Ya desde el siglo pasado se ha venido estudiando este problema de optimización, en particular en este trabajo se hace énfasis en un trabajo de Chandra (1994) donde analiza los ambientes integrados e independientes del problema. Y a partir de este, se han realizado diferentes estudios sobre la programación de la

[5] FEI, Ma. MENG-NA, Wu. BAO-FENG, Sun. y HUA, Yang. The Coordination of Production and Distribution Scheduling in Mass Customization. En: International Conference on Management Science & Engineering, 2009. p. 428.

producción y la distribución en donde han variado los distintos entornos industriales, teniendo en cuenta la capacidad, producción y ruteo.

En este trabajo se analizará la programación de la producción y distribución de manera integral, así como dos actividades separadas, revisando las diferencias que se encuentra en la literatura, pasando a la construcción y modelamiento como problemas de optimización, con el fin de estudiar y revisar aspectos de convergencia y eficiencia, entre otros, utilizando algoritmos de solución y distintos software.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tanto la secuenciación de la producción como la distribución de los pedidos, se ha estudiado a lo largo de los años por ser dos actividades fundamentales en el sector de la industria manufacturera, pero en la mayoría de las organizaciones estas dos operaciones son tratadas de manera individual considerando a cada una en dependencias o áreas funcionales diferentes con costos e indicadores particulares cada una.

Es por ello que se estudiarán dichas operaciones de manera integrada y por separado, con la finalidad de estudiar las implicaciones de cada una en cuanto a convergencia y eficiencia de las soluciones encontradas. Para esto se analizarán varias instancias utilizando diferentes métodos de solución, programados estos en herramientas computacionales como GAMS y Matlab.

El análisis de la planeación coordinada de la producción y distribución es importante tarea dentro de la administración de operaciones de cualquier empresa manufacturera, pues permite disminuir los costos totales, los tiempos de entrega de pedidos, las demandas insatisfechas, así como el inventario de producto terminado, entre otros[6]. Sin embargo el considerar el problema integrado plantea desafíos en cuanto al tamaño del modelo y su convergencia.

Cabe resaltar que el tratamiento individual de la secuencia de la producción se aborda como un CLSP (Capacited lot sizing problem, por su sigla en inglés) donde se considera la cantidad a producir y la cantidad a mantener en inventario a través de diferentes periodos de tiempo. Así mismo, el tratamiento de la distribución de los productos terminados hacia el cliente se estudia como un

[6] CHANDRA, Pankaj. y FISHER, Marshall. Coordination of production and distribution planning. European Journal of Operational Research, 1994, vol. 72, no 3, p. 503-517.

problema PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem, por sus siglas en inglés) considerando el ruteo en cada periodo de tiempo establecido.

2. JUSTIFICACIÓN

En el trascurso de los años, las empresas manufacturas han utilizado la programación de la producción y la distribución para desarrollar sus procesos y mejorar su eficiencia, es por esto que ha sido un problema bastante abordado en la literatura de forma individual. La investigación de operaciones, como rama de la matemática inmersa en la administración táctica de operaciones, es una aliada para afrontar situaciones problemáticas susceptibles de mejora, convirtiéndose en una herramienta clave para obtener soluciones, optimizando procesos o procedimientos, mejorando así la toma de decisiones.

La programación de la producción es vital en las compañías que hacen transformación del producto, ya que la adecuada gestión de ésta aumenta los indicadores de gestión no sólo del área sino de la empresa en general. Para dar solución y desarrollo a la programación en la actualidad, dentro de muchas técnicas, se utilizan métodos de optimización matemática, ya sea de manera independiente o integrándola con áreas que manejan partes secuenciales en los procesos de la misma como es la distribución del producto. Para esto último, considerando aspectos técnicos de ruteo que permitan minimizar costos de transporte a la vez que se atienden correctamente la demanda de los clientes.

Por tanto se hace necesario estudiar los problemas anteriormente mencionados de manera integral y por separado, con el fin de comparar los resultados para un serie de parámetros previamente establecidos mediante el uso de heurísticas, metaheurísticas y con la ayuda de software.

La investigación de dichos problemas contribuirá al conocimiento del PSD (por su sigla en inglés, Scheduling production and distribution problem) y a la solución del mismo, por medio de la evaluación de los distintos parámetros y el uso de análisis de sensibilidad, para lograr resultados que beneficien la cadena de suministro en su conjunto, utilizando técnicas diferentes para la programación de la producción y la planificación de la distribución de forma coordinada.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un marco de investigación para resolver la planeación coordinada de producción y distribución a través de problemas de optimización utilizando métodos exactos y heurísticos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión de literatura sobre el problema de planificación de la producción y distribución (PSD).

- Formular el problema de planificación de la producción y distribución de forma separada e integrada, analizando sus implicaciones.

- Aplicar diferentes técnicas tanto exactas, como heurísticas y metaheurísticas utilizadas en el problema de optimización, para abordar su experimentación.

- Evaluar los resultados de la experimentación en cuanto a métricas de eficiencia.

- Elaborar un artículo publicable sobre el trabajo realizado.

4. MARCO TEORICO

Las operaciones de producción y distribución son dos funciones operativas claves para lograr un óptimo desempeño en las compañías. La integración detallada a nivel de programación de estas dos operaciones, no sólo es posible sino necesaria en situaciones prácticas. La feroz competencia en el mercado global actual y las mayores expectativas de los clientes, han obligado a las empresas a invertir agresivamente para reducir los costos a través de la cadena de suministro. La vinculación estrecha entre las operaciones de producción y distribución, permite a las empresas optimizar los intercambios entre diversos costos y la puntualidad en la entrega como lo dice Si-Long Chen en su artículo "*Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling: Review and Extensions*".

Se debe tener en cuenta problemas combinatorios durante el desarrollo de la solución del problema planteando con anterioridad, ya que son los dedicados a la búsqueda de la mejor configuración.

4.1. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Un problema de optimización consiste en minimizar o maximizar el valor de una variable. Es decir, se trata de calcular o determinar el valor mínimo o el valor máximo de una función de una variable. La variable que se desea minimizar o maximizar debe estar expresada como función de otras variables relacionadas en el problema[7].

[7] HERRERA, Ernesto Javier Espinosa. Cálculo diferencial e integral I. Reverte, 2008, p., 29.

4.1.1. Optimización combinatoria. La optimización combinatoria se caracteriza porque las variables de decisión son de tipo discreto y sus diferentes soluciones se forman a raíz de la ordenación de números enteros[8].

Este problema consiste en encontrar un objeto entre un conjunto finito (o al menos contable) de posibilidades. Este objeto suele ser un número natural o una permutación o una estructura de grafo. Los problemas combinatorios presentan como particularidad que siempre existe un algoritmo exacto que permite obtener la solución óptima[9].

En los problemas de optimización combinatoria se utilizan algoritmos que resuelven instancias de problemas que se creen difíciles, examinando en el espacio de soluciones para estas instancias. Estos buscan disminuir el tamaño del espacio e indagar el espacio de búsqueda.

Un problema de optimización combinatoria es uniobjetivo cuando sobre el espacio de configuraciones se construye una sola función de valor; y multiobjetivo cuando es necesario más de una[10].

Los problemas combinatorios se clasifican en:

- Problemas NP

Un problema de decisión se clasifica como NP si, y sólo si, puede resolverse mediante un algoritmo no determinístico que se ejecuta en tiempo polinomial. El nombre NP proviene de "nondeterministic polynomial - bounded" (Polinomialmente acotado no determinístico).

- Problemas NP-Hard

[8] INGENIARE. Revista chilena de ingeniería. Chile, 2010, vol., 18.
[9] MUÑOZ, Abraham. Metaheurísticas. Librería-Editorial Dykinson. Madrid, 2007, p., 2.
[10] NEMHAUSER, George. y WOLSEY, Laurence. Integer and combinarial optimization. Edición 1, p., 115.

Cuando se prueba que un problema de optimización combinatoria en su versión problema de decisión, pertenece a la clase NP completa, entonces la versión optimización es NP- hard. La complejidad computacional hace parte de uno de los siete problemas del milenio, que es determinar si todos los problemas no tratables (Los conocidos NP) eventualmente llegarán a ser tratables (Problemas tipo P). Es decir, si la imposibilidad es tecnológica o lógica (P vs NP es un problema abierto), la pregunta a responder es: ¿Los problemas NP (intratables) se pueden reducir a problemas P (tratables)?.
Los problemas NP-hard no presentan algoritmos polinómicos que corroboren posibles soluciones[11].

- Instancia

Las instancias son aquellas características o datos del problema, que se usan en un planteamiento concreto.

Una instancia en el problema del CVRP, es una representación concreta y específica de su clase, comprende todos los elementos incorporados en el problema y generalmente están ligadas a los vehículos y a los clientes.

4.2. PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

La planeación de la producción tiene como fin establecer a priori lo que la empresa deberá producir en un determinado periodo, teniendo en cuenta, por un lado, su capacidad de producción y, por otro, la previsión de ventas que debe satisfacerse. La planeación de la producción tiene como fin compatibilizar la eficacia (alcance de los objetivos de venta) y la eficiencia (utilización rentable de los recursos disponibles). La planeación de la producción procura coordinar e integrar

[11]CONTRERAS, Claudia. y DÍAZ, María. Métodos heurísticos para la solución de problemas ruteo de vehículos con capacidad (CVRP). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010, p., 211.

máquinas, personas, materias primas, materiales en procesamiento y procesos productivos en un todo armónico y sistémico[12].

Esta parte tiene como función decidir sobre todo lo que tiene que ver con los medios que la empresa necesitará para las operaciones que realicen en el futuro y tener en cuenta una buena distribución que realce la producción creando el producto necesario y disminuyendo su costo total[13].

Se pueden distinguir dos importantes aplicaciones: la primera se basa en seguir a las políticas de la empresa, los costos que se han calculado, todo lo relacionado con finanzas, servicio a los clientes y estabilidad en la mano de obra[14].

La segunda cumple la tarea de dar a la dirección de la empresa una guía para la fijación de estas políticas básicas mencionadas. Se pueden tomar decisiones alternativas y mirar cómo funciona en dicha empresa[15].

4.2.1. Planeación a largo plazo. Se generan ideas de innovación, teniendo en cuenta los avances tecnológicos para predecir las necesidades futuras en nuevos mercados y nuevos productos[16].

---

[12]CHIAVENATO, Idalberto. Administración de la producción. Edición 1. Mac Graw Hill. 1994.
[13]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Dirección nacional de innovación académica. Fundamentos de administración. Sede Bogotá.
[14] Ibíd.
[15] Ibíd.
[16] Ibíd.

4.2.2. Planeación a mediano y corto plazo. Se diseñan los sistemas que se utilizarán posteriormente para el control de calidad, el manejo de inventarios, las compras, el mantenimiento y la mano de obra[17].

Para tomar decisiones es necesario tener en cuenta aspectos importantes como: el presupuesto de capital, el análisis marginal, los costos estándar, el análisis de varianza (favorable y desfavorable), el presupuesto de producción, los costos de producción.

La producción está completamente relacionada con el mercadeo de la empresa ya que éste evalúa el mercado en el cual va a competir el producto y analiza qué productos desea y necesita el cliente, si se cuenta con el personal necesario para cumplir con el objetivo propuesto en la producción[18].

El producto y el volumen de producción influyen demasiado en la ubicación de una organización, se define en las instalaciones y los requerimientos necesarios para llevar a cabo esto; también se necesita de un buen uso de la maquinaria y todos sus elementos y la buena implementación de la mano de obra[19].

Se debe analizar detalladamente las materias primas para determinar su calidad y lo eficaz que puede llegar a ser la producción[20].

4.2.3. Planeación del producto. La planeación del producto está en la unión entre el mercadeo y la producción. Como resultado de una investigación de mercados se determina una serie de especificaciones generales del producto, las cuales reflejan las necesidades y preferencias de los usuarios, y abarcan

[17] Ibíd.
[18] Ibíd.
[19] Ibíd.
[20] Ibíd.

características como el rendimiento, la apariencia, la calidad y el precio. Las especificaciones técnicas requeridas durante el proceso de fabricación evolucionan a partir de las investigaciones acerca del desarrollo y diseño del producto. Entre ellas se cuentan factores tales como las dimensiones, propiedades, capacidades, características físicas y químicas, entre otras[21].

También es muy importante resaltar en la programación la secuenciación de producción la cual se denomina problema del Taller Mecánico (Job-Shop Problem). El enunciado básico general del problema es: n piezas (lotes de piezas, pedidos u órdenes de trabajo) deben realizarse en m máquinas (recursos, secciones, puestos de trabajo). La realización de cada pieza implica la ejecución, en cierto orden establecido, de una serie de operaciones prefijadas donde cada operación está asignada a una de las m máquinas y tiene una duración determinada y conocida; debe establecerse un programa, es decir, la secuencia de operaciones en cada máquina y el intervalo temporal de ejecución de las operaciones, con el objetivo de optimizar un índice determinado que mida la eficiencia del programa[22].

Generalmente se identifican 5 reglas de prioridad para ordenar trabajos:

- FCFS (first-come, first-served, primero en entrar, primero en trabajarse) los pedidos se ejecutan en el orden en que llegan al departamento.
- SOT (shortest operating time, tiempo de operación más corto) ejecutar primero el trabajo con el tiempo de terminación más corto, luego el siguiente más corto, etc. Se llama también TSP (shortest processing time, tiempo de procesamiento más breve). A veces la regla se combina con una regla de

[21]Ibíd.
[22] DOLL, Manuel. y D'ARMAS, Mayra. Programación de la secuencia de producción mediante algoritmos genéticos. Universidad, ciencia y tecnología, 2014, vol. 12 n. 49.

retardo para evitar que los trabajos con tiempos más demorados se atrasen demasiado.

- EDD (earliest due date first, primero el plazo más próximo) se ejecuta primero el trabajo que antes se venza.
- LPT (large processing time, tiempo de procesamiento más largo).
- CR (proporción crítica) se calcula como la diferencia entre la fecha de vencimiento y la fecha actual, dividida entre el número de días hábiles que quedan. Se ejecutan primero los pedidos con la menor CR.[23]

4.2.4. Tamaño de lote de producción capacitado (CLSP). CLSP es un modelo que tiene como objetivo la programación de la producción de varios productos en un horizonte de planificación, al tiempo que minimiza los costos de producción lineales, el costo de inventario y los costos sujetos a restricciones de demanda y capacidad. Estos costos pueden variar para cada producto y para cada periodo[24].

Una gran cantidad de trabajos se han dedicado al CLSP, porque es el problema central en los modelos de planificación de la producción agregada (APP) se utiliza para la determinación de la carga y la asignación de recursos en un entorno de producción. Estas son las entradas al programa maestro de la producción y, en consecuencia, plan de requerimiento de materiales (MRP) en un entorno de fabricación "push". CLSP es un problema NP-Hard[25].

Este problema consiste en la determinación de la cantidad y el momento de la elaboración de productos en el horizonte de planificación. Las restricciones de capacidad limitan la cantidad de producción en cada periodo. Existen algunas

[23] UNIATLANTICO, Blog. Universidad del Atlántico, Ingeniería industrial." Secuenciación" Domingo 3 de Octubre del 2010
[24] PARDALOS, Panos. Approximation and Complexity in Numerical Optimization: Continuous and Discrete Problems. Kluwer Academic Publishers, 2000. p., 381.
[25]Ibíd. p., 381.

variantes del CLSP, donde las configuraciones son dependientes de la secuencia, este tipo de problema tiene una estructura compleja[26]. Este uno de los más importantes y difíciles problemas de la planificación de la producción. El tema ha sido ampliamente estudiado en la literatura, se consideran primordial a la hora de la programación, ya que es el que presenta las diferentes restricciones de acuerdo a parámetros a la hora de realizar la planificación, revisando a fondo se puede proponer un modelo de decisión basado en las matemáticas que resuelve de forma óptima la producción de un tamaño lote capacitado y problema de programación, teniendo en cuenta el aspecto dinámico de la demanda de los clientes y la planificación de marketing, la propiedad de deterioro de un elemento de la producción, y la restricción de la capacidad finita en una empresa. Las posibles aplicaciones del modelo pueden ser utilizadas como un optimizador, que integra y coordina funciones distintas dentro de una empresa, por ejemplo, marketing y planificación de la producción, con el objetivo de maximizar el beneficio total sobre un horizonte de planificación finita[27].

4.3. RUTEO DE VEHÍCULOS

El problema de enrutamiento o ruteo de vehículos (VRP, vehicle routing problem) data del año de 1959 y fue introducido por Dantzig y Ramser, quienes describieron una aplicación real de la entrega de gasolina a las estaciones de servicio y propusieron una formulación matemática. Cinco años después, Clarke y Wright propusieron el primer algoritmo que resultó efectivo para resolverlo[28]. Y es así

[26]KARIMI, Behrooz. GHOMI, SMT Fatemi. y WILSON, J.M. The capacitated lot sizing: a review of models and algorithms. Omega, 2003, vol. 3, No.5.
[27]CHEN, J. y CHEN, L. Production planning and control: The management of operations. Volumen 17, Issue. 2006.
[28]DAZA, Julio. MONTOYA, Jairo. y NARDUCCI, Francesco. Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. Revista EIA, 2009, vol, 12, p., 26.

como se dio comienzo a grandes investigaciones y trabajos en el área de ruteo de vehículos.

A grandes rasgos un problema de ruteo de vehículos (VRP) consiste en, dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes máximo una vez. Dentro de esta definición, el problema se ubica en un amplio conjunto de variantes:

- VRP, Problema de Ruteo de Vehículos.
- CVRP, Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad.
- MDVRP, Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos.
- PVRP, Problema de Ruteo de Vehículos Periódico.
- SDVRP, Problema de Ruteo de Vehículos de Entrega Dividida.
- SVRP, Problema de Ruteo de Vehículos Estocástico.
- VRPPD, Problema de Ruteo de Vehículos con Recogidas y Entregas.
- VRPB, Problema de Ruteo de Vehículos con Backhauls.
- VRPTW, Problema de Ruteo de Vehículos con ventanas de tiempo[29].

[29]CONTRERAS, C. y DÍAZ, M. Op. cit., p. 31.

4.3.1. Problema del vendedor viajero (TSP). El TSP constituye la situación general y de partida para formular otros problemas combinatorios más complejos, aunque más prácticos, como el ruteo de vehículos y la programación de tareas dependientes del tiempo de alistamiento. En el TSP se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo.

La mayor parte de los problemas de ruteo de vehículos son generalizaciones del TSP. En ese sentido, puede considerarse el VRP más simple.

Existen dos tipos de TSP el primero es considerando la capacidad de cada automóvil como infinita y el de empaquetamiento en compartimentos (BPP, bin packing problem)[30]

Por ende, el problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad y flota homogénea (CVRP-HF, capacitated vehicle routing problem with homogenous fleet) estudiado se considera un problema de optimización combinatoria y pertenece a la clase de problemas NP-Hard, para los que no existe un algoritmo de tiempo polinomial que pueda resolverlos eficientemente[31].

4.3.2. VRP capacitado (CVRP). El CVRP consiste en encontrar una colección de exactamente K ciclos, cada uno de ellos que corresponde a una ruta de un vehículo, con mínimo costo. Se define el costo total como la suma de los costos de los arcos que pertenecen al ciclo y tal que[32]:

- Cada ciclo sale y llega al depósito.
- Cada cliente es visitado exactamente por un ciclo.

[30] DAZA, J. MONTOYA, J. y NARDUCCI, F. Op. cit., p. 26.
[31] Ibíd., p. 26.
[32] MARCILLA, Yáñez. y ILIANA, Beatriz. Modelo de ruteo para generar rutas turísticas. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 2013.

- La suma de las demandas de los vértices de un ciclo no exceda la capacidad del vehículo Q.
- Flota de k vehículo homogéneo, todos con la misma capacidad Q.

4.3.3. VPR Periódico (PVRP). El problema de ruteo de vehículos periódico, PVRP, consiste en diseñar un conjunto de rutas para cada día de un periodo de planificación. Cada cliente requiere un número conocido de días de visitas durante el periodo planificado. El PVRP fue formalmente definido por Christofides y Beasley como una extensión del problema de ruteo de vehículos (VRP)[33].

Siendo el VRP un problema NP-Hard, entonces el PVRP tendrá al menos la misma dificultad y los métodos exactos de solución se podrán aplicar solamente en los problemas de un tamaño reducido. Los problemas que se presentan en las aplicaciones reales poseen un tamaño tal que hace necesario la utilización de métodos heurísticos o metaheurísticos[34].

Generalmente, el objetivo del PVRP es minimizar la distancia total atravesada en el período de planificación sujeto a restricciones de capacidad. Entre las primeras aplicaciones del PVRP a problemas reales se encuentran los trabajos de Beltrami y Bodin; que presentan dos procedimientos para la recolección municipal de residuos para la ciudad de New York; y el de Russell e Igo también relacionado a la recolección de residuos. En otras aplicaciones se encuentra el trabajo de Golden y Wasil vinculado a la distribución de bebidas. Posteriormente se puede mencionar el trabajo de Baptista en el que se estudia un sistema de recolección de papel para reciclar en la localidad de Almada (Portugal)[35].

---

[33]MÉNDEZ, A. PALUMBO, D. CARNERO, M., y HERNÁNDEZ, J. Algoritmos meméticos aplicados a la resolución de un problema de ruteo de vehículos periódico. Asociación argentina de mecánica computacional, 2009. p., 2676.
[34]Ibíd., p. 2676.
[35]Ibíd., p. 2676.

En los VRP clásicos, típicamente el periodo de planeación es de un solo día, en el caso del VRP periódico el modelo se extiende a un período de planeación de M días.[36]

Las rutas deben diseñarse sobre múltiples días o periodos, esto es, en un horizonte de planeación. Cada cliente requiere n_i visitas durante el horizonte de planeación distribuidas en posibles calendarios factibles para cada cliente. Un calendario es una colección de días en el horizonte de planeación en los cuales los clientes recibirán el servicio. Asignar a un cliente a un calendario implica que el cliente recibirá el servicio en cada día del calendario.

- FORMULACION GENERAL DEL PROBLEMA PVRP

El problema consiste en planificar la atención de un conjunto de clientes que requieren distintas frecuencias de visitas en un período de ***np*** días. Cada cliente ***j*** tiene asociado una frecuencia ***k* (*j*)** que mide la cantidad de veces que el cliente ***j*** debe ser visitado, con $\mathbf{1 \leq k\ (j) \leq np}$[37]**.**

El PVRP básico consiste en seleccionar *k* (*j*) días distintos de visitas para el cliente *j* y resolver los *np* problemas de ruteo de vehículos VRP, que resultan, de modo de minimizar el costo total de recorrido. El problema a resolver puede ser considerado como un problema de optimización combinatoria de multinivel. En un primer nivel, el objetivo es generar un grupo de alternativas factibles o combinaciones de visitas, y como el espacio de las alternativas está formado por las 2^{np} combinaciones posibles de los *np* días que abarca el horizonte de tiempo, es un problema que crece en forma exponencial con *np*[38].

---

[36]MEDINA, Linda. LA ROTTA, Elsa. y CASTRO, Javier. Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución, 2011, vol. 16, No. 2, pág. 35 - 55.
[37] MENDEZ. Op. cit., p. 2676.
[38] Ibíd., p. 2676.

En esta etapa se deberá seleccionar una alternativa de visita dentro de las factibles para cada cliente, generando así una propuesta de planificación a evaluar. Dicha evaluación se lleva cabo en un segundo nivel y consiste en resolver *np* problemas de optimización esto es, resolver un problema de ruteo de vehículos (VRP) para el conjunto de clientes particulares a atender en cada día del período.[39]

Por ejemplo, en un horizonte de una semana con 5 días disponibles, si un cliente requiere dos visitas durante la semana, las combinaciones disponibles pueden ser solamente lunes-viernes o lunes- jueves o martes-viernes, pero no se aceptan otras combinaciones para visitar a este cliente.[40]

PVRP consiste en determinar K ciclos en un horizonte de p días (ounidades de tiempo) con costo mínimo tal que:

i) Cada ciclo visita el depósito.
ii) Cada cliente es visitado por n_i ciclos, donde cada visita se realiza en una combinación de días de visitas disponibles para cada cliente.
iii) La suma de las demandas de los vértices de un ciclo no exceda la capacidad del vehículo Q.

[39] Ibíd., p. 2677.
[40]GARCIA, Irma. El problema de ruteo de vehículos. Universidad autónoma de Coahuila, 2010. p., 23.

4.3.4 PSD: Programación de la producción y distribución El PSD consiste en integrar los problemas de programación de la producción y distribución en un solo modelo manteniendo las instancias y parámetros. Este problema es considerado NP-HARD[41].

La planificación de la producción y la programación deben ser coordinadas con la planificación de distribución para minimizar los costos totales de la cadena de suministro. Desde este punto de vista, es necesario optimizar las decisiones de distribución teniendo en cuenta los programas de producción detallados. Sin embargo, la optimización integrada de programación de la producción y la distribución se complica cada vez más por el hecho de que el número de planes de producción alternativos aumenta drásticamente[42].

La programación de la producción consiste en la decisión sobre la secuencia de producción de puestos de trabajo y el tiempo de inicio de operaciones. La planificación de distribución se refiere a las tareas de almacenamiento de almacén y gestión de inventario. Un enfoque común para la programación y la distribución de la planificación es un esquema de descomposición jerárquica. Los modelos de optimización integrados para la planificación y la programación requieren cada vez más un gran número de variables de decisión y la información detallada para optimizar los planes. Por lo tanto, es difícil optimizar las decisiones de planificación y programación simultáneamente.[43]

---

[41] FEI, M. MENG-NA, W. BAO-FENG, S. y HUA, Y. Op. cit., p. 428

[42] NISHI, Tatsushi. KONISHI, Masami. y AGO, Masatoshi. A distributed decision making system for integrated optimization of production scheduling and distribution for aluminum production line. Computers & chemical engineering, 2007, vol. 31, p. 1205.

[43] Ibíd. p.,1206.

La programación conjunta permite a las empresas optimizar los intercambios entre diversos costos, los ingresos totales, la puntualidad de la entrega, el costo de transporte total y el rendimiento de servicio al cliente medido de varias maneras. [44]

4.4. TECNICAS DE OPTIMIZACIÓN

Para la solución de problemas se deben aplicar algoritmos, estos permiten alcanzan buenos resultados. Con el transcurrir del tiempo se han desarrollado distintos métodos para resolver dichos problemas, estos son los métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos. Estos tipos de métodos que se presentan a continuación, destacando los métodos representativos de cada tipo de problema para su respectiva solución, como lo es la programación producción y distribución tanto independiente como integrada.

4.4.1. Métodos exactos. Los métodos exactos son aquellos que solucionan problemas que pertenecen a la clase P de forma óptima y en tiempo razonable. Los problemas de tipo NP podrían ser resueltos por un algoritmo exacto pero con tiempos de convergencia en tiempo polinómico, es decir que tardaría tanto que sería inaplicable. Cabe mencionar que esto depende del problema que se aborde y su complejidad. Algunos ejemplos de estos métodos son los algoritmos programación lineal, algoritmos de ramificación etc.[45]

Cuando se habla de programación y distribución el método exacto abordado es la programación lineal entera mixta, que es un modelo que contiene restricciones y una función objetivo, idénticas a las que se formulan en programación lineal, la única diferencia es que algunas de las variables de decisión tienen valores enteros

---

[44]CHEN, Zhi-long. y SMITH R. Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling. University of Maryland College Park, 2006.

[45] DUARTE, A. PANTRIAGO, J. y GALLEGO, M. op. cit. p., 1-14.

o binarios. Está técnica es efectiva para encontrar soluciones, pero como se mencionaba anteriormente su tiempo de complejidad regularmente es muy alto e inaceptable para problemas NP Hard[46].

4.4.2. Heurísticas. Debido a que todos los problemas no pueden ser resueltos por métodos exactos, se optó por utilizar métodos heurísticos que como lo define Fernandez en su publicación "Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución" ayudan a llegar a una solución factible al problema[47].

Existen algunos tipos de heurísticas constructivas y de inserción.

- **Heurísticas de construcción y mejoramiento**

Las heurísticas de construcción son aquellas que se utilizan para encontrar una solución del problema, que sea lo más próxima posible al óptimo. Otro tipo de heurísticas es la del mejoramiento, que son aquellas que parten de una solución ya conocida y tratan de mejorarla para que aproxime al óptimo. Las heurísticas de mejoramiento funcionan mejor cuanto más alejada esté del óptimo la solución del cual se parte (lógicamente, cuanto peor es una cosa, más fácil es mejorarla).[48]

- **Heurísticas de inserción**

---

[46]VELÁSQUEZ, Paula. RODRÍGUEZ, Alma. y JAÉN, Juan. Aproximación metodológica a la planificación y a la programación de las salas de cirugía: una revisión de la literatura. Revista gerencia y políticas de la salud, 2013.
[47]FERNANDEZ, Adenso. y VELARDE, J. Optimización heurística y redes neuronales. Madrid. Paraninfo SA, 1996.
[48]RAMOS, Silvia. Modelos y Optimización Heurísticas y Problemas Combinatorios. Octubre de 1995.

Las heurísticas de inserción son métodos constructivos en los cuales se crea una solución mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas. En cada iteración se tiene una solución parcial cuyas rutas solo visitan un subconjunto de los clientes, se selecciona un cliente no visitado para insertar en dicha solución[49].

En las heurísticas de inserción secuencial sólo se considera insertar clientes en la última ruta creada. La principal desventaja de este enfoque es que los últimos clientes no visitados tienden a estar dispersos y por lo tanto las últimas rutas construidas son de costo muy elevado. La heurística más usada de este tipo es la de Inserción más óptima.[50]

A continuación se introducen algunos de los métodos heurísticos más usados para la solución del problema de ruteo, que están contenidos dentro de los dos grupos de heurísticas expuestos anteriormente.

- **Algoritmo de Ahorros**

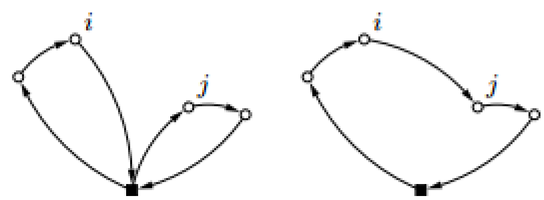
Uno de los algoritmos más usados para la solución del problema de ruteo es el Algoritmo de Ahorros de Clarke y Wright[51], el cual parte de una solución con dos rutas diferentes (0, . . . , i, 0) y (0, j, . . . , 0), dichas rutas son combinadas para formar una nueva ruta (0, . . . , i, j, . . . , 0) como se muestra en la Figura 1, el ahorro se da en distancia por dicha unión. En seguida se presenta la fórmula matemática que resume lo dicho anteriormente:

$$S_{ij=}\, C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$$

[49] OLIVERA, Alfredo. Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. 2004. p., 13
[50] Ibíd. p., 14
[51] Clarke, G.U. WRIGHT, John. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research 1964, vol. 12, n. 4, p., 568–581.

En la nueva solución los arcos (i, 0) y (0, j) no serán utilizados, por lo que se agregará el arco (i, j). En este algoritmo parte de una solución inicial y realizan las uniones que den mayores ahorros siempre que no violen las restricciones del problema. Dicha heurística se puede usar de dos formas, una versión paralela en la que se trabaja sobre todas las rutas simultáneamente, y otra secuencial que construye las rutas de a una por vez. En seguida en la figura 1, se presenta como funciona el algoritmo de ahorros.

Figura 1: Dos rutas antes y después de ser unidad



Fuente: Fernando Sandoya Sanchez, Escuela Superior Politecnica de litoral. “Metodos Exactos y Heuristiscos para resolver el problema de agente viajero y el problema de ruteo de vehiculos” Guayaquil Ecuador Oct.2007

Algoritmo de Ahorros (Versión paralela)

Paso 1 (inicialización). Para cada cliente *i* construir la ruta *(0, i, 0).*

Paso 2 (cálculo de ahorros). Calcular Sij para cada par de clientes i y j.

Paso 3 (mejor unión). Sea $\boldsymbol{S_{i*j} = Max\, S_{ij}}$**,** donde el máximo se toma entre los ahorros que no han sido considerados aun. Sean *ri* y *rj* las rutas que contienen a los clientes *i* y *j* respectivamente. Si *i* es el último cliente de *ri* y *j* es el primer cliente de rj y la combinación de ri* y rj $*$ es factible, combinarlas. Eliminar Sij de futuras consideraciones. Si quedan ahorros por examinar ir a 3, si no terminar.

Algoritmo de Ahorros (Versión secuencial)

Paso 1 (inicialización). Para cada cliente i construir la ruta (0, *i*, 0).

Paso 2 (cálculo de ahorros). Calcular sij para cada par de clientes *i* y *j.*

Paso 3 (selección). Si todas las rutas fueron consideradas, terminar. Si no, seleccionar una ruta que aún no haya sido considerada.

Paso 4 (extensión). Sea *(0, i,. . . , j, 0)* la ruta actual. Si no existe ningún ahorro conteniendo a i o a j, ir a 3. Sea (S*ki* o S*jl*) el máximo ahorro conteniendo a *i* o a *j*. Si *k* o *l* es el último (o primer) cliente de su ruta y la combinación de dicha ruta con la actual es factible, realizar dicha combinación. Eliminar S*ki* o S*jl* de futuras consideraciones. Ir a 2

- **Inserción Secuencial de Mole & Jameson**

En esta heurística[52] se utilizan dos medidas para decidir el próximo cliente a insertar en la solución parcial. Por un lado, para cada cliente no visitado se calcula la mejor posición para ubicarlo en la ruta actual teniendo en cuenta solamente las distancias y sin reordenar los nodos que ya están en la ruta. Se tiene una ruta (v0, v1, . . . , vt, vt+1) donde v0 = vt+1 = 0. Si w es un cliente no visitado, el costo de insertar w entre vi y vi+1 (0 ≤ i ≤ t) se define como

$$C_1\ (v_i, w) = \begin{cases} C_{v_i,w} + C_{w,v_{i+1}} - \lambda C_{v_i,v_{i+1}} & si\ \ (v_0, v_i, w, v_{i+1}, \ldots y_{t+1})\ \ es\, factible; \\ \infty\ \ si\ noes\ factible \end{cases}$$

La mejor posición para insertar el cliente W en la ruta actual está dada por

[52]Mole, R.H. y Jameson, S.R.. A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion. Operational Research Quarterly, 1976, p., 503–511.

$$i(w) = \text{argmin} \quad C_1(v_i, w) \qquad i = 0, \ldots, t.$$

Si se utilizara solamente la medida C1 para decidir el próximo cliente a insertar, es probable que los clientes lejanos al depósito no sean tenidos en cuenta sino hasta las iteraciones finales del algoritmo, es decir, cuando sean las únicas alternativas factibles. Por lo tanto, es necesario utilizar un incentivo adicional para la inserción de clientes lejanos al depósito. Se define C2(vi , w) = µC*0w* –C1(vi , w) para cada cliente w. En cada iteración se busca el cliente que maximiza la medida c2 (llamada medida de urgencia) y se lo inserta en la posición dada por el mínimo valor de c1. Además de las medidas anteriores, debe considerarse la factibilidad de las inserciones. Cuando ninguna inserción es factible y si aún quedan clientes sin visitar, se selecciona un cliente para comenzar una nueva ruta. El algoritmo es el siguiente.

Algoritmo de Mole & Jameson

Paso 1 (creación de una ruta). Si todos los clientes pertenecen a alguna ruta, terminar. Si no, seleccionar un cliente no visitado w y crear la ruta r = (0, w, 0).

Paso 2 (inserción). Sea r = (v0, v1, . . . , vt, vt+1) donde v0 = vt+1 = 0. Para cada cliente no visitado w, calcular *i (w) = arg mini=0,…,t* C1(vi , w). Si no hay inserciones factibles, ir al paso 1. Calcular w∗ = arg Max C2 (vi (w), w). Insertar w∗ luego de vi(w∗) en r.

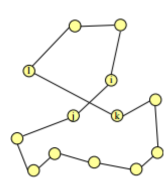
Paso 3 (optimización). Aplicar el algoritmo 3-opt [sobre r. Ir al paso 2. Para seleccionar el cliente que iniciara una ruta pueden utilizarse diferentes alternativas, por ejemplo, el más lejano al depósito. El algoritmo utiliza dos parámetros λ y µ para modificar sus criterios de selección de clientes. Al hacer crecer el parámetro λ se favorece la inserción de clientes entre nodos lejanos; y al aumentar el valor de µ, se privilegia la inserción de clientes lejanos al depósito. En general, los últimos clientes no visitados son lejanos entre sí y por ende, las últimas rutas construidas son de mala calidad. Para corregir esta deficiencia, se propone utilizar un procedimiento de intercambio de clientes entre las rutas una vez que el algoritmo finaliza su ejecución. Primero se busca reasignar clientes de modo de disminuir el costo de la solución. Luego, cuando todos los cambios aumentan el costo, se prosigue realizando intercambios buscando una solución que utilice menos vehículos.

- **Heurística 2-OPT**

Este procedimiento está basado en la siguiente observación para grafos con distancias euclideas[53] (o en general con costos cumpliendo la desigualdad triangular). Si un ciclo Hamiltoniano se cruza a sí mismo, puede ser fácilmente acortado, basta con eliminar las dos aristas que se cruzan y reconectar los dos caminos resultantes mediante aristas que no se corten. El ciclo final es más corto que el inicial. Un movimiento 2-opt consiste en eliminar dos aristas y reconectar los dos caminos resultantes de una manera diferente para obtener un nuevo ciclo.

Las figuras 2 y 3, se ilustran este movimiento en el que las aristas (i, j) y (l, k) son reemplazadas por (l, j) y (i, k). Notar que solo hay una manera de reconectar los dos caminos formando un único tour.

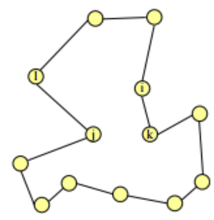
Figura 2: Solución Original



Fuente**:** Rafael Martí, Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia “Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria”.

[53]MARTI, R. Procedimiento Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia. p., 27-29

Figura 3: Solución mejorada



Fuente**:** Rafael Martí, Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia "Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria".

- **Heurística 3-OPT**

Es un método de muestreo utilizado para generar poblaciones de soluciones localmente óptimas.[54] Este algoritmo, utiliza heurística de búsqueda local, para hallará m óptimos locales y así crear la población P. Para llevar a cabo la creación de la población, este algoritmo guarda en una variable denominada r-opt una ruta hallada aleatoriamente como se describe a continuación[55]:

1. La ruta arranca del depósito.
2. Se elige aleatoriamente un cliente V, donde V es el conjunto de clientes que aún no han sido visitados. Este proceso se repite hasta que se hayan asignado todos los clientes a la ruta.
3. Cuando V= vacio, esto quiere decir que se haya asignado todos los clientes a la ruta, se debe regresar al depósito. (La ruta inicial puede ser calculada aleatoriamente o ser el resultado de la aplicación de alguna heurística).

Luego de haber creado la ruta inicial se calcula la población de rutas con el algoritmo 3-opt. El método funciona así:

<u>Pasos</u>

[55]CONTRERAS M. y DIAZ M. Op. cit. p., 63-64.

- Se define un número de iteraciones a realizar. Este será el criterio de parada.
- A la ruta creada en 2(r-opt) se le intercambian 3 arcos al azar. Este proceso da origen una nueva ruta denominada (r-new).
- Se comparan las longitudes de (r-new) y (r-opt).
- Si (r-new)<(r-opt), entonces (r-opt)=(r-new). Si (r-new)>(r-opt), se repite el paso 2 paso hasta que se cumpla el criterio de parada.

4.4.3. Metaheurísticas. En los últimos años han aparecido una serie de métodos bajo el nombre de Metaheurísticas con el propósito de obtener mejores resultados que los alcanzados por los métodos heurísticos tradicionales.

El sufijo "meta" significa "más allá", a un nivel superior, las metaheurísticas son estrategias para diseñar o mejorar los procedimientos heurísticos con miras a obtener un alto rendimiento. El término metaheurística fue introducido por Fred Glover en 1986 y a partir de entonces han aparecido muchas propuestas de pautas o guías para diseñar mejores procedimientos de solución de problemas combinatorios[56].

Estos están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los Metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos[57].

A continuación se presenta la metaheurística a usar en el problema de programación y producción por separado e integrado.

[56]OSMAN, Ibrahim. y KELLY, James. Meta-heuristics: Theory and applications. Boston, USA. Edición, Klwer Academic. 1996.
[57] ANÓNIMO. Optimación combinatoria "Línea de investigación del grupo". Universidad de Valencia.

- **Búsqueda Tabú:**

La búsqueda tabú es un método de optimización matemática, perteneciente a la clase de técnicas de búsqueda local. La búsqueda tabú aumenta el rendimiento del método de búsqueda local mediante el uso de estructuras de memoria: una vez que una potencial solución es determinada, se la marca como "tabú" de modo que el algoritmo no vuelva a visitar esa posible solución. La búsqueda tabú es atribuida a Fred Glover.

Su filosofía se basa en derivar y explotar una colección de estrategias inteligentes para la resolución de problemas, basadas en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje. El marco de memoria adaptativa de la búsqueda tabú no sólo explota la historia del proceso de resolución del problema, sino que también exige la creación de estructuras para hacer posibles tal explotación. De esta forma, los elementos prohibidos en la búsqueda tabú reciben este estatus por la confianza en una memoria evolutiva, que permite alterar este estado en función del tiempo y las circunstancias. En este sentido es posible asumir que la búsqueda tabú está basada en determinados conceptos que unen los campos de inteligencia artificial y optimización[58].

Más particularmente, la búsqueda tabú está basada en la premisa de que para clasificar un procedimiento de resolución como inteligente, es necesario que éste incorpore *memoria adaptativa* y *exploración responsiva.* La memoria que se adapta en búsqueda tabú permite la implementación de procedimientos capaces de realizar la búsqueda en el espacio de soluciones eficaz y eficientemente. Dado que las decisiones locales están por tanto guiadas por información obtenida a lo largo del semialeatorios, que implementan una forma de muestreo. La memoria

[58] BATISTA, Belén. y GLOVER, Fred. Introducción a la Búsqueda Tabú. Universidad de la Laguna. University of Colorado at Boulder. p., 1.

adaptativa también contrasta con los típicos diseños de memoria rígidos tales como las estrategias de ramificación y acotación[59].

El énfasis en la exploración responsiva considerada en la búsqueda tabú deriva de la suposición de que una mala elección estratégica puede proporcionar más información que una buena elección realizada al azar, dado que una elección estratégica mala puede proporcionar pistas útiles sobre como guiar la búsqueda inteligente; explota las características de las soluciones buenas a la vez que explora nuevas regiones prometedoras[60].

La estructura de la memoria en la metaheurística de búsqueda tabú opera en relación a cuatro dimensiones principales:

- Calidad
- Influencia
- Corto plazo (lo reciente),
- Largo plazo (lo frecuente)

Con la finalidad de ejecutar los métodos anteriormente mencionados se utilizarán los programas informáticos GAMS y MATLAB. Estos facilitaran la solución del problema con sus diferentes parámetros.

[59]Ibíd. p., 2.
[60]Ibíd. p., 2.

5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Partiendo de la revisión de la literatura realizada sobre el problema PSD[61] (Véase Anexo A), se ampliara dicha revisión a los problemas de CLSP y PVRP, puesto que la integración de los dos da como resultado el PSD, adicionalmente se logra una apropiación de dichos temas, y de tener una visión de las distintas formulaciones y variaciones que se han presentado a lo largo de los años. Lo anterior es base fundamental para la construcción de los modelos en el siguiente capítulo.

La planificación de la producción es una actividad principal en las empresas que la poseen, ya que considera el uso adecuado de los recursos a fin de satisfacer las metas de producción. Generalmente esta operación abarca tres horizontes de planeación: largo plazo, mediano plazo y corto plazo; en donde se toman decisiones de tipo estratégico, táctico y operacional respectivamente. A su vez esta actividad tiene en cuenta características como el número de productos, las limitaciones en cuanto a capacidad o recursos, el deterioro de artículos, la demanda, la escasez del inventario, entre otras[62].

B. Karimi, S. Fatemi Ghomi, y J. Wilson[63] en su publicación tratan sobre la planificación en el mediano plazo, más específicamente las decisiones de los lotes de un solo nivel de tamaño, además de identificar cuando y que cantidad de productos producir. Se presentan una serie de características a tener en cuenta del problema CLSP como son: el horizonte de planeación, el número de niveles, el número de productos, las limitaciones de capacidad o recursos, el deterioro de artículos, la demanda, la configuración de la estructura, así como los inventarios. Se considera dos problemas que son lotes capacitados y no capacitados de un

[61] PSD: Planeación coordinada de producción y distribución.
[62] KARIMI, B. FATEMI, S. y WILSON, J. Op. cit.
[63] KARIMI, B. FATEMI, S. y WILSON, J. Op. cit.

solo nivel. Para el primero se plantea el modelo y es solucionado por el algoritmo de Wagner y Whitin; en el segundo presenta el modelo con sus respectivas restricciones de capacidad de producción, la solución se plantea por medio de 3 métodos que son: exactos, heurísticos y heurística matemática basada en la programación. Cabe resaltar que este documento es pieza fundamental de estudio, debido a que expresa de manera clara el problema de CLSP, sus características, parámetros y restricciones, permitiendo con esto tener un panorama de lo que está basado.

Otro proceso a tener en cuenta que sirve como complemento de la planeación de la producción es la distribución de los productos, es decir, el ruteo de vehículos, el cual se encarga de llevar las órdenes de productos desde las plantas a los clientes/almacenes. Para ello se estudió el problema del PVRP, que se presenta a continuación:

- C.C.R Tan y JE Beasley[64] tratan una heurística para el problema de ruteo de vehículo periódico. En este documento plantean el problema general de ruteo de vehículos con el fin de diseñar las rutas que suplan los requerimientos de nivel de servicio de los clientes, esto se realiza por medio de una heurística que se basa en el algoritmo de ruteo de vehículo diario, con un horizonte de tiempo para realizar las combinaciones de rutas. Inicialmente se hace un acercamiento al VRP (Vehicule Routing Problem), luego se hace una extensión al problema PVRP (Period Vehicule Routing Problem) para darle solución a este último. Los autores con el análisis de estos dos problemas lo que generan es que el lector tenga una idea más clara sobre la problemática y así puedan entender el desarrollo de la solución paso a paso que se realiza en el artículo. Adicionalmente el trabajo sirve como base para la elaboración de la formulación del PVRP.

[64]TAN, C.C,R. y BEASLEY, Jonh. A heuristic algorithm for the period vehicule routing problema. En: Omega, 1984, vol. 12, no 5, p. 497-504.

- Dalessandro Vianna, Luiz Ochi, Lucia Drummond[65], trataron una metaheurística paralela evolutiva al problema del enrutamiento periódico de vehículo. Se propuso un algoritmo basado en los conceptos utilizados en paralelo con los algoritmos genéticos y las heurísticas de búsqueda local, para solucionar el problema clásico de enrutamiento de vehículos con la planificación periodo de un solo día a día M. Dicho algoritmo emplea el modelo de isla en el que la migración de frecuencia no debe ser muy alta. Lo que se buscaba era minimizar la distancia recorrida de tal manera que solo un vehículo maneja las entregas para un cliente determinado. Los resultados computacionales llevados a cabo en los problemas de la literatura indicaron el enfoque propuesto supera heurísticas existentes en la mayoría de los casos.

- Lúcia Drummond, Luiz Ochi, y Dalessandro Vianna[66], hablaron sobre una metaheurística paralela asíncrona para el problema de enrutamiento periódico de vehículo. En la realización de este documento utilizaron la literatura del artículo "Una metaheuristica paralela evolutiva al problema del enrutamiento periódico de vehículo" de los mismo autores, la diferencia fue la metaheuristica usada en la solución del problema, puesto que se trata de un algoritmo paralelo basado en el modelo isla implementado en un clúster de estaciones de trabajo. Este modelo se divide en varias subpoblaciones, que evolucionan en paralelo y migran periódicamente sus individuos entre sí, debido al alto costo de la comunicación, mientras que el costo de frecuencia de migración no es muy alta.

[65]VIANNA, Dalessandro Soares; OCHI, Luiz S.; DRUMMOND, Lúcia MA. A parallel hybrid evolutionary metaheuristic for the period vehicle routing problem. En: Parallel and Distributed Processing. Springer Berlin Heidelberg, 1999, p., 183-191.
[66]ibid. p., 379-386.

- Enrico Angelelli y Maria Speranza[67], trataron el problema de ruteo de vehículo periódico con instalaciones intermedias. En el documento se estudió una extensión del PVRP con vehículos que pueden renovar su capacidad en algunas instalaciones intermedias, los vehículos regresan al depósito solo cuando sus turnos han terminado. Para el problema se propone el algoritmo de búsqueda tabú y se presenta los resultados computacionales del conjunto de instancias de la literatura.

- Sofie Coene, Arent Arnout y Frits Spieksma[68] trabajaron un caso de estudio del problema de ruteo de vehículo periódico. En este artículo se cuenta las ubicaciones de los clientes, las demandas de los mismo y el conjunto de vehículos capacitados, además cuenta con un horizonte de planificación y una frecuencia para visitar al cliente. La solución se realizó utilizando diferentes heurísticas con el fin de verificar cual presentaba un mejor resultado. Adicionalmente se debe tener en cuenta que por ser caso de estudio es un resultado especial, más este que se trata de recolección de residuos (alto o bajo riesgo). El análisis de este documento sirve como base para la formulación del PVRP, ya que este documento presenta un problema más complejo y con un mayor número de variables, puesto que el problema de una compañía belga que transporta residuos riesgosos.

- Julien Michallet, Christian Prins, Lionel Amodeo, Farouk Yalaoui, y Gregoire Vitry[69], en su documento hablan sobre un difícil problema de ruteo de vehículo periódico con ventanas de tiempo de una empresa especializada en el transporte de bienes de valor, por tanto tiene restricciones de seguridad. El

[67]ANGELELLI, Enrico. y SPERANZA, Maria. The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. European Journal of Operational Research, 2002, vol. 137, no 2, p., 233-247.
[68] COENE, Sofie. ARNOUT, Arent. y SPIEKSMA, Frits The periodic vehicle routing problem: a case study, 2008.
[69]MICHALLET, Julie. PRINS, Christian. AMODEO, Lionel. YALAOUI, Farouk. y VITRY Grégoire. Multi-start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. Computers & operations research, 2014, vol. 41, p. 196-207.

objetivo era resolver problemas de la vida real, por lo cual el tiempo debe ser razonable; se presentan casos derivados del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y dos casos prácticos, además de un caso particular de un solo periodo. Se partió de la base del clásico VRP y se enriqueció con restricciones tales como ventanas de tiempo para visitar los clientes, operaciones de recogida y entrega, flota homogénea de vehículos, entre otras.

- Mohammad Mirabi[70] trata de algoritmo hibrido para resolver el ruteo de vehículos periódico de multi-depositos. Lo característico del algoritmo es la solución al mecanismo de construcción del electromagnetismo con un reconocido simulador. El objetivo consistía en minimizar la distancia total recorrida en cada depósito y el total de tiempo de espera de todos los clientes para tomar el servicio. El problema básico era la construcción del conjunto de rutas para una flota de vehículo, que empiece y termine en un depósito y cada cliente debe ser visitado una vez por un vehículo.

- Valentina Cacchiani, V. Hemmelmayr, y Fabien Tricoire[71] hablan en su publicación propusieron un algoritmo para la programación lineal entera mixta del PVRP. El problema consistía en determinar un conjunto de rutas con el mínimo costo para un horizonte de planificación, con restricciones como que el cliente debe ser visitado un requerido número de veces, debe recibir la cantidad solicitada del producto, el número de rutas por días que no excedan la capacidad de vehículos, la solución se genera por una heurística que cuenta con un algoritmo de búsqueda local iterativa.

[70]MIRABI, Mohammad. A hybrid electromagnetism algorithm for multi-depot periodic vehicle routing problem. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, vol. 71, no. 1-4, p. 509-518.
[71]CACCHIANI, Valentina; HEMMELMAYR, V.C. y TRICOIRE, Fabien. A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 2014, vol. 163, p. 53-64.

- Floret Hernández, Michel Gendreau y Jean Potvin[72], tratan sobre el problema táctico donde las combinaciones de intervalos de tiempo para los servicios de entrega dentro de un horizonte de planificación deben ser seleccionadas en cada zona de un área geográfica. Las rutas fueron construidas basadas en la selección de la combinación de intervalos de tiempo con su respectiva flota de vehículos para cada periodo del horizonte de planificación. Para la solución a este problema se propusieron dos heurísticas; la primera era una aproximación trifásica: primero se resuelve un problema de ruteo de vehículo periódico , seguido por la fase de reparación y finalmente por la fase de mejora para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo fue resuelto en cada periodo del horizonte de planificación; la segunda heurística aborda el problema en su conjunto para resolver directamente un problema de ruteo de vehículo periódico con ventanas de tiempo.

- Li Shu, Ke-wei Cheng, Xiao-wen Zhang, y Ji Zhou[73] estudiaron un algoritmo de cobertura de barrido para el ruteo de sensores móviles que se comunican con una central de datos. Se desarrolló una cobertura de barrido para el problema de la PRVP, en donde se buscaba una ruta para los sensores móviles que minimiza el número de visitas necesarias, se corrió este esquema en escenarios con una variedad de topologías de POI (número y distribuciones de los puntos de interés) y la velocidad a la que lo sensores viajaban. El resultado de la solución mostró que el algoritmo es mejor que sus predecesores por reducir el número de exploraciones innecesarias cuando son diferentes puntos de interés.

---

[72]HERNANDEZ, Florent. GENDREAU, Michel. y POTVIN, Jean-Yves. Heuristics for Time Slot Management: A Periodic Vehicle Routing Problem View. 2014.
[73]SHU, Li. CHENG, Ke-wei. ZHANG, Xiao-wen. y ZHOU, Ji-liu. Periodic Sweep Coverage Scheme Based on Periodic Vehicle Routing Problem. Journal of Networks, 2014, vol. 9, no 3, p., 726-732.

6. DISEÑO DEL MODELO

Los siguientes modelos tanto para la secuenciación de la producción como la distribución fueron postulados de acuerdo a las características y parámetros revisados en la literatura, y las diferentes variaciones que se quieren realizar con la investigación del tema, para así dejar un horizonte de planificación claro y ciertas características estipuladas para el modelo.

6.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA TAMAÑO DE LOTE DE PRODUCCIÓN CAPACITADO (CLSP)

La construcción del modelo se realiza con base a lo encontrado en el marco teórico y la revisión bibliográfica presentada anteriormente, el principal artículo usado para la formulación fue el de B. Karimi[74] como se presenta a continuación:

Índices:

r: $Productos$

t: $Periodos\ de\ tiempo$

Parámetros:

D_{rt}: $Demanda\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

a_{rt}: $Costo\ de\ producir\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

h_{rt}: $Costo\ de\ mantener\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

s_{rt}: $Costo\ de\ setup\ \ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

T_{rt}: $Tiempo\ para\ producir\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

B_{rt}: $Tiempo\ máximo\ disponible\ para\ el\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

Variables:

[74] KARIMI, B. FATEMI, S. y WILSON, J. Op. cit.

$P_{rt}: Cantidad\ de\ productos\ r\ fabricados\ en\ el\ periodo\ t$

$I_{rt}: Inventario\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

$$L_{rt} = \begin{Bmatrix} 1, si\ se\ produce\ el\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t \\ 0, de\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$$

Función objetivo:

$$\min Z = \sum_{r=1} \sum_{t=1} (a_{rt}P_{rt} + h_{rt}I_{rt} + s_{rt}L_{rt})$$

Sujeto a:

$$\sum_{r=1} I_{r1} = 0 \qquad (1.2)$$

$$\sum_{r=1} T_{rt}P_{rt} \leq B_t\ ;\ \ \forall t \qquad (1.3)$$

$$P_{rt} + I_{rt} - I_{r,t+1} = D_{rt}\ ;\ \ \forall r, \forall t \qquad (1.4)$$

$$P_{rt} \leq ML_{rt}\ ;\ \ \forall r, \forall t \qquad (1.5)$$

$$P_{rt} \geq 0\ ;\ I_{rt} \geq 0\ ;\ L_{rt} \in \{0,1\} \qquad (1.6)$$

Explicación de las restricciones del modelo.

El objetivo de este modelo es disminuir los costos de producción, de setup y de mantener inventarios. En la restricción (1.2) se inicializan los inventarios en cero. En la restricción (1.3) se asegura que el tiempo de producir todos los productos no supera la capacidad que se tiene de producir en la planta. La restricción (1.4) asegura la satisfacción de la demanda. La restricción (1.5) asegura que se abra la planta en el periodo en que se debe producir. Por último la restricción (1.6) asegura la no negatividad de las variables.

Características del problema:

Como se mencionó anteriormente las características que se presentan para este problema fueron tomadas en su mayoría del artículo planteado por B. Karimi[75], entre ellas son:

- Horizonte finito de producción.
  T: Número de periodos.
  En cada periodo se determina si se produce, la cantidad a producir y la cantidad a almacenar (tiempo discreto).
- Una planta de producción.
  Capacidad de producción dada en tiempo total disponible por periodo.
  No hay subensambles.
  Estructura de setup simple.
- Varios minoristas. Son los generadores de demanda.
- Varios productos.
  Cada minorista puede demandar cualquier producto.
  M: Número de productos (índice r).
- Demanda.
  Independiente, conocida y dinámica.
  No se consideran faltantes ni pedidos abiertos de un periodo a otro.
- Costos.
  Se consideran costos de setup, así como costos de almacenar y de producir por unidad.

A continuación se modela un problema de producción teniendo en cuenta las características, con el objetivo de observar cada uno de los parámetros planteados para la solución del problema de producción. Se evaluara la instancia formada por 4 clientes, 3 productos, una fábrica de producción y dos periodos de tiempo, en la siguientes tablas se verán reflejados los datos.

[75] Ibid.

Tabla 1: Demanda del cliente j del producto r por periodo

DEMANDA djrt (unid)	PERIODO	
	1	**2**
D11	22	3
D12	15	10
D13	9	5
D21	9	12
D22	10	21
D23	0	20
D31	4	0
D32	5	6
D33	11	8
D41	0	5
D42	4	0
D43	4	0
183	93	90

Tabla 2: Tiempo de producción del producto r por periodo y capacidad máxima de tiempo de cada periodo en minutos

TIEMPO Frt (min/unid)	PERIODO	
	1	**2**
P1	1,5	0,2
P2	0,8	1
P3	0,9	1,5
5,9	3,2	2,7
TIEMPO Bt (min)	**PERIODO**	
	1	**2**
Capacidad	300	300

Tabla 3: Costos de producir una unidad del producto r por periodo de tiempo

Costo art ($/unid)	PERIODO	
	1	**2**
P1	6	4
P2	8	4
P3	10	7
39	24	15

Tabla 4: Costo de Setup por producto r por periodo de tiempo

Costo Srt ($)	PERIODO	
	1	2
P1	1000	2000
P2	500	700
P3	800	600
5600	2300	3300

Tabla 5: Costo de mantener inventario del producto j por periodo

Costo Hrt ($/unid)	PERIODO	
	1	2
P1	2	1
P2	3	0,5
P3	3,5	1
11	8,5	2,5

Figura 4: Solución obtenida por Solver (PRODUCCIÓN)

F.O.	3839,5																
	Variables	Costos	1.2	1.3		1.4						1.5					
P11	55	6		1,5		1						1					
P21	71	8		0,8			1						1				
P31	57	10		0,9				1						1			
P12	0	4			0,2				1						1		
P22	0	4			1					1						1	
P32	0	7			1,5						1						1
L11	1	1000										-10000					
L21	1	500											-10000				
L31	1	800												-10000			
L12	0	2000													-10000		
L22	0	700														-10000	
L32	0	600															-10000
I11	0	2	1			1											
I21	0	3	1				1										
I31	0	3,5	1					1									
I12	20	1				-1			1								
I22	37	0,5					-1			1							
I32	33	1						-1			1						
			0	190,6	0	35	34	24	20	37	33	-9945	-9929	-9943	0	0	0
			=	≤	≤	=	=	=	=	=	=	≤	≤	≤	≤	≤	≤
			0	300	300	35	34	24	20	37	33	0	0	0	0	0	0

Las tablas anteriores se presentan los parámetros de entrada para el modelo CLSP, en ellas se observa la demanda, los tiempos de producción y los costos, en la figura 5 está la solución del modelo, en donde se produce todo lo demandado por el cliente, puesto que es más económico abrir la planta una vez y mantener para suplir los requerimientos de los clientes, puesto que la capacidad es suficiente para producir lo de los 3 periodos; por tal razón el modelo está cumpliendo con cada uno de los parámetros planteados y disminuye los costos de la función objetivo.

6.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN

Para elaborar la formulación de este problema se tuvo en cuenta lo estudiando durante el estudio del marco teórico y la revisión de la literatura.

Sofie Coene, Arent Arnout y Frits Spieksma[76] en su artículo partían de un conjunto de soluciones factibles, los cuales tomaban rutas prestablecidas para un reparto equilibrado de los vehículos, pero a la hora de formular este modelo ese parámetro no se adquirió ya que se optó por correrlo completo. Se tuvieron en cuenta para la investigación los contenidos de ciertos artículos adicionales que aportaron lo siguiente

Índices:

i: $Nodo\ de\ salida$

j: $Nodo\ de\ entrada$

k: $Ruta\ o\ Vehículo$

r: $Productos$

t: $Periodo\ de\ tiempo$

[76] COENE, S.; ARNOUT, A., y SPIEKSMA, F. The periodic vehicle routing problem: a case study. SSRN 1368749, 2008.

Parámetros:

c_{ijkt}: *Costo de transportar del nodo i al nodo j por la ruta k en el periodo t*

d_{jrt}: *Demanda del cliente j del producto r en el periodo t*

v: *Capacidad del vehículo*

Variables:

$$Y_{ijk}^{t} = \begin{Bmatrix} 1, si\ X_{rtj} \geq 0 \\ 0, de\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$$

X_{jkt}: *Cantidad de productos enviados al cliente j en el vehículo k en el periodo t*

Función objetivo:

$$Min\ Z = \sum_{i=0} \sum_{j=0} \sum_{k=1} \sum_{t=1} c_{ijk} Y_{ijk}^{t}$$

Sujeto a:

$$v \sum_{k=1}^{2} \sum_{t=1}^{2} Y_{ijk}^{t} \geq \sum_{r=1}^{3} d_{jrt} \ ; \ \forall j \in \frac{V}{\{0\}}, \forall t \qquad (2.2)$$

$$v \sum_{k=1}^{2} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 0}}^{4} Y_{0jk}^{t} \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 0}}^{4} \sum_{r=1}^{3} d_{jrt} \ ; \ \forall t \qquad (2.3)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{4} Y_{ijk}^{t} - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{4} Y_{jik}^{t} = 0 \ ; \ \forall j, \forall k, \forall t \qquad (2.4)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{4} Y_{ijk}^{t} \leq 1 \ ; \ \forall j, \forall k, \forall t \qquad (2.5)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in S} Y_{ijk}^{t} \leq |S| - 1 \quad \forall k, \forall t \qquad (2.6)$$

$$\sum_{k=1}^{2} X_{jkt} = \sum_{r=1}^{3} d_{jrt} \ ; \ \forall j \in V/\{0\}, \ \forall t \qquad (2.7)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 0}}^{4} X_{jkt} \leq v\,; \quad \forall k, \forall t \qquad (2.8)$$

$$X_{jkt} \leq v \sum_{\substack{i=0 \\ j\neq i}}^{4} Y_{ijk}^{t}\,; \quad \forall j \in V/\{0\}, \forall k, \forall t \qquad (2.9)$$

$$Y_{ijk}^{t} \in \{0,1\}\,; \quad X_{rtj} \geq 0 \qquad (2.10)$$

Explicación de las restricciones del modelo.

El objetivo del modelo es reducir costo de transportar. En la restricción (2.2) se asegura que la demanda sea satisfecha, además de abrir la ruta necesaria para transportarla. En la restricción (2.3) se asegura que la cantidad de vehículos que salgan del origen, vuelvan a él. En la restricción (2.4) se asegura que la ruta que llegue a cada nodo, salga de él. En la restricción (2.5) asegura que un vehículo puede visitar máximo una vez al nodo. La restricción (2.6) asegura que no se presenten subtoures. La restricción (2.7) asegura que las cantidades enviadas cumplan la demanda. La restricción (2.8) permite controlar la carga del vehículo en cada ruta. La restricción (2.9) relaciona envíos con rutas. La restricción (2.10) asegura la no negatividad de las variables.

Características del PVRP:

- Un origen y varios destinos.
- Matriz costos →(DIGRAP AND COMPLET).
- Cada cliente será visitado a lo sumo una sola vez, lo que puede decirse que por ruta o por vehículo.
- Capacidad del vehículo es de flota homogénea, todos los vehículos tienen la misma capacidad

- Se utilizarán la cantidad de vehículos requeridos calculados con la siguiente fórmula $\sum\sum\frac{d_{jr}}{C}$ donde de d es la demanda de los clientes y c la capacidad del vehículo.
- Todos los vehículos parten y llegan al origen.
- Las demandas de los clientes podrían ser mayores a la capacidad del vehículo, podrían hacerse entregas parciales en el mismo periodo, no habrán ni sobrantes ni faltantes se satisface la demanda en el periodo.
- Las demandas de los clientes son conocidas y variables en cada periodo.
- Cuando se trate de varios productos se consideraran que tienen el mismo volumen.

A continuación se muestra el modelamiento del problema de ruteo teniendo en cuenta los siguientes parámetros de entrada, para observar que se cumpla cada una de las restricciones planteados para la solución del problema de distribución.

La instancia está formada por 4 clientes 3 productos 2 periodos y 2 vehículos

Tabla 6: Demanda del cliente j del producto r por periodo

DEMANDA djrt (unid)	PERIODO	
	1	**2**
D11	22	3
D12	15	10
D13	9	5
D21	9	12
D22	10	21
D23	0	20
D31	4	0
D32	5	6
D33	11	8
D41	0	5
D42	4	0
D43	4	0
183	93	90

Tabla 7: Demanda del producto r por periodo de tiempo

DEMANDA Drt (unid)	PERIODO	
	1	2
D1	35	20
D2	34	37
D3	24	33
183	93	90
CAPACIDAD VEHICULO		50

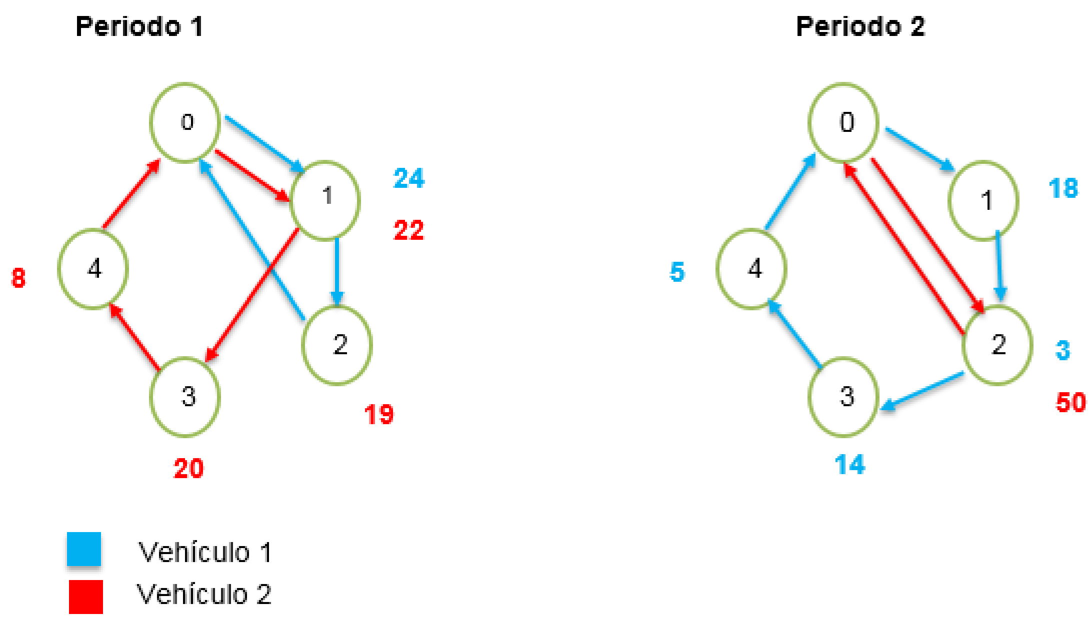
Tabla 8: Costos de transportar desde el cliente i al cliente j por el vehículo k por periodo

COSTO DE TRANSPORTAR			Ruta 1 - Periodo 1		
i\j	0	1	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000
COSTO DE TRANSPORTAR			Ruta 2 - Periodo 1		
i\j	0	1	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000
COSTO DE TRANSPORTAR			Ruta 1 - Periodo 2		
i\j	0	1	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000
COSTO DE TRANSPORTAR			Ruta 2 - Periodo 2		
i\j	0	1	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000

Tabla 9: Solución Solver

f.o	299	
	Variable	Costos
Y0111	1	12
Y0211	0	24
Y0311	0	47
Y0411	0	31
Y1011	0	12
Y1211	1	20
Y1311	0	32
Y1411	0	45
Y2011	1	24
Y2111	0	20
Y2311	0	23
Y2411	0	54
Y3011	0	47
Y3111	0	32
Y3211	0	23
Y3411	0	17
Y4011	0	31
Y4111	0	45
Y4211	0	54
Y4311	0	17
Y0121	1	12
Y0221	0	24
Y0321	0	47
Y0421	0	31
Y1021	0	12
Y1221	0	20
Y1321	1	32
Y1421	0	45
Y2021	0	24
Y2121	0	20
Y2321	0	23
Y2421	0	54
Y3021	0	47
Y3121	0	32
Y3221	0	23
Y3421	1	17
Y4021	1	31
Y4121	0	45
Y4221	0	54
Y4321	0	17
Y0112	1	12
Y0212	0	24
Y0312	0	47
Y0412	0	31
Y1012	0	12
Y1212	1	20
Y1312	0	32
Y1412	0	45
Y2012	0	24
Y2112	0	20
Y2312	1	23
Y2412	0	54
Y3012	0	47
Y3112	0	32
Y3212	0	23
Y3412	1	17
Y4012	1	31
Y4112	0	45
Y4212	0	54
Y4312	0	17
Y0122	0	12
Y0222	1	24
Y0322	0	47
Y0422	0	31
Y1022	0	12
Y1222	0	20
Y1322	0	32
Y1422	0	45
Y2022	1	24
Y2122	0	20
Y2322	0	23
Y2422	0	54
Y3022	0	47
Y3122	0	32
Y3222	0	23
Y3422	0	17
Y4022	0	31
Y4122	0	45
Y4222	0	54
Y4322	0	17
X111	24	
X211	19	
X311	0	
X411	0	
X121	22	
X221	0	
X321	20	
X421	8	
X112	18	
X212	3	
X312	14	
X412	5	
X122	0	
X222	50	
X322	0	
X422	0	

Figura 5: Ruteo de los periodos 1 y 2



En las tablas 6, 7 y 8, se encuentra la información de entrada del modelo como los costos, demandas y capacidad, mientras que en la tabla 9 se presenta la solución al modelo, igual que en las figuras 4 y 5, en ellas se percibe como se realiza el ruteo para cada uno de los periodos y se verifica el cumplimiento de las restricciones planteadas, es decir, se cumplen con las demandas de cada cliente y se utiliza la capacidad completa del vehículo 1 antes de utilizar el vehículo 2. La solución del modelo expresa la ruta y la cantidad exacta a entregar por cada vehículo, cada cliente es visitado una sola vez por vehículo, la cantidad de rutas que llegan a cada nodo salen del mismo, el inicio y final de las rutas es la fábrica.

Es necesario conocer las demandas, ya que este valor es un parámetro de entrada, además sirve para estipular la cantidad de vehículos, teniendo en cuenta la mejor ruta. La solución del problema es de 299.

6.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA PSD

Teniendo en cuenta el artículo de Chandra[77] se tuvo en cuenta el siguiente modelo para integrar la producción y la distribución en uno solo.

Índices

$i: Nodo\ de\ salida$

$j: Nodo\ de\ entrada$

$r: Productos$

$t: Periodo\ de\ tiempo$

Parámetros:

$D_{rt}: Demanda\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

$d_{rjt}: Demanda\ del\ producto\ r\ del\ cliente\ j\ en\ el\ periodo\ t$

$T_{rt}: Tiempo\ para\ producir\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

$B_t: Tiempo\ maximo\ disponible\ en\ el\ periodo\ t$

$v: Capacidad\ del\ vehiculo$

$h_{rt}: Costo\ de\ mantener\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

$s_{rt}: Costo\ de\ setup\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

$a_{rt}: Costo\ de\ producir\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

$c_{ijt}: Costo\ de\ transportar\ del\ nodo\ i\ al\ nodo\ j\ en\ el\ periodo\ t$

Variables:

$P_{rt}: Cantidad\ de\ productos\ r\ \ fabricados\ en\ el\ periodo\ t$

$$L_{rt} = \begin{Bmatrix} 1, si\ P_{rt} \geq 0 \\ 0, de\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$$

$Y_{ijt}: Número\ de\ viajes\ directos\ desde\ el\ nodo\ i\ al\ nodo\ j\ en\ el\ periodo\ t$

$I_{rt}: Inventario\ del\ producto\ r\ \ en\ el\ periodo\ t$

---

[77] CHANDRA, P. y FISHER, M. Op. cit.

Función objetivo:

$$Min\ Z = \sum_{r}\sum_{t} s_{rt} * L_{rt} + \sum_{r}\sum_{t} h_{rt} * I_{rt} + \sum_{r}\sum_{t} a_{rt} * \ P_{rt} + \sum_{i}\sum_{j}\sum_{t} c_{ijt} * Y_{ijt}$$

Sujeto a:

$$\sum_{r} P_{rt} * T_{rt} \leq B_t \ \ ; \ \ \forall t \tag{3.2}$$

$$P_{rt} \leq ML_{rt} \ \ ; \ \ \forall r, \forall t \tag{3.3}$$

$$P_{rt} + I_{rt} - I_{r,t+1} = D_{rt} \ \ ; \ \ \forall r, \forall t \tag{3.4}$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{ijt} = \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{jit} \ \ ; \ \ \forall j, \forall t \tag{3.5}$$

$$v \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{ijt} \geq \sum_{r=1} d_{rjt} \quad ; \ \ \forall j \in V/\{0\}; \forall t \tag{3.6}$$

$$v \sum_{i=1} Y_{i0t} \geq \sum_{r}\sum_{j} d_{rjt} \ \ ; \ \forall t \tag{3.7}$$

$$\sum_{r} I_{r1} = 0 \tag{3.8}$$

$$\sum_{\substack{i \in S \\ j \in S}} Y_{ijt} \leq |S| - 1 \tag{3.9}$$

$$L_{rt} \in \{0,1\} \ \ ; \ \ \ P_{rt} \geq 0 \ \ ; \ \ I_{rt} \geq 0 \ \ ; \ \ Y_{ijt} \geq 0 \tag{3.10}$$

<u>Explicación de las restricciones del modelo.</u>

La función objetivo busca minimizar los costos asociados a la producción, transporte, almacenamiento y setup. La restricción (3.2) asegura la cantidad de productos a fabricar no sobrepase la capacidad disponible de la fábrica. La restricción (3.3) asegura que la planta se abra si va a fabricar determinado producto en un periodo de tiempo. La restricción (3.4) asegura que con lo producido y almacenado se cumpla con la demanda. La restricción (3.5) asegura que la cantidad de vehículos o viajes que llegan a cada nodo salgan del mismo. La restricción (3.6) asegura la cantidad de viajes que van a cada nodo j en cada periodo t. La restricción (3.7) asegura que todo lo que llegue al origen sea el máximo número de rutas que lleguen a los otros nodos (total de viajes por periodo). La restricción (3.8) muestra que los inventarios iniciales son 0. La restricción (3.9) permite la eliminación de subtoures. La restricción (3.10) asegura la no negatividad de las variables.

Utilizando este modelo se realizó a modelar un ejercicio pequeño que cuenta de 4 clientes, 3 productos, 2 vehículos y una sola fábrica, con los siguientes datos para probar que el modelo cumpliese las características deseadas:

Tabla 10: Demanda del cliente j del producto r por periodo

DEMANDA djrt (unid)	PERIODO	
	1	2
D11	22	3
D12	15	10
D13	12	5
D21	9	12
D22	10	11
D23	0	20
D31	4	0
D32	5	6
D33	11	8
D41	0	5
D42	4	0
D43	4	0
176	96	80

Tabla 11: Tiempo de producción del producto r por periodo y capacidad máxima de tiempo de cada periodo en minutos

TIEMPO Frt (min/unid)	PERIODO	
	1	2
P1	1,5	0,2
P2	0,8	1
P3	0,9	1,5
5,9	3,2	2,7

TIEMPO Bt (min)	PERIODO	
	1	2
Capacidad	300	300

Tabla 12: Costos de producir una unidad del producto r por periodo de tiempo

Costo art ($/unid)	PERIODO	
	1	2
P1	6	4
P2	8	4
P3	10	7
39	24	15

Tabla 13: Costo de Setup por producto r por periodo de tiempo

Costo Srt ($)	PERIODO	
	1	2
P1	1000	2000
P2	500	700
P3	800	600
5600	2300	3300

Tabla 14: Costo de mantener inventario del producto j por periodo

Costo Hrt ($/unid)	PERIODO	
	1	2
P1	2	1
P2	3	0,5
P3	3,5	1
11	8,5	2,5

Tabla 15: Costo de trasporte por periodo

COSTO DE TRANSPORTAR			Periodo 1		
i\j	**0**	**1**	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000
COSTO DE TRANSPORTAR			Periodo 2		
i\j	**0**	**1**	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000

Tabla 16: Solución PSD Solver

f.o	4022,5	
	Variable	Costos
P11	55	6
P21	61	8
P31	60	10
P12	0	4
P22	0	4
P32	0	7
L11	1	1000
L21	1	500
L31	1	800
L12	0	2000
L22	0	700
L32	0	600
Y011	1	12
Y021	0	24
Y031	0	47
Y041	1	31
Y101	1	12
Y121	0	20
Y131	0	32
Y141	0	45
Y201	1	24
Y211	0	20
Y231	0	23
Y241	0	54
Y301	0	47
Y311	0	32
Y321	1	23
Y341	0	17
Y401	0	31
Y411	0	45
Y421	0	54
Y431	1	17
Y012	1	12
Y022	0	24
Y032	0	47
Y042	1	31
Y102	1	12
Y122	0	20
Y132	0	32
Y142	0	45
Y202	1	24
Y212	0	20
Y232	0	23
Y242	0	54
Y302	0	47
Y312	0	32
Y322	1	23
Y342	0	17
Y402	0	31
Y412	0	45
Y422	0	54
Y432	1	17
I11	0	2
I21	0	3
I31	0	3,5
I12	20	1
I22	27	0,5
I32	33	1

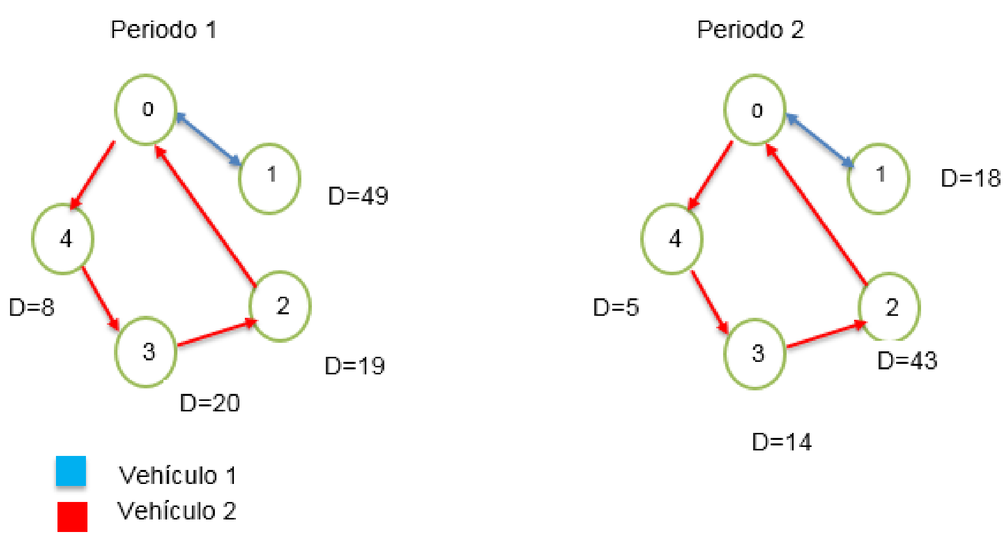
Tabla 17: Solución de producción por periodo de tiempo

	Productos	Demanda	Producción	Inventarios
Periodo 1	1	35	55	20
	2	34	61	27
	3	27	60	33
Periodo 2	1	20	0	0
	2	27	0	0
	3	33	0	0

En las tablas 10, 11, 12, 13, 14, y 15, se encuentran los parámetros de entrada para el modelo del PSD, como los costos, demandas, tiempos de producción y capacidades, en la tabla 16 se presenta lo solución obtenida al correr el problema, en la tabla 17 y las figuras 6 y 7 está contenido el resultado del modelo de forma más específica, en donde se evidencia que para la producción es mejor producir con anticipación y almacenar, debido a que los costos de setup son muy elevados en comparación con los demás, para el ruteo se observa que las rutas suplen el total de la demanda, al mismo tiempo de que no violan las restricciones.

Ahora se realizó la revisión para los sujetos para la parte de ruteo

Figura 6: Solución ruteo periodo 1 y 2



La anterior solución óptima generada por Excel, se da luego de agregar las restricciones de los subtoures, para que no se creen ciclos dentro del modelo que no permitan que se transporte los productos hacia los clientes solución óptima obtenida luego de agregar dos restricciones de subtoures. Sin embargo en el periodo 2, la ruta viola la capacidad del vehículo, además el modelo no proporciona las rutas pero de acuerdo al grafico se pueden suponer, lo que hace necesario revisar el modelo y agregar ciertas restricciones para que se cumplan los parámetros establecidos para ser comparables los modelos por separados e integrado.

Luego de revisar cada una de las restricciones se hizo necesario agregarle el subíndice k, con el fin de poder percibir las rutas o vehículos y no tener que suponer nada en la solución. Revisando la literatura se replanteo el siguiente modelo agregándole unas restricciones quedando de la siguiente manera:

Índices:

i: $Nodo\ de\ salida$

j: $Nodo\ de\ entrada$

r: $Productos$

k: $Vehículos$

t: $Periodo\ de\ tiempo$

Parámetros:

d_{rjt}: $Demanda\ del\ producto\ r\ del\ cliente\ j\ en\ el\ periodo\ t$

T_{rt}: $Tiempo\ para\ producir\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

B_t: $Tiempo\ máximo\ disponible\ en\ el\ periodo\ t$

v: $Capacidad\ del\ vehiculo$

h_{rt}: $Costo\ de\ mantener\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

s_{rt}: $Costo\ de\ setup\ para\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

a_{rt}: $Costo\ de\ producir\ una\ unidad\ del\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t$

c_{ijkt}: $Costo\ de\ transportar\ del\ nodo\ i\ al\ nodo\ j$

Variables:

$P_{rt}: Cantidad\ de\ productos\ r\ \ fabricados\ en\ el\ periodo\ t$

$I_{rt}: Inventario\ del\ producto\ r\ \ fabricados\ en\ el\ periodo\ t$

$$L_{rt} = \begin{Bmatrix} 1, si\ se\ produce\ el\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t \\ 0, de\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$$

$X_{rt}: Cantidad\ de\ productos\ r\ \ fabricados\ en\ el\ periodo\ t$

$$Y_{ijk}^{t} = \begin{Bmatrix} 1, si\ la\ arista\ de\ la\ ruta\ Y_{ijk}^{t}\ se\ activa \\ 0,\ \ en\ caso\ contrario \end{Bmatrix}$$

Función objetivo:

$$Min\ Z = \sum_{r=1}\sum_{t=1} s_{rt}L_{rt} + \sum_{r=1}\sum_{t=1} h_{rt}I_{rt} + \sum_{r=1}\sum_{t=1} a_{rt}P_{rt} + \sum_{i=0}\sum_{j=0}\sum_{k=1}\sum_{t=1} c_{ijkt}Y_{ijk}^{t}$$

Sujeto a:

$$\sum_{r=1} I_{r1} = 0 \qquad (3.2)$$

$$\sum_{r=1} T_{rt}P_{rt} \leq B_t\ \ ;\ \ \forall t \qquad (3.3)$$

$$P_{rt} + I_{rt} - I_{r,t+1} = D_{rt}\ \ \forall r, \forall t \qquad (3.4)$$

$$P_{rt} \leq ML_{rt}\ \ ;\ \ \forall r, t \qquad (3.5)$$

$$v\sum_{k=1}\sum_{i=0} Y_{ijk}^{t} \geq \sum_{r=1} d_{jrt}\ ;\ \ \forall j \in V/\{0\}, \forall t \qquad (3.6)$$

$$v\sum_{k=1}\sum_{\substack{i=0 \\ i\neq j}} Y_{0jk}^{t} \geq \sum_{j=1}\sum_{r=1} d_{jrt}\ \ ;\ \ \forall t \qquad (3.7)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i\neq j}} Y_{ijk}^{t} - \sum_{\substack{i=0 \\ i\neq j}} Y_{jik}^{t} = 0\ ;\ \ \forall j, \forall k, \forall t \qquad (3.8)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i\neq j}} Y_{ijk}^{t} \leq 1;\ \ \forall j, \forall k, \forall t \qquad (3.9)$$

$$\sum_{j\in S}\sum_{i\in S} Y_{ijk}^{t} \leq |S| - 1\ ; \quad \forall k, \forall t \tag{3.10}$$

$$\sum_{k=1}^{2} X_{jkt} = \sum_{r=1}^{3} d_{jrt}\ ;\ \ \forall j \in V/\{0\}, \forall t \tag{3.11}$$

$$\sum_{j=1} X_{jkt} \leq v\ ;\ \ \forall k, \forall t \tag{3.12}$$

$$X_{jkt} \leq v \sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}} Y_{ijk}^{t}\ ;\ \ \forall j \in V/\{0\}, \forall k, \forall t \tag{3.13}$$

$$Y_{rt} \in \{0,1\}\ ;\ \ X_{rt} \geq 0\ ;\ I_{rt} \geq 0\ ;\ V_{ijt} \geq 0 \tag{3.14}$$

Explicación de las restricciones del modelo.

La función objetivo busca minimizar los costos asociados a la producción, almacenamiento y transporte. En la restricción (3.2) se inicializan los inventarios en cero. En la restricción (3.3) se asegura que el tiempo de producir todos los productos no supera la capacidad que se tiene de producir en la planta. La restricción (3.4) asegura la satisfacción de la demanda. La restricción (3.5) asegura que se abra la planta en el periodo en que se debe producir. En la restricción (3.6) se asegura que la demanda sea satisfecha, además de abrir la ruta necesaria para transportarla. En la restricción (3.7) se asegura que la cantidad de vehículos que salgan del origen, vuelvan a él. En la restricción (3.8) se asegura que la ruta que llegue a cada nodo, salga de él. En la restricción (3.9) asegura que un vehículo puede visitar máximo una vez al nodo. La restricción (3.10) asegura que no se presenten subtoures. La restricción (3.11) asegura que las cantidades enviadas cumplan la demanda. La restricción (3.12) permite controlar la carga del vehículo en cada ruta. La restricción (3.13) relaciona envíos con rutas. La restricción (3.14) asegura la no negatividad de las variables.

Características del PSD:

- Horizonte finito de producción.
  T: Número de periodos.
  En cada periodo se determina si se produce, la cantidad a producir y la cantidad a almacenar (tiempo discreto).
- Una planta de producción. Capacidad de producción dada en tiempo total disponible por periodo. No hay subensambles m. Estructura de setup simple.
- Varios productos. Cada cliente puede demandar cualquier producto.
  M: Número de productos (índice: r)
- Demanda. Independiente, conocida y dinámica. No se consideran faltantes ni pedidos abiertos de un periodo a otro.
- Costos. Se consideran costos de setup, así como costos de almacenar, de producir por unidad y transportar del nodo *i* al *j*.
- Un origen y varios destinos
- Matriz costos →(DIGRAP AND COMPLET)
- Cada cliente será visitado a lo sumo una vez por vehículo.
- Capacidad del vehículo es de flota homogénea, todos los vehículos tienen la misma capacidad
- Se utilizaran la cantidad de vehículos requeridos calculados con la siguiente formula $\sum\sum\frac{d_{jr}}{C}$ donde de d es la demanda de los clientes y c la capacidad del vehículo.
- Todos los vehículos parten y llegan al origen.
- Las demandas de los clientes podrían ser mayores a la capacidad del vehículo, podrían hacerse entregas parciales en el mismo periodo, no habrán ni sobrantes ni faltantes se satisface la demanda en el periodo.
- Cuando se trate de varios productos se consideraran que tienen el mismo volumen.

Teniendo en cuenta el modelo planteado con las nuevas restricciones se realizarán las pruebas con el Solver de Excel para observar que el modelo cumpla las características planteadas.

Este modelo contará con las mismas instancias evaluadas en el modelo de producción y distribución para poder verificar que el costo sea igual, ya que deben ser los mismos al sumarlos.

Tabla 18: Demanda del cliente j del producto r por Periodo

DEMANDA djrt (unid)	PERIODO	
	1	2
D11	22	3
D12	15	10
D13	9	5
D21	9	12
D22	10	21
D23	0	20
D31	4	0
D32	5	6
D33	11	8
D41	0	5
D42	4	0
D43	4	0
183	93	90

Tabla 19: Tiempo de producción del producto r por periodo y capacidad máxima de tiempo de cada periodo en minutos

TIEMPO Frt (min/unid)	PERIODO	
	1	2
P1	1,5	0,2
P2	0,8	1
P3	0,9	1,5
5,9	3,2	2,7
TIEMPO Bt (min)	**PERIODO**	
	1	**2**
Capacidad	300	300

Tabla 20: Costos de producir una unidad del producto r por periodo de tiempo

Costo art ($/unid)	PERIODO	
	1	2
P1	6	4
P2	8	4
P3	10	7
39	24	15

Tabla 21: Costo de Setup por producto r por periodo de tiempo

Costo Srt ($)	PERIODO	
	1	2
P1	1000	2000
P2	500	700
P3	800	600
5600	2300	3300

Tabla 22: Costo de mantener inventario del producto j por periodo

Costo Hrt ($/unid)	PERIODO	
	1	2
P1	2	1
P2	3	0,5
P3	3,5	1
11	8,5	2,5

Tabla 23: Costo de transportar por periodo y por ruta

COSTO DE TRANSPORTAR			Periodo 1-Ruta 1		
i\j	**0**	**1**	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000

COSTO DE TRANSPORTAR			Periodo 1-Ruta 2		
i\j	**0**	**1**	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000

COSTO DE TRANSPORTAR			Periodo 2-Ruta 1		
i\j	**0**	**1**	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000

COSTO DE TRANSPORTAR			Periodo 2-Ruta 2		
i\j	**0**	**1**	2	3	4
0	30000	12	24	47	31
1	12	30000	20	32	45
2	24	20	30000	23	54
3	47	32	23	30000	17
4	31	45	54	17	30000

Tabla 24: Solución Solver PSD

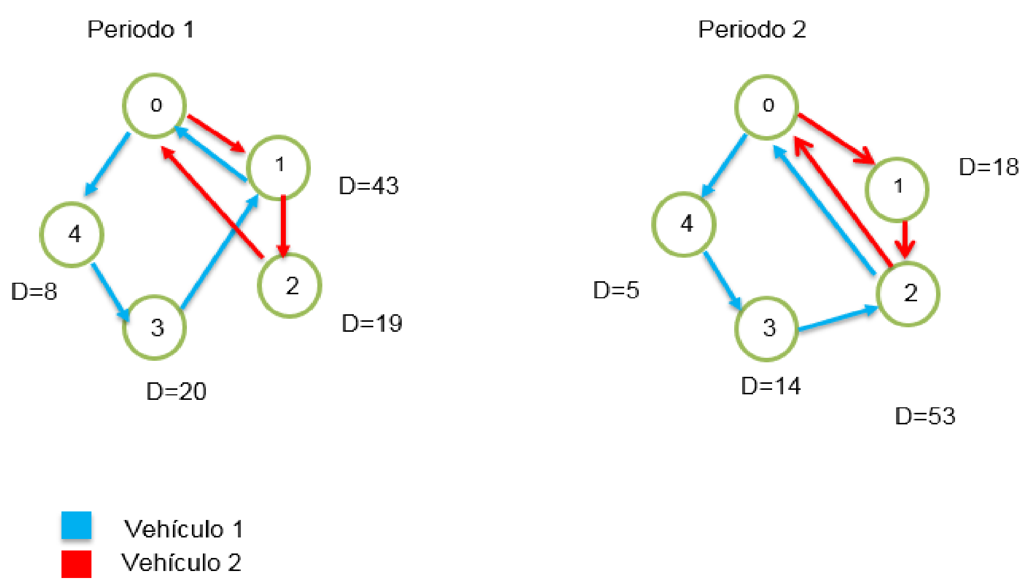
f.o	4138,5	
	Variable	Costos
P11	55	6
P21	71	8
P31	57	10
P12	0	4
P22	0	4
P32	0	7
L11	1	1000
L21	1	500
L31	1	800
L12	0	2000
L22	0	700
L32	0	600
Y0111	0	12
Y0211	0	24
Y0311	0	47
Y0411	1	31
Y1011	1	12
Y1211	0	20
Y1311	0	32
Y1411	0	45
Y2011	0	24
Y2111	0	20
Y2311	0	23
Y2411	0	54
Y3011	0	47
Y3111	1	32
Y3211	0	23
Y3411	0	17
Y4011	0	31
Y4111	0	45
Y4211	0	54
Y4311	1	17
Y0112	0	12
Y0212	0	24
Y0312	0	47
Y0412	1	31
Y1012	0	12
Y1212	0	20
Y1312	0	32
Y1412	0	45
Y2012	1	24
Y2112	0	20
Y2312	0	23
Y2412	0	54
Y3012	0	47
Y3112	0	32
Y3212	1	23
Y3412	0	17
Y4012	0	31
Y4112	0	45
Y4212	0	54
Y4312	1	17
Y0121	1	12
Y0221	0	24
Y0321	0	47
Y0421	0	31
Y1021	0	12
Y1221	1	20
Y1321	0	32
Y1421	0	45
Y2021	1	24
Y2121	0	20
Y2321	0	23
Y2421	0	54
Y3021	0	47
Y3121	0	32
Y3221	0	23
Y3421	0	17
Y4021	0	31
Y4121	0	45
Y4221	0	54
Y4321	0	17
Y0122	1	12
Y0222	0	24
Y0322	0	47
Y0422	0	31
Y1022	0	12
Y1222	1	20
Y1322	0	32
Y1422	0	45
Y2022	1	24
Y2122	0	20
Y2322	0	23
Y2422	0	54
Y3022	0	47
Y3122	0	32
Y3222	0	23
Y3422	0	17
Y4022	0	31
Y4122	0	45
Y4222	0	54
Y4322	0	17
I11	0	2
I21	0	3
I31	0	3,5
I12	20	1
I22	37	0,5
I32	33	1
X111	22	
X211	0	
X311	20	
X411	8	
X112	0	
X212	31	
X312	14	
X412	5	
X121	24	
X221	19	
X321	0	
X421	0	
X122	18	
X222	22	
X322	0	
X422	0	

Tabla 25: Solución De producción

	Producto	Demanda	Producción	Inventario
Periodo 1	1	35	55	0
	2	34	71	0
	3	24	57	0
Periodo 2	1	20	0	20
	2	37	0	27
	3	33	0	33

En las tablas 18,19, 20, 21, 22, y 23, contienen los parámetros de entrada del modelo del PSD, dentro de los que se encuentran las demandas, capacidades, costos y tiempos de producción, mientras que las tablas 26 y 27 denotan la solución al modelo, así como las figuras 10 y 11, en donde se observa el cumplimiento de cada una de las restricciones y la manera en que se debe producir, así como la forma en que distribuye los productos a los clientes. Para esta instancia, la producción se realiza toda en el primer periodo y se mantiene para los siguientes, la distribución se da por medio de dos vehículos que cubren rutas diferentes, pero siempre llevando la cantidad demandada, sin violar ningún criterio.

Figura 7: Solución ruteo periodo 1 y 2



Teniendo en cuenta lo presentado en las anteriores tablas y figuras, después de agregar dos restricciones de subtoures se llega a la solución óptima para el problema, comprobando con esto la veracidad del modelo formulado, puesto que se revisa que cada restricción sea cumplida y que la solución en cuanto a función objetivo sea la misma que si se suman los costos de CLSP y PVRP, de la misma instancia.

7. EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se presenta la experimentación de los problemas de CLSP, PVRP y PSD, por medio de métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos, por medio de software Excel/Simplex, Gams/Cplex y Matlab.

7.1. CLSP

Teniendo en cuenta la formulación del problema expuesta en el capítulo anterior, se plantea la experimentación de este modelo, por medio de métodos exactos y con la ayuda de dos software. En donde en se busca evaluar el comportamiento del problema, el tiempo de ejecución y la manera en que crece el problema.

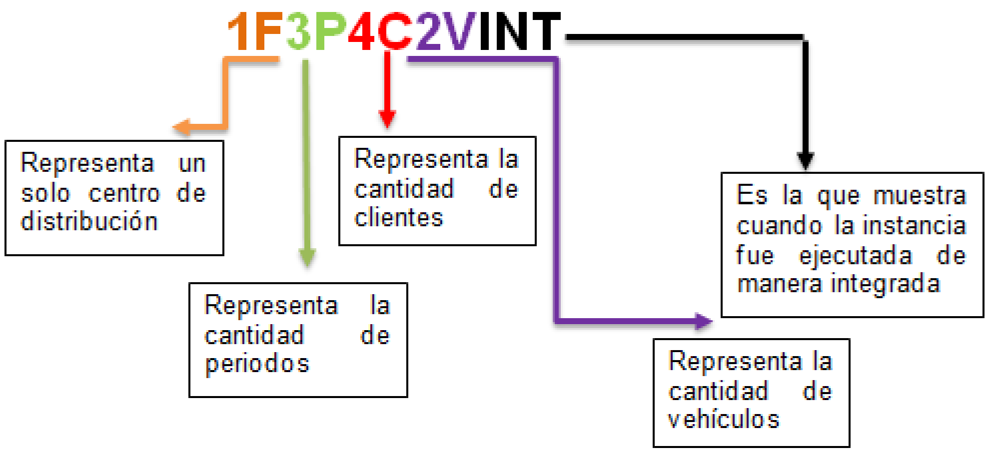
7.1.1. Método exacto: Gams/Cplex

El problema del CLSP se resolvió por medio de métodos exactos para cada una de las instancias propuestas. En seguida se presentarán el software por los que se corrieron y sus respectivas soluciones.

- **Gams/Cplex**

La ejecución del CLSP se lleva a cabo por el software Gams y el solucionado Cplex, lo que permite verificar y evaluar el modelo con sus diferentes instancias. Cabe aclarar que este método es exacto, por lo que los resultados que se obtenga serán los óptimos. Debido a que Cplex es un solucionador de GAMS que permite a los usuarios combinar las capacidades de modelado de alto nivel de GAMS. Los optimizadores Cplex están diseñados para resolver grandes problemas de forma rápida y con mínima intervención del usuario.

Las instancias usadas para el problema de CLSP en este software varía la cantidad de clientes de 4 a 10, los periodos de tiempo de 2 a 5 y los vehículos de 2 a 3, manteniendo siempre una fábrica. Estas instancias serán usadas para ejecución de los 4 problemas y son nombradas así:



A continuación se presentan una corrida del problema del CLSP para la instancia 1F3P4C, en donde se evidencia la forma en que se plantea producir y almacenar, con el fin de satisfacer la demanda de los clientes, pero sin violar ninguna de las restricciones.

Tabla 26: Solución 3 periodos 4 clientes

Instancia 1F3P4C				
Periodo	Producto	Producción	Inventario	Demanda total entregada
	1	90	0	35
	2	99	0	34
1	3	72	0	24
	1	0	55	20
	2	0	65	37
2	3	0	48	33
	1	0	35	35
	2	0	28	28
3	3	0	15	15
Valor Función Objetivo		4633		

La tabla 29, contiene la solución del Cplex para dicha instancia, se evidencia que lo mejor para este caso es producir todo en el primer periodo de tiempo y mantener para los demás periodos, puesto que es más económico abrir la plantan una sola vez por producto y almacenar, con una función objetivo de $4633; adicionalmente se comprueba que se cumplan cada uno de los parámetros planteados para este modelo. De la misma manera se realiza para cada instancia. A continuación se recopilan los datos de los tiempos de cómputo y la función de costos de las instancias corridas del problema en Gams/Cplex.

Tabla 27: Recopilación de Soluciones de la experimentación (CLSP)

INSTANCIAS	SOLUCION	TIEMPO (s)
1F3P4C2V	4633	0,06
1F4P4C2V	5804	0,08
1F5P4C2V	7143	0,09
1F3P5C2V	4904	0,05
1F4P5C2V	6249	0,1
1F5P5C2V	7892	0,11
1F3P6C2V	4904	0,01
1F4P6C2V	6256	0,03
1F5P6C2V	7389	0,05
1F3P7C2V	4745	0,09
1F4P7C2V	5820	0,09
1F5P7C2V	6703	0,12
1F3P8C3V	5162,8	0,05
1F4P8C3V	6278,1	0,05
1F5P8C3V	7506,8	0,03
1F3P9C3V	5498,5	0,01
1F4P9C3V	6733,9	0,06
1F5P9C3V	8664,1	0,08
1F3P10C3V	5946	0,03
1F4P10C3V	7257,7	0,09

1F5P10C3V	9032,9	0,08

En los problemas de la programación de la producción se realiza una experimentación para revisar el comportamiento, la manera en que crece el problema y el tiempo de cómputo. Observando en la tabla 30 que el CLSP es posible ejecutarse dentro de un tiempo cómputo razonable, puesto que este no es problema de tipo NP-Hard. Al verificar esto hace que se cambie el foco de la investigación, porque siempre se podrá encontrar la solución por método exacto, no se hace necesario el uso de heurísticas y metaheurísticas.

7.2. PVRP

De acuerdo al capítulo anterior, en donde se presenta la formulación del PVRP se plantea la experimentación del mismo en este apartado, con la finalidad de evaluar los costos de la función objetivo y los tiempos de ejecución. Inicialmente se usa el software Gams/Cplex, esperando el momento donde este programa no pueda seguir ejecutándose, debido a que tiene un límite de tiempo para encontrar la solución óptima, cuando sucede esto se procede a usar Matlab con las ayuda de métodos heurísticos y metaheurísticos.

7.2.1. Método exacto: Gams/Cplex

Este problema es de tipo NP-Hard, por tanto a medida que aumenta el número de nodos del problema, crece la complejidad de cálculo para encontrar la solución del modelo exponencialmente. Por tal motivo se crean unas instancias que van incrementando a medida que se ejecuta el modelo. Para correr el problema en Gams se usan las mismas instancias expuestas anteriormente, que va de 4 a 10 clientes, de 3 a 5 períodos de tiempo, de 2 a 3 vehículos y una fábrica. A continuación se muestra la instancia de 1F3P4C2V.

Tabla 28: Solución 3 periodos 4 clientes

Instancia 1F3P4C2V				
Periodo	**Ruta**	**Capacidad utilizada**	**Total productos entregados por ruta**	**Demanda total entregada**
1	0-1-0	92%	46	93
	0-4-3-2-0	94%	47	
2	0-1-2-0	100%	50	90
	0-4-3-2-0	70%	40	
3	0-1-2-0	86%	35	78
	0-1-3-4-0	80%	43	
Valor Función Objetivo		418		261

La tabla 31 presenta la solución del problema de ruteo, en donde se evidencia la satisfacción de la demanda y cumplimiento de las restricciones, con un costo de 418. De acuerdo a los parámetros ingresados este solver encuentra la solución óptima para cada específico. En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos para las instancias corridas.

Tabla 29: Recopilación de soluciones de la Experimentación (PVRP)

Instancia	Solución	Tiempo (s)
1F3P4C2V	418	0,28
1F4P4C2V	630	0,13
1F5P4C2V	789	0,19
1F3P5C2V	477	0,2
1F4P5C2V	635	0,04
1F5P5C2V	869	0,04
1F3P6C2V	509	0,24
1F4P6C2V	689	0,25
1F5P6C2V	798	0,11
1F3P7C2V	497	0,92
1F4P7C2V	690	1,71
1F5P7C2V	891	1,88
1F3P8C3V	619	1,7
1F4P8C3V	789	7,91
1F5P8C3V	964	12,44
1F3P9C3V	765	4,67
1F4P9C3V	1013	10,73
1F5P9C3V	1247	28,06
1F3P10C3V	910	11,38
1F4P10C3V	971	25,19
1F5P10C3V	1040	103,99

La Tabla 32 recopila los resultados de las 21 instancias, evidenciando que la función de costo se resuelve durante un tiempo de cómputo real, pero a medida que crecen los parámetros de ingreso al software hace que el programa se demore un poco más, hasta el momento donde no puede resolverlo; es importante resaltar que estos tiempos son los acumulados de ejecución hasta cuando no se generan subtoures, lo cual hace que sea un poco más demorada la programación. La experimentación demuestra que la última instancia corrida por Gams/Cplex es 1F5P10C3V, es decir, a partir de esta se utiliza otros métodos de solución, así como otro software.

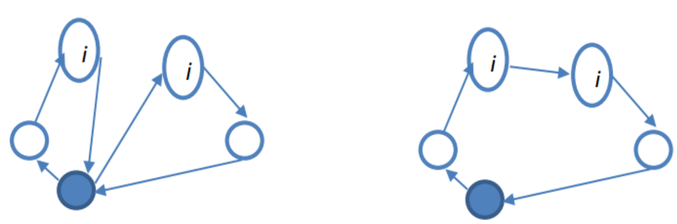
7.2.2 MATLAB

El problema de ruteo es usualmente estudiado, por esto se han desarrollado distintos métodos para resolverlo, dentro de ellos están las heurísticas y metaheurísticas, para el caso de estudio se utilizan 5 técnicas que permiten obtener una solución factible para el modelo (código en Matlab, véase Anexo B). Lo que se busca es comparar este resultado con el óptimo que arrojó Gams, para esto se escogieron 3 instancias que fueron ejecutadas por medio de los métodos exactos.

Las heurísticas que se usan son:

- **Algoritmo de Clarke & Wright**: La idea de la heurística de ahorro es ir combinando las rutas, en la medida que al pasar a ser una sola ruta, se producen ahorros. Si en una solución dos rutas diferentes (0,..., i, 0) y (0, j,..., 0) pueden ser combinadas formando una nueva ruta (0,..., i, j,..., 0)[78]. En la figura 16 se presenta la combinación de dos rutas para obtener un ahorro en el modelo.

Figura 8: Grafo técnica de Ahorros



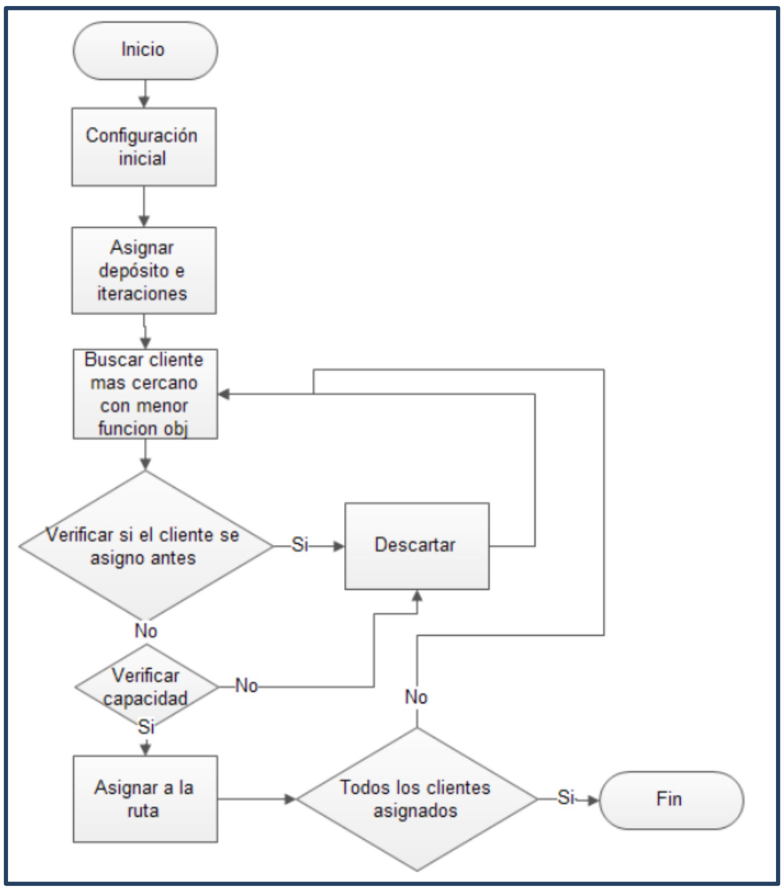
Fuente: Fredy, GUASMAYAN. Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, 2014.

---

[78]GUASMAYAN, Fredy. [En línea]. Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda. Disponible en: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/4562/1/5196G917.pdfhttp://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/4562/1/5196G917.pdf

- **<u>Algoritmo de Mole & Jameson:</u>** Es un método constructivo en el cual se crea una solución mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas, en el que solo se considera insertar clientes en la última ruta creada. El diagrama de flujo general se presenta a continuación en la figura 17, allí se observa la manera en que debe ser ejecutado este método para encontrar la solución.

Figura 9: Diagrama de flujo Algoritmo Mole & Jameson



Fuente: Fredy, GUASMAYAN. Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, 2014.

- **<u>Algoritmo de 2-Opt:</u>** Un movimiento 2-opt consiste en eliminar dos aristas y reconectar los dos caminos resultantes de una manera diferente para obtener un nuevo ciclo[79]. En la figura 18 se explica mejor dicho algoritmo por medio del pseudo código, adicionalmente facilita el proceso de la programación.

Figura 10: Pseudo código 2-Opt

```
Algoritmo 2-óptimo
Inicialización
   Considerar un ciclo Hamiltoniano inicial
   move=1

Mientras (move=1)
   move=0. Etiquetar todos los vértices como no explorados.
   Mientras( Queden vértices por explorar)
            Seleccionar un vértice i no explorado.
            Examinar todos los movimientos 2-opt que incluyan la arista de i a
            su sucesor en el ciclo. Si alguno de los movimientos examinados
           reduce la longitud del ciclo, realizar el mejor de todos y hacer
            move = 1.
           En otro caso etiquetar i como explorado.
```

Fuente: Fredy, GUASMAYAN. Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, 2014.

- **<u>Algoritmo 3-Opt:</u>** En un movimiento 3-opt, una vez eliminadas las tres aristas, existen ocho maneras de conectar los tres caminos resultantes para formar un ciclo. Las figuras siguientes ilustran algunos de los ocho casos.[80]

[79] Ibid. p., 26.
[80] Ibid. p., 18.

Figura 11: Pseudo código 3-Oopt

```
Algoritmo 3-óptimo restringido
Inicialización
    Considerar un ciclo Hamiltoniano inicial
    Para cada vértice i definir un conjunto de vértices N(i)
    move = 1
Mientras (move = 1)
    move=0
    Etiquetar todos los vértices como no explorados.
    Mientras( Queden vértices por explorar)
        Seleccionar un vértice i no explorado.
        Examinar todos los movimientos 3-opt que eliminen 3 aristas teniendo cada una, al
        menos un vértice en N(i).
        Si alguno de los movimientos examinados reduce la longitud del ciclo, realizar el
        mejor de todos y hacer move = 1.  En otro caso etiquetar i como explorado.
```

Fuente: Fredy, GUASMAYAN. Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, 2014.

En la figura 11 se muestra el pseudo código del algoritmo, en donde se especifica mejor la forma en que el método se ejecuta para lograr darle solución al problema de ruteo.

- **Búsqueda Tabú**: El algoritmo utiliza una estrategia basada en el uso de estructuras de memoria para escapar de los óptimos locales, en los que se puede caer, al "moverse" de una solución a otra por el espacio de soluciones factibles[81]. La programación de este algoritmo tiene como criterios de parada una memoria a corto plazo de 3 y 1000 iteraciones de límite.

A continuación en a tabla 30 se presentan las 3 instancias que ejecutadas mediante el solver Cplex obtuvieron el mayor tiempo de cómputo. Se escogieron

[81] MARTI, Rafeal. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. Universidad de Valencia. Matemátiques, 2003, vol. 1, no 1, p., 3-62.

dichas instancias con el objetivo de minimizar el tiempo de ejecución y analizar que tanto se acercan respecto a la solución óptima (Para la visualización de cómo se realizó la corrida de cada una de las instancias en el programa creado en Matlab, véase ANEXO C).

Tabla 30: Primeras instancias Matlab

INSTANCIA	Clarke &Wright		Mole & Jameson		2Opt		3Opt		Búsqueda Tabú	
	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P8C3V	1325	0,05	1142	0,018	1116	0,03	1431	0,1	1123	0,86
1F5P9C3V	1637	0,08	1424	0,03	1374	0,03	1469	0,016	1401	0,82
1F5P10C3V	1335	0,05	1506	0,08	1195	0,03	1402	0,08	1295	1,14

Para un análisis más profundo del problema del PVRP, se corre el problema del CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem), con el objetivo de comparar los tiempos de cómputo y la función objetivo. Para esto se ejecuta el problema del PVRP n-veces, tomando los tiempos y lo costos, puesto que al final se suman y se totalizan estos dos valores, de esta manera poder comparar dichos modelos. Enseguida se muestran los resultados obtenidos al realizar esta prueba.

Las instancias fueron creadas por las autoras, estas varían de 15 a 30 clientes y de 4 a 7 vehículos, manteniendo constante 1 fábrica y 5 períodos de tiempo.

Los resultados obtenidos para el problema del PVRP se presentan en la tabla 31.

Tabla 31: Resultados PVRP en Matlab

INSTANCIA	Clarke & Wright		Mole & Jameson		2Opt		3Opt		Búsqueda Tabú	
	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C4V	1825	0,08	1548	0,58	1520	0,05	1910	0,2	1795	2,89
1F5P20C4V	2530	0,2	1788	0,17	1544	0,19	2101	0,51	2009	2,18
1F5P30C7V	4095	0,19	2840	0,86	2457	0,71	3244	0,84	3400	4,45

La anterior tabla se presenta los resultados del problema PVRP resuelto por cada uno de los 5 algoritmos, así como los tiempos de cómputo. Para realizar esta experimentación se deben crear unos documentos previos en donde están los datos de entrada como los costos y demandas. Se evidencia que la heurística de 2-Opt arroja la mejor solución en cuanto a los dos criterios que se evalúan, debido a que ella busca mejorar la solución con la inicial que para el caso debe ser la obtenida por el algoritmo de ahorros o inserción.

En la tabla 32 se presentan los resultados de las instancias corridas para el problema de CVRP.

Tabla 32: Resultados CVRP en Matlab

	Clarke & Wright										TOTAL	
INSTANCIA	1		2		3		4		5			
	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C3V	365	0,06	365	0,08	359	0,62	365	0,36	365	0,06	1819	1,18
1F5P20C3V	365	0,005	336	0,29	332	0,24	321	0,3	362	0,13	1716	0,965
1F5P30C5V	816	0,03	819	0,04	819	0,03	820	0,04	812	0,05	4086	0,19
	Mole & Jameson										TOTAL	
INSTANCIA	1		2		3		4		5			
	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C3V	**358**	0,02	308	0,02	268	0,03	299	0,02	315	0,02	1548	0,11
1F5P20C3V	320	0,16	348	0,03	350	0,05	405	0,04	365	0,04	1788	0,32
1F5P30C5V	616	0,22	590	0,14	711	0,14	590	0,13	657	0,12	3164	0,75
	2-Opt										TOTAL	
INSTANCIA	1		2		3		4		5			
	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C3V	**310**	0,03	277	0,02	303	0,03	335	0,02	275	0,03	1500	0,13
1F5P20C3V	278	0,18	287	0,04	340	0,04	333	0,04	306	0,04	1544	0,34
1F5P30C5V	510	0,19	501	0,13	587	0,22	509	0,13	600	0,13	2707	0,8
	3-Opt										TOTAL	
INSTANCIA	1		2		3		4		5			
	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C3V	**358**	0,03	365	0,02	324	0,06	355	0,03	317	0,02	1719	0,16
1F5P20C3V	389	0,05	432	0,06	402	0,04	465	0,05	413	0,04	2101	0,24
1F5P30C5V	742	0,5	677	0,14	798	0,13	714	0,16	778	0,16	3709	1,09
	Búsqueda Tabú										TOTAL	
INSTANCIA	1		2		3		4		5			
	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C3V	**336**	0,35	412	0,39	353	0,35	382	0,4	311	0,38	1794	1,87
1F5P20C3V	323	0,3	401	0,5	399	0,5	506	0,76	380	0,46	2009	2,52
1F5P30C5V	688	0,8	783	0,66	784	0,67	646	0,19	658	0,17	3559	2,49

Puesto que el problema de CVRP solo está definido para un periodo de tiempo lo que se realizó para poder compararlo con PVRP, fue correrlo 5 veces y totalizar al final de la quinta ejecución, como se muestra en la tabla anterior. Analizando la tabla 35 se observa que el mejor algoritmo es el 2-Opt, pero a diferencia del PVRP el tiempo de cómputo para este problema es mayor, puesto que se debe cargar el archivo y esperar la solución, esto demora el proceso. Por esta razón y teniendo en cuenta que se quiere responder ante los proceso de manera rápida, será mejor usar el PVRP, debido a que se ingresan los datos una sola vez con todos los periodos y corre todo el modelo una vez.

7.3. PSD

Para realizar la experimentación del problema de programación de la planeación y distribución integrado se tiene en cuenta lo planteado en el capítulo de construcción del modelo, ya que es la base para la formulación de la experimentación. En base al concepto de que el CLSP no es un problema de tipo NP-Hard, el modelo integrado solo se estudia por métodos exactos, es decir, se usa el Gams/Cplex.

Las instancias son la misma del problema del CLSP, las cuales arrojaron las siguientes funciones objetivos con su respectivo tiempo de ejecución representado en la tabla.

Tabla 33: Recopilación de Soluciones de experimentación PSD

Instancia	Solución	Tiempo (S)
1F3P4C2VIN	5051	0,34
1F4P4C2VIN	6434	0,21
1F5P4C2VIN	7932	0,28
1F3P5C2VIN	5381	0,25
1F4P5C2VIN	6884	0,14
1F5P5C2VIN	8761	0,15
1F3P6C2VIN	5413	0,25
1F4P6C2VIN	6945	0,28
1F5P6C2VIN	8187	0,16
1F3P7C2VIN	5242	1,01
1F4P7C2VIN	6510	1,8
1F5P7C2VIN	7594	2
1F3P8C3VIN	5781,8	1,75
1F4P8C3VIN	7067,1	7,96
1F5P8C3VIN	8470,8	12,47
1F3P9C3VIN	6263,5	4,68
1F4P9C3VIN	7746,9	10,79
1F5P9C3VIN	9911,1	28,14
1F3P10C3VIN	6856	11,41
1F4P10C3VIN	8228,7	25,28
1F5P10C3VIN	10072,9	104,07

La tabla 33 evidencia los resultados obtenidos durante la ejecución de las 21 instancias con un tiempo de cómputo razonables. Adicionalmente, se percibe que a medida que crece la instancia el software demora un poco más en dar solución, y como se trata de la integración de dos modelos, el software no podrá solucionar en un determinado caso, pero para el modelo que se creó no se puede observar esto con claridad, puesto que ninguno de los dos problemas están relacionados entre sí, es por ello que lo mejor es trabajarlos de manera individual, ya que se le puede dar modelar con mayor facilidad a cualquier situación.

8. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Realizando una comparación de los resultados obtenidos con los métodos exactos, las heurísticas y metaheurísticas estas son las soluciones arrojadas y sus diferencias porcentuales.

Tabla 34: Comparación instancias Gams vs Matlab (Heurísticas)

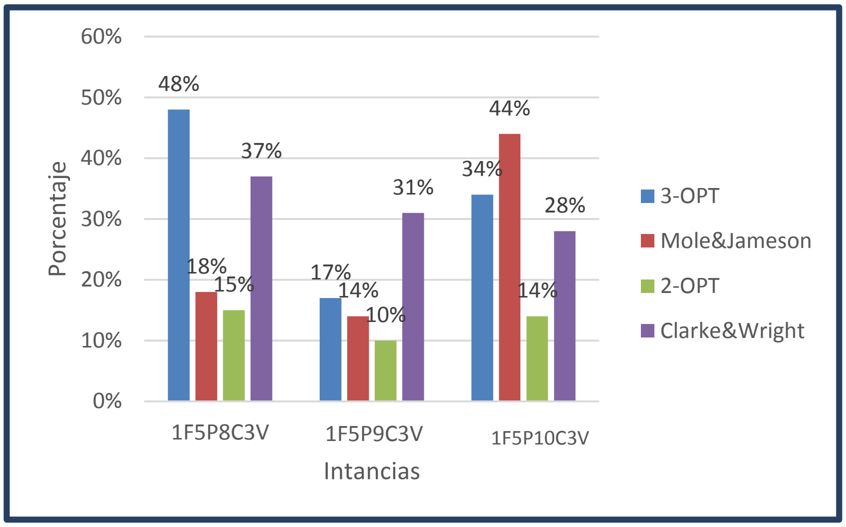
INSTANCIA	Mejor Solución		Clarke & Wright			Mole & Jameson		
	F.O	t (s)	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo
1F5P8C3V	964	12,44	1325	0,05	37%	1142	0,018	18%
1F5P9C3V	1247	28,06	1637	0,08	31%	1424	0,03	14%
1F5P10C3V	1040	103,99	1335	0,05	28%	1506	0,08	44%
INSTANCIA	Mejor Solución		2-OPT			3-OPT		
	F.O	t (s)	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo
1F5P8C3V	964	12,44	1116	0,03	15%	1431	0,1	48%
1F5P9C3V	1247	28,06	1374	0,03	10%	1469	0,016	17%
1F5P10C3V	1040	103,99	1195	0,03	14%	1402	0,08	34%

Tabla 35: Comparación instancias Gams vs Matlab (Metaheurística)

INSTANCIA	Mejor Solución		Búsqueda Tabú		
	F.O	t (s)	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo
1F5P8C3V	964	12,44	1123	0,86	16%
1F5P9C3V	1247	28,06	1401	0,82	12%
1F5P10C3V	1040	103,99	1295	1,14	24%

En las tablas 34 y 35 se presenta el resumen de los resultados de las instancias que se probaron por diferentes métodos de optimización, se puede observar que en términos generales el modelo muestra soluciones buenas con relación la solución óptima.

Figura 12: Gap computacional con relación a la mejor solución



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la anterior gráfica con respecto a la función objetivo, se percibe que en cada una de las instancias cada algoritmo tiene un intervalo de porcentajes bástate variable con respecto a la mejor solución. El Gap del método de Clarke & Wright tiene un intervalo de 28% a 37% de variación, El método de Mole a Jameson y 3-OPT tienen un intervalo bastante amplio que son del 18% a 44% y 17% a 48% respectivamente lo cual lleva pensar que su diferencia con la mejor solución es bastante amplia y para estos casos no sería recomendable utilizarlo.

El método que resalta debido a que arroja el costo más cercano al óptimo es la heurística de 2-Opt, esto se debe a que esta heurística parte de una solución ya encontrada y busca mejorar esa solución, revisando la diferencia con el resultado de Gams lo que evidencia ya que es menor al 15%.

A continuación se presentan las gráficas de las rutas que genera la heurística que de la mejor solución factible, respecto a todos los algoritmos:

Figura 13: Ruta 10 clientes Primer periodo- 2OPT

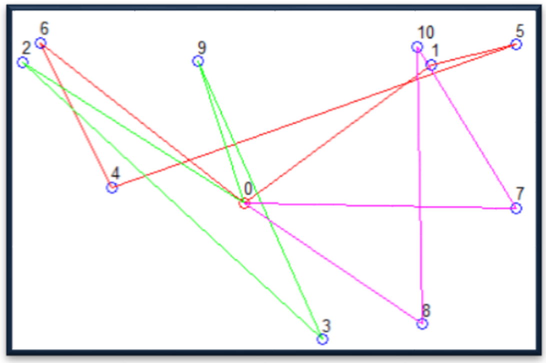


Figura 14: Ruta 10 clientes Segundo periodo- 2OPT

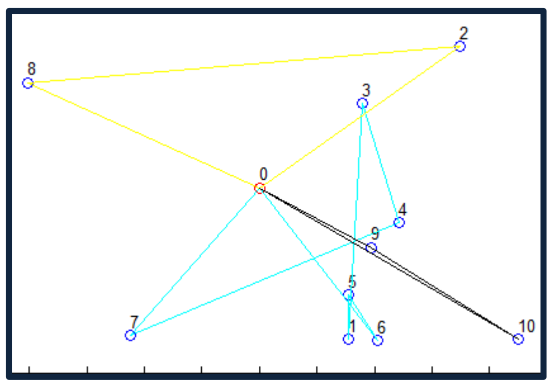


Figura 15: Ruta 10 clientes Tercer periodo- 2OPT

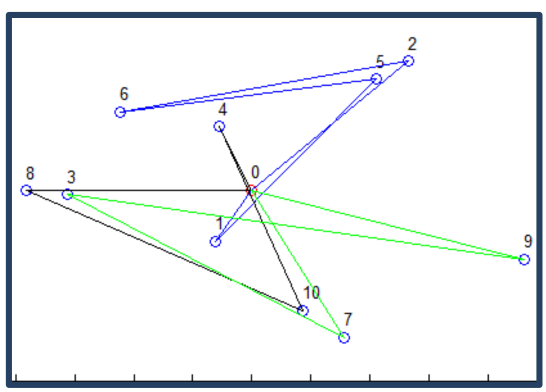


Figura 16: Ruta 10 clientes Cuarto periodo- 2OPT

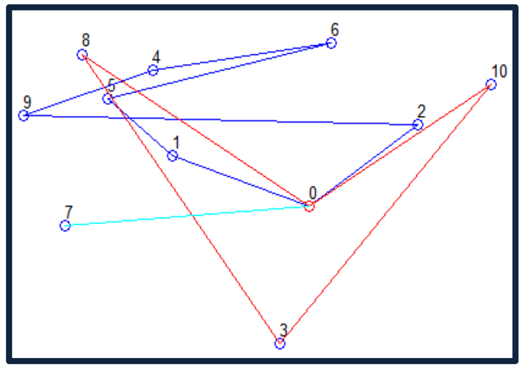
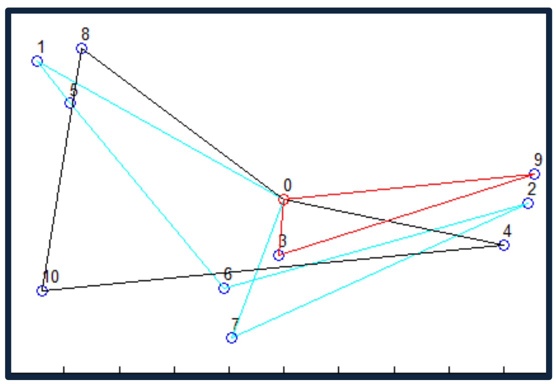


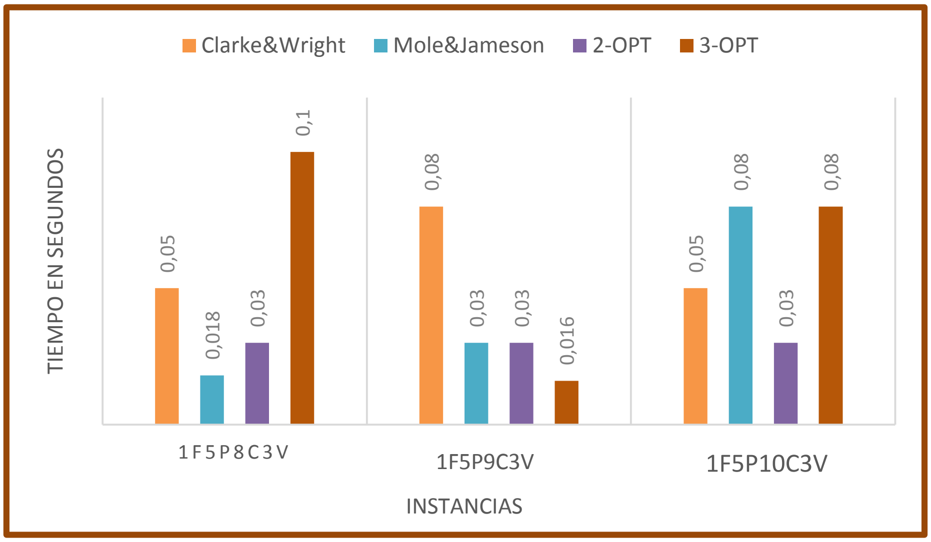
Figura 17: Ruta 10 clientes Quinto periodo- 2OPT



En las figuras 13,14, 15, 16 y 17, se observa que las rutas que se obtienen al programar la instancia por la heurística 2-OPT cumplen con cada uno de parámetros y características del modelo de PVRP mencionadas en el capítulo de formulación, lo que conlleva analizar que esta sería la mejor solución factible luego de la óptima sin violar ninguna medida estipulada.

La siguiente figura a mostrar nos muestra los variantes en tiempos de corrida.

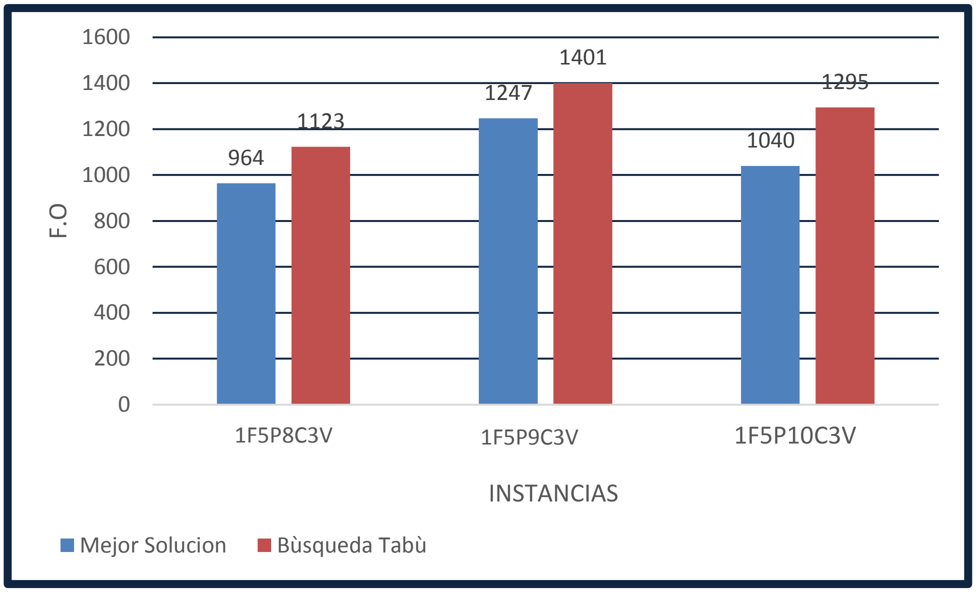
Figura 18: Tiempo de ejecución para cada instancia



En la figura anterior, se muestran que los tiempos de ejecución de las heurísticas son tiempos computacionales aceptables y eficientes comparados con los tiempos del modelo exacto, puesto que en cuestión de rapidez tiene una eficiencia mayor del 90% para encontrar la una solución factible. Algunos métodos muestran que tienen una variabilidad extraña como lo son la heurística de Clarke & Wright, que tiene tiempos de 0.05 segundos para 8 clientes, 0.08 segundos para 9 clientes y vuelve a disminuir para 10 clientes a 0.05 segundos y 3-OPT que genera 0.1 segundos para 8 clientes, 0.0016 segundos para 9 y vuelve aumentar para 10 clientes a 0.08 segundos, lo que hace notar que no se puede decir que el tiempo de ejecución aumente con proporción a que aumente las cantidades de clientes en las instancias, caso contrario con los resultados de la heurística de Mole & Jameson que tiene una variabilidad más acorde ya que para 8 clientes obtuvo un tiempo de ejecución de 0.018 segundos, para 9 clientes 0.03 segundos y para 10 clientes 0.08 segundos, lo que conlleva a pensar que este método sí puede aumentar su tiempo de solución de acuerdo a la cantidad de clientes que sean agregados y corridos por las instancias.

También se evidencia que el que mantiene un tiempo constante en cada una de las instancias es la heurística 2-OPT, lo cual refleja que a pesar que la instancia crezca el tiempo de ejecución va ser el mismo o con poca variación con lo que se logra obtener una solución muy rápida.

Figura 19: Comparación entre mejor Solución y Búsqueda Tabú



En la figura 19 se relaciona la función objetivo con respecto a la metaheurística Búsqueda Tabú.

Se observa que la solución óptima en relación con la metaheurística también obtienen buenas soluciones factibles, teniendo como intervalo de variación con el óptimo del 12% al 24%, lo que hace que sean bastantes cercanas a la mejor solución en cuanto a tiempos de ejecución mínimos, esto quiere decir que es un poco más efectivo a la hora buscar una solución rápida y que cumpla las medidas establecidas.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de las instancias ejecutadas para todos los algoritmos de los problemas de PVRP y CVRP que no son ejecutados por métodos exactos.

Tabla 36: Comparaciones del PVRP y CVRP en Matlab

	Clarke & Wright				Mole & Jameson				2-Opt			
INSTANCIA	PVRP		CVRP		PVRP		CVRP		PVRP		CVRP	
	F.O	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C3V	1825	0,08	1819	25,18	1548	0,58	1548	23,11	1520	0,05	8260	22.3
1F5P20C3V	2530	0,2	1716	20,96	1788	0,17	1788	27,32	1544	0,19	9366	21,845
1F5P30C5V	4095	0,19	4086	20,19	2840	0,86	3164	31,75	2457	0,71	16642	26,7

3-Opt				Búsqueda Tabú			
PVRP		CVRP		PVRP		CVRP	
F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1910	21,2	14786	100,4	1795	22,89	28271	61.9
2101	25,51	16587	98,89	2009	23,18	31607	69,6
3244	30,84	28347	108,6	3400	24,45	54090	79,78

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 36, se puede afirmar que CVRP arroja una función objetivo menor en algunos casos, puesto que se corre únicamente para un periodo y su búsqueda del óptimo local es más reducida, pero su diferentica con la función objetivo del PVRP es mínima, a diferencia del tiempo de cómputo que sí aumenta, debido a que por correr cada periodo de manera individual el tiempo acumulado es mucho mayor en comparación el PVRP, por ende se puede decir que la mejor manera de evaluar en problema de ruteo es por PVRP, ya que es más eficiente con respecto a tiempo para una solución rápida y factible.

9. CONCLUSIONES

- El presente trabajo se elaboró con el fin de realizar una comparación del problema de producción y distribución por separado y de manera integrada, realizando una exhaustiva revisión bibliográfica relacionada con los modelos de optimización aplicados, asociados en la base de datos de la Universidad industrial del Santander, teniendo como referencia una ventana de tiempo de 1994 hasta el 2014. La información encontrada se ha organizado de acuerdo al año que cada problema ha sido abordado específicamente teniendo en cuenta los métodos de optimización ya que no so ha sido ejecutado de una manera en general y es lo que se busca plantear.

- En la fase de construcción de los modelos se tuvo en cuenta la revisión de la literatura, para la formulación de los problemas de CLSP y PVRP, mientras que para el problema de PSD se realizó basado en los dos problemas anteriores, debido a que las investigaciones encontradas trabajan este problema de manera específica, y lo que se buscaba era una formulación general, la cual se adapte a cualquier situación. Con el fin de verificar los modelos se corrieron en Solver de Excel y se comprobó el cumplimiento de cada una de las restricciones.

- Dadas las particularidades del problema y el objetivo de la investigación que no es comparar con la literatura, sino realizar un aprendizaje de los modelos y técnicas, las instancias fueron creadas por las autoras.

- Se pudo observar que cuando se realiza las comparaciones de los resultados generados por métodos exactos y métodos heurísticos, no son recomendadas evaluar o tener en cuenta las heurísticas Mole a Jameson y 3-OPT ya que estas tienen un intervalo bastante amplio que son del 18% a 44% y 17% a 48%

respectivamente, con respecto a la mejor solución de los parámetros evaluados en este trabajo de investigación.

- Con respecto a los tiempos de solución que arrojaron las heurísticas evaluadas, se puede indicar que son muy eficientes con respecto a la rapidez de encontrar una solución factible que cumpla los parámetros establecidos.

- Se vio reflejado que en los métodos heurísticos Clarke & Wright y 3-OPT no tienen ningún relación directa tiempo con cantidad de clientes, ya que independientemente que la instancia variara el número de clientes el tiempo de solución no tenía un patrón de aumento o disminución sino soluciones bastante variables, mientras que la heurística de Mole & Jameson al aumentar el número de clientes a evaluar en la instancia dejando los otros parámetros constantes aumentaba el tiempo de solución, lo que llevo a concluir que en este método si existe una relación directa entre Clientes y tiempo de solución.

- Al correr cada uno de los algoritmos en Matlab para el problema del PVRP, se observó que la mejor solución y el menor tiempo de cómputo lo arrojaba la heurística 2-Opt, ya que su variación con la instancias trabajadas en esta investigación con respecto a mejor solución fue un intervalo de 12% al 15%, lo que hace que se bastante cercano, esto se debe a que es un método es de mejora, por tanto toma una solución inicialmente obtenida y busca obtener un mucho menor que la primera, intercambiando la conexión de dos aristas.

- La experimentación evidenció la razón por la cual los problemas de producción y distribución son trabajados de manera separada, puesto que el PVRP es un NP-Hard, mientras que el CLSP no. Es por esto que se hace más interesante tratar el problema de ruteo de manera individual. Por tal motivo se decide estudiar el este problema junto con el CVRP en el software de Matlab.

- Inicialmente se planteó utilizar 2 heurísticas y una metaheurística para resolverse en Matlab, pero con el objetivo de profundizar un poco más se ejecutaron 4 heurísticas y una metaheurística para los problemas de PVRP y CVRP, lo que se observó es que en cuanto menor función objetivo el problema de CVRP arrojaba en algunos caso un solución mejor; mientras que para los tiempos de cómputo el PVRP genera menor tiempo de ejecución, ya que solo se corre una vez.

- Las diferencias con respecto a los tiempos de ejecución entre el PVRP Y CVRP son baste grades ya que el PVRP evidencia una eficiencia promedio en tiempos de ejecución en comparación al CVRP con respecto a los métodos heurísticos de Clarke & Wright de 176%, Mole & Jameson de 79% , 2-OPT de 200% y 3-OPT de 267%, lo que evidencia que el primero es mejor en cuanto tiempo de computo, puesto que solo se debe correr una vez para obtener la solución del problema, mientras que el CVRP se debe ejecutar tantas veces como periodos posea, por lo que se hace más demorada la corrida del mismo.

- No es posible establecer una diferencia en cuanto a función objetivo entre los modelos de CVRP y PVRP, debido a que los métodos por los cuales se solucionaron no son exactos y las soluciones que da depende en la mayoría de los casos de soluciones iniciales aleatorias, o en otros el área de factible solución que encuentren, es decir, no es confiable contrastar estos valores.

- Teniendo en cuenta que las instancias ejecutadas en el software Matlab se resolvieron por 5 métodos diferentes, a la hora de generar las comparaciones de los modelos CVRP y PVRP no se realizó una brecha entre los dos problemas, debido a que se usaron varios algoritmos para solucionarlos.

- En el trabajo se presentaron diferentes tipos de dificultades, en la verificación de los problemas debido a que la cantidad de variables y restricciones superaba el límite admitido, por esto se debió utilizar el Solver Premium de Excel; en la fase de experimentación se presentaron problemas, puesto que las instancias eran demasiado grandes y se debió acudir al uso de la licencia del Gams, para esto se disponía de un único computador en la sala de computo del OPALO en la UIS y el horario de uso que este tenía.

- Con esta investigación se busca dejar puntos de partida para investigaciones posteriores en el grupo de investigación, con la que se pueda revisar otras características determinadas de los problemas, ampliando su fase de experimentación, para poder establecer comparaciones entre ellos.

BIBLIOGRAFÍA

ANGELELLI, E., y SPERANZA, M. The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. En: European Journal of Operational Research, 2002, vol. 137, no 2, p. 233-247

BARRIOS, Mónica. Aplicación de la metaheurística búsqueda tabú al problema de la ruta más corta para una empresa distribuidora de harina de trigo. Tesis de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Industrial, Escuela de Ingeniería industrial, 2009.

BILGEN, B. y CELEBI, Y. Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modelling. En: Annals of Operations Research, 2013, vol. 211, no 1, p. 55-82.

BREDSTRÖM, D. y RÖNNQVIST, M. Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry. En: System Sciences, 2002.

CACCHIANI, Valentina; HEMMELMAYR, V. C.; TRICOIRE, Fabien. A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem. En: Discrete Applied Mathematics, 2014, vol. 163, p. 53-64.

CHANDRA, P y FISHER, M. Coordination of production and distribution planning. En: Decision Craft Analytics. 1994.

CHANDRA, P. Coordination of production and distribution planning. En: Decision craf. 1994.

CHEN, J. y CHEN, L. Production planning and control. En: The management of operations. Volumen 17, Issue. 2006.

CHEN, Z. Integrated production and outbound distribution scheduling: review and extensions. Operations Research.

CHEN, Z. y VAIRAKTARAKIS, G. Integrated scheduling of production and distribution operations. En: Management Science, 2005.

CHEN, Z. y SMITH R. Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling University of Maryland College, 2006.

CHIAVENATO. Administración de la producción. Edición 1. Mac Graw Hill. 1994.

COENE, S.; ARNOUT, A., y SPIEKSMA, F. The periodic vehicle routing problem: a case study. 2008.

CONTRERAS, C. y DIAZ, M. Métodos heurísticos para la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad (CVRP). Tesis de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

CORREA. Alexander. COGOLLO. Juan. SALAZAR Juan Rev. P+L. vol.6 no.1 Caldas Jan./June 2011.

DAZA, J. MONTOYA, J. y NARDUCI, F. Resolución del problema de enrutamiento de dos fases de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico. En: Revista EIA, No 12, p. 23-38. Diciembre, 2009

DOLL, M. y ARMAS, D. Programación de la secuencia de producción mediante algoritmos genéticos. Universidad, ciencia y tecnología, 2009, vol. 12 n. 49.

DRUMMOND, L. OCHI, L. y VIANNA, D. An asynchronous parallel metaheuristic for the period vehicle routing problem. En: Future generation computer systems, 2001, vol. 17, no 4, p. 379-386.

DUARTE, A. PANTRIAGO, J. y GALLEGO, M. Introducción a la optimización. Metaheurísticas. Madrid: Dykinson, 2008, p., 1-14.

FEI, M. MENGA-NA, W. BAO-FENG, S. y HUA, Y. The coordination of production and distribution scheduling in mass customization. En: In Management Science and Engineering.

FERNANDEZ, A., VELARDE, J. Optimización heurística y redes neuronales. Madrid. Paraninfo SA. 1996.

GLOVER, F y LAGUNA, M. Tabú search. [En línea]. Disponible en: http://leeds-faculty.colorado.edu/laguna/articles/ts2.pdf. Recuperado el 10 de Marzo de 2009.

HERNANDEZ, F. GENDREAU, M., y POTVIN, J. Heuristics for Time Slot Management: A Periodic Vehicle Routing Problem View. 2014.

KARIMI, B. FATEMI, S. y WILSON, J. The capacited lot sizing problem: a review of models and algorthms. En: Science Direct, 2003.

KOHLER Jacqueline. Introducción a la investigación de operaciones. Tesis de maestría. Universidad Santiago de Chile. 2010

MARTI, R. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia. Pg 27-29

MICHALLET, J. PRINS, C. AMODEO, L. YALAOUI, F. y VITRY G. Multi-start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. En: Computers & operations research, 2014, vol. 41, p. 196-207.

MIRABI, M. A hybrid electromagnetism algorithm for multi-depot periodic vehicle routing problem. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, vol. 71, no 1-4, p. 509-518.

MOLE, R.H. y JAMESON, S.R. A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion. En: Operational Research Quarterly , 1976, vol. 27, p., 503–511.

MORALES, O. Modelo de ruteo de vehículos. Universidad EAN, posgrados. Bogotá, 2012.

NASO, D. SURICO, M. y TURCHIANO, B. Scheduling Production and distribution of rapidly perishable materials with hybrid GA's. En: Evolutionary Scheduling. 2007.

NISHI, T. KONISHI, M. y HACE, M. A distributed decision making system for integrated optimization of production scheduling and distribution for aluminum production line. En: Computers & chemical engineering, 2007, vol. 31, p. 1205.

OSMAN, I. y KELLY, J. Meta-heuristics: Theory and applications. Boston, USA. Edición, Klwer Academic. 1996.

RAMOS, Silvia. Modelos y Optimización I Heurísticas y Problemas Combinatorios. Octubre de 1995.

RESTREPO, P. RODRIGUEZ, K. y POSADA, J. Aproximación metodológica a la planificación y a la programación de las salas de cirugía: una revisión de la literatura, 2013.

SAFAEI, A. S. MOATTAR, S. Z.-FARAHANI, R. JOLAI, F. y GHODSYPOUR, S. Integrated multi-site production-distribution planning in supply chain by hybrid modelling. En: International Journal of Production Research, 2010.

SANCHEZ, F. Metodos Exactos y Heuristiscos para resolver el problema de agente viajero y el problema de ruteo de vehiculos. Escuela Superior Politecnica de litoral, Ecuador, 2007.

SHU, Li. CHENG, K. ZHANG, X. y ZHOU, J. Periodic Sweep Coverage Scheme Based on Periodic Vehicle Routing Problem. En: Journal of Networks, 2014, vol. 9, no 3, p., 726-732.

TAN, C. y BEASLEY, J. A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem. En: Omega, 1984, vol. 12, no 5, p., 497-504.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Dirección nacional de innovación académica. Fundamentos de administración. Sede Bogotá.

VIANNA, D. OCHI, L. y DRUMMOND, L. A parallel hybrid evolutionary metaheuristic for the period vehicle routing problem. En: Parallel and Distributed Processing. Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 183-191.

VIDAL, C. y GOETSCHALCKX, M. Invited review strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. En: European Journal of Operational Research. 1997.

VIERGUTZ, C. y KNUST, S. Integrated production and distribution scheduling with lifespan constraints. En: Annals of Operations Research, 2014.

WILLIAM, J. A Hybrid Algorithm for Simultaneous Scheduling of Production and Distribution in Multi-Echelon Structures. En: Management Scienc, 1983, vol. 29.

WILLIAMS, Jack F. Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: Theory and empirical comparisons. En: Management Science, 1981, vol. 27

YUAN, X., LOW, J. y MENG, W. A network prototype for integrated production-distribution planning with non-multi-functional plants. En: International Journal of Production Research.

ANEXOS

ANEXO A. REVISIÓN DE LA LITERATURA DEL PSD.

Jack Williams[82], en su publicación "Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: theory and empirical comparisons", de 1981 discute siete algoritmos heurísticos. Cada uno puede ser utilizado para la programación de la producción en una red de montaje, y la distribución en una red de arborescencia; y la integración de estas dos operaciones en una red de montaje arborescencia.

El objetivo de cada algoritmo es determinar un programa de producción y/o distribución de productos que satisfaga la demanda de producto final y minimice la suma de los costos de inventario y cargos fijos. Los siete métodos heurísticos se comparan entre sí, con un algoritmo de programación dinámica. Los resultados indicaron que para la red de estructuras la mejor heurística es el método de descenso más agudo, seguida de una extensión de un método originalmente desarrollado por Crowston, Wagner, y Henshaw.

Posteriormente Jack William[83] en su artículo "A Hybrid Algorithm for Simultaneous Scheduling of Production and Distribution in Multi-Echelon Structures" de 1983, aplicó un algoritmo hibrido para solucionar el mismo problema presentado en el documento "Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: Theory and empirical comparisons" con el fin de resolver la programación dinámica y distribución de tamaños de lotes, cuyo objetivo es minimizar los costos totales del sistema con un horizonte infinito.

[82] WILLIAMS, Jack. Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: Theory and empirical comparisons. Management Science, 1981, vol. 27
[83] WILLIAM, Jack. A Hybrid Algorithm for Simultaneous Scheduling of Production and Distribution in Multi-Echelon Structures. Management Scienc, 1983, vol. 29.

Luego el problema de programación de la producción y distribución es abordado de forma integrada por Pankaj Chandra y Marshall Fisher[84] en 1994, en donde se maneja similar a una cadena de suministro.
Este artículo tiene como escenario particular una planta que produce una serie de artículos en un tiempo determinado, y se maneja un inventario de bienes de productos terminados. Los productos son distribuidos por una flota de camiones a unos puntos de ventas. La demanda de los productos en cada punto de venta y periodo es conocida; su desarrolló se dio por medio del método exacto de programación lineal entera mixta (PLEM). De igual forma se realizó el problema de manera unificada y por separado con la finalidad de comparar cual era mejor.

Después, Carlos Vidal y Marc Goetschalckx[85] realizaron un estudio exhaustivo a la literatura existente hasta ese entonces sobre el tema de modelos estratégicos de producción y distribución, esta investigación se dividió en 4 ramas fundamentales que fueron: revisiones anteriores, modelos de optimización, problemas adicionales para el modelado y estudios de casos y aplicaciones. En la primera fase, se analizaron investigaciones ya realizadas, donde el tema central era la producción y distribución. En la fase dos, se subdividió en dos partes: Modelos MIP y Otros enfoques de optimización. En la tercera fase se trata la cadena de suministro, y la forma en que otros autores han abordado el mismo tema. En la última fase hacen énfasis en los modelos estratégicos de producción y distribución aplicados a la logística. En cada etapa se identificaron las principales características de los problemas, formulaciones, métodos de solución y experiencias computacionales, con la finalidad de tener una visión más amplia sobre el tema tratado y reconocer las posibles oportunidades de investigación. Adicionalmente el artículo da claridad del manejo de la producción y distribución a lo largo del mundo.

---

[84] CHANDRA, Panjak. Coordination of production and distribution planing. Decision craf analytics. 1994.
[85] VIDAL, Carlos. y GOETSCHALCKX, Mark. Invited review strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. European journal of operational research, 1997.

La revisión de la literatura se realizó en diferentes bases de datos UIS[86] utilizando las palabras claves, con las cuales se encontraron investigaciones sobre la planeación de la producción y distribución en la última década, en donde se destacan algunos autores:

- David Bredström y Mikael Rönnqvist[87] tratan el problema de la planificación de la producción y la programación de ruteo en la industria de celulosa en la planta de Suecia. En este documento mencionan el problema en general y la interacción con los problemas parciales, que son resueltos simultáneamente mediante un sistema de apoyo logístico de la cadena de suministro, utilizando métodos de solución como PLEM y algunas heurísticas. Adicionalmente el problema de la planificación de producción es subdivido en dos partes, la primera para fabricas individuales que cubren horizontes de planeación de tres meses, la segunda se trabaja con variables binarias las cuales implican decisiones de cuanto que producir cada día. Cabe rescatar que el problema se basan en periodos flexibles de tiempo, es decir, periodos que se agregan para la solución del problema y el comportamiento.

- Zhi-Long Chen y George Vairaktarakis[88] estudiaron el problema integrado de la programación de la producción y operaciones de distribución, en este modelo no existe inventario, ya que el producto era procesado en los puestos de trabajo (fábrica o centros de servicios) y entregado directamente al cliente, lo importante era encontrar un horario de producción y distribución conjunta de tal manera que se tenga en cuenta el nivel de servicio al cliente y el costo de distribución. Así mismo trataron dos clases de problemas: el primero en el que

[86] Universidad Industrial de Santander.
[87] BREDSTRÖM, David. y RÖNNQVIST, Mikael. Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry. System Sciences. 2002.
[88] CHEN, Zhi-Long. y VAIRAKTARAKIS, George. Integrated scheduling of production and distribution operations. Management Science, 2005.

el servicio al cliente se mide por el tiempo promedio en que se entregan los trabajos a los clientes, el segundo el servicio al cliente se mide por el tiempo máximo en que los trabajos son entregados al cliente. Se solucionaron por medio de métodos heurísticos.

- David Naso, Michele Surico y Biagio Turchiano[89], hablaron sobre el problema de programación y distribución de materiales rápidamente perecederos con un algoritmo genético hibrido. Durante este estudio se trató una red de plantas que suministran materiales rápidamente perecederos, como el hormigón premezclado. Es por ello que los productos son producidos y tiene una ventana de tiempo para ser entregados al cliente final, así mismo se hace importante que las actividades de producción y distribución estén sincronizadas, adicionalmente por la variación de la demanda se debe tener una óptima base diaria de producción. Se encontraron dos dificultades que eran, los retrasos en las operaciones y en las entregas, por esto se debía minimizar dichos riesgos, para ello se utilizaron unas herramientas como: la programación de un modelo matemático de las tareas de producción y distribución, con variables y restricciones que se necesitan en cada una de las fases; el uso de un conjunto de heurísticas para darle solución al problema planteado. Una metaheurística llamada Algoritmo genético que construye soluciones factibles. También se analizó a lo largo del documento la literatura relacionada al modelamiento del problema, los componentes y el motor de algoritmo genético.

- Ma Fei, Wu Meng-na, Sun Bao-feng y Yang Hua[90], trataron en el articulo la coordinación de la producción y la programación de la distribución en la

[89] NASO, David. SURICO, Michele. y TURCHIANO, Biagio. Scheduling Production and distribution of rapidly perishable materials with hybrid GA's. Evolutionary Scheduling. 2007.
[90] FEI, Ma. MENGA-NA, Wu. BAO-FENG, Sun. y HUA, Yang. The coordination of production and distribution scheduling in mass customization. In Management Science and Engineering, 2009. ICMSE 2009. International Conference on (pp. 482-487). IEEE.

personalización masiva, el tema de la gestión de la cadena de suministro, ya que en la mayorías de la industrias lo importante es la producción y la distribución es la actividad que va seguida de esta, lo que significa incurrir en una serie de costos como el de inventarios y la tardanza en la entrega. Durante el documento se dividio este problema en dos: la asignación de la distribución y la programación de la producción en una sola fabrica buscando minimizar costo, esta situación es modelada por la programación entera mixta; así mismo los autores buscaban que estas dos operaciones fueran encaminadas al más alto nivel de servicio al cliente, es decir, a la personalización masiva. Cuando se habla de producción se debe tener en cuenta, la producción masiva y la producción personalizada, en el primer caso se tienen inventarios, segundo se debe contar con la capacidad de respuesta al cliente. Se estudió el caso de una fábrica, varios distribuidores y una serie de clientes. Dicho problema fue solucionado por medio de la metaheurística Algoritmo genético.

- AS Safaei, S Moattar, R Farahani, F Jolai y S Ghodsypour[91], trataron el problema de multi-sitios de planificación de la producción y distribución integrado en la cadena de suministro por el modelado hibrido, donde el problema comprende variables cualitativas, cuantitativas y restricciones. Durante el documento se buscó disminuir los costos como: inventarios, producción y transporte, por medio de un modelo hibrido[92] de simulación matemática que se desarrolló para resolver dicho problema. Aunque hay que tener en cuenta factores estocásticos como retrasos, colas, fallo de la máquina, tiempo de operación, entre otros. Se realizaron diferentes experimentos computacionales, se estableció que cuando se integran las

[91]Safaei, A. S., Moattar Husseini, S. M., Z.-Farahani, R., Jolai, F., & Ghodsypour, S. H. Integrated multi-site production-distribution planning in supply chain by hybrid modelling. International Journal of Production Research, 2010.
[92] Modelo hibrido: Es aquel en el que intervienen los modelos deterministas y los modelos estocásticos, es decir, que los resultados del problema pueden ser probabilísticos o no probabilísticos.

actividades de producción y distribución se obtienen menos iteraciones, adicionalmente los costos se disminuyen en comparación con el individual.

- Zhi-Long Chen[93], en su artículo "la producción integrada y programación de salida de distribución: revisión y extensiones". Afirma que la cadena de suministro trabajada de manera integrada disminuye el inventario de productos terminados, y con ello los pedidos son entregados a los clientes inmediatamente o poco después del proceso de producción, de esta manera el costo total es menor y el servicio al cliente mejora. Existen factores a tener en cuenta como: planes de producción-distribución de productos, la capacidad de la producción, la disponibilidad del transporte y la adjudicación de la capacidad de los productos en un horizonte de planeación. Adicionalmente, la programación conjunta permite a las empresas optimizar el equilibrio entre los diversos costos, los ingresos totales y la puntualidad de entrega.

- Xue Yuan, Joyce Low y Wee Meng[94], trataron el problema de un prototipo de red para la planificación de la producción y distribución integrada con las plantas no multi-funcionales, en donde se presentan varios productos, con clientes limitados y almacenes con restricciones de capacidad, para un prototipo de red de dos escalones de planificación con plantas no multifuncional se soluciona utilizando algoritmos de ramificación. La integración de la producción y la distribución ofrece una ventaja competitiva a la empresa mediante la disminución de los costos, a través de la utilización y coordinación de los recursos. Además la consideración que se tiene del problema, los clientes demandan múltiples productos fabricados por plantas que tiene capacidad fija para elaborar determinado producto, luego son

[93] CHEN, Zhi-Long Integrated production and outbound distribution scheduling: review and extensions. Operations Research.
[94] YUAN, Xue-Ming. LOW, Joyce. y YEO, Wee Meng. A network prototype for integrated production-distribution planning with non-multi-functional plants. International Journal of Production Research.

distribuidos a los almacenes que no tiene restricción de productos y se puede aumentar la capacidad. La red se compone de 3 casos: el primero se envía de la planta 1, al centro de distribución 1 y al cliente 1; el caso 2 las plantas distribuyen a diferentes tipos de centros de distribución, allí se envía del centro 1 al cliente 1, así sucesivamente; el caso 3 se envía directamente de la planta 1 al centro de distribución 1, después se envía a diferentes clientes.

- Bilge Bilgen y Yelda Celebi[95], hablaron de la programación integrada de la producción y planificación de la distribución en la cadena de suministro de productos lácteos mediante un modelo hibrido. El producto principalmente tratado es el yogur, debido a su vida útil tan corta, es por ello que se hace importante la integración de estas operaciones en la línea de producción, que se modeló por programación lineal entera mixta, buscando obtener el mayor beneficio como la función objetivo, en donde los precios varían según el tiempo de vida. El modelo se ve afectado por factores como: los tiempos de preparación, tamaños de lotes, horas extras, requisitos de vida útil, velocidad de la maquinas, líneas de producción. El enfoque hibrido se percibe en el tiempo de operación que es un factor dinámico, es ajustado por la simulación del modelo y la optimización iterativa. El orden de proceso de los productos es fundamental, ya que no se acepta una no secuenciación de las actividades, no se comienza un nuevo producto hasta no haber procesado toda la demanda del día.

- Christian Viergutz y Sigrid Knust[96], abordaron el problema de la producción integrada y la programación de la distribución con limitaciones de vida útil. En este documento juega un papel fundamental la capacidad que se tienen de los

[95] BILGEN, Bilge. y CELEBI, Yelda. Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modelling. Annals of Operations Research, 2013, vol. 211, no 1, p. 55-82.
[96]VIERGUTZ, Christian. y KNUST, Sigrid. Integrated production and distribution scheduling with lifespan constraints. Annals of Operations Research, 2014.

recursos como: una sola planta con tasa limitada de producción, clientes dispersos geográficamente con ventana de tiempo de entrega de pedidos, con un único vehículo. El problema radicaba en encontrar una serie de clientes, de tal manera que se maximice la demanda satisfecha total. Adicionalmente plantean una solución por medio de heurísticas eficientes y algoritmos.

ANEXO B. CÓDIGO DEL PROGRAMA

```
function varargout = INTERFAZ(varargin)
% INTERFAZ MATLAB code for INTERFAZ.fig
%      INTERFAZ, by itself, creates a new INTERFAZ or raises the existing
%      singleton*.
%
%      H = INTERFAZ returns the handle to a new INTERFAZ or the handle to
%      the existing singleton*.
%
%      INTERFAZ('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%          function named CALLBACK in INTERFAZ.M with the given input
arguments.
%
%       INTERFAZ('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ or raises
the
%      existing singleton*.  Starting from the left, property value pairs
are
%      applied to the GUI before INTERFAZ_OpeningFcn gets called.  An
%          unrecognized property name or invalid value makes property
application
%      stop.  All inputs are passed to INTERFAZ_OpeningFcn via varargin.
%
%       *See GUI Options on GUIDE's Tools menu.  Choose "GUI allows only
one
%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help INTERFAZ

% Last Modified by GUIDE v2.5 13-Jul-2015 10:05:29

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                   'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                   'gui_OpeningFcn', @INTERFAZ_OpeningFcn, ...
                   'gui_OutputFcn',  @INTERFAZ_OutputFcn, ...
                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                   'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
```

```
% --- Executes just before INTERFAZ is made visible.
function INTERFAZ_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to INTERFAZ (see VARARGIN)

% Choose default command line output for INTERFAZ
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes INTERFAZ wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);


% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = INTERFAZ_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;


% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% --- Executes on button press in radiobutton1.
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton1


% --- Executes on button press in radiobutton6.
function radiobutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
if         get(handles.radiobutton2,'value')         ==         1         ||
get(handles.radiobutton3,'value') == 1
    if get(handles.radiobutton6,'value') == 1
        set(handles.radiobutton5,'value',0);
        set(handles.radiobutton4,'value',0);
    end
else
    warndlg('Debe seleccionar primero un algoritmo inicial','!! Pare !!')
    set(handles.radiobutton6,'value',0);
end

% --- Executes on button press in radiobutton5.
function radiobutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
if         get(handles.radiobutton2,'value')         ==         1         ||
get(handles.radiobutton3,'value') == 1
    if get(handles.radiobutton5,'value') == 1
        set(handles.radiobutton6,'value',0);
        set(handles.radiobutton4,'value',0);
    end
else
    warndlg('Debe seleccionar primero un algoritmo inicial','!! Pare !!')
    set(handles.radiobutton5,'value',0);
end


% --- Executes on button press in radiobutton2.
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.radiobutton2,'value') == 1
    set(handles.radiobutton3,'value',0);
end


% --- Executes on button press in radiobutton3.
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.radiobutton3,'value') == 1
    set(handles.radiobutton2,'value',0);
end


% --- Executes on button press in radiobutton4.
function radiobutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
if         get(handles.radiobutton2,'value')         ==         1         ||
get(handles.radiobutton3,'value') == 1
    if get(handles.radiobutton4,'value') == 1
        set(handles.radiobutton6,'value',0);
        set(handles.radiobutton5,'value',0);
    end
else
    warndlg('Debe seleccionar primero un algoritmo inicial','!! Pare !!')
    set(handles.radiobutton4,'value',0);
end
```

```
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a
double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a
double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a
double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
input = str2double(get(hObject,'string'));
if isnan(input) || mod(input,1)~= 0 || input < 1
  errordlg('Debe ingresar un número entero mayor a 0','!! PARE
!!','modal')
  set(handles.edit6,'String',' ');
  uicontrol(hObject)
  return
end


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
input = str2double(get(hObject,'string'));
if isnan(input) || mod(input,1)~= 0 || input < 1
  errordlg('Debe ingresar un número entero mayor a 0','!! PARE
!!','modal')
  set(handles.edit6,'String',' ');
```

```
  uicontrol(hObject)
  return
end


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if         ispc         &&         isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
input = str2double(get(hObject,'string'));
if isnan(input) || mod(input,1)~= 0 || input < 1
  errordlg('Debe  ingresar  un  número  entero  mayor  a  0','!!  PARE
!!','modal')
  set(handles.edit6,'String',' ');
  uicontrol(hObject)
  return
end


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if         ispc         &&         isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)
input = str2double(get(hObject,'string'));
if isnan(input) || mod(input,1)~= 0 || input < 1
  errordlg('Debe  ingresar  un  número  entero  mayor  a  0','!!  PARE
!!','modal')
  set(handles.edit6,'String',' ');
  uicontrol(hObject)
  return
end


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if         ispc         &&         isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
input = str2double(get(hObject,'string'));
if isnan(input) || mod(input,1)~= 0 || input < 1
  errordlg('Debe  ingresar  un  número  entero  mayor  a  0','!!  PARE
!!','modal')
  set(handles.edit6,'String',' ');
  uicontrol(hObject)
  return
end


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if        ispc        &&        isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
global metodo capacidad cambio;

if        get(handles.radiobutton2,'value')        ==        0        &&
get(handles.radiobutton3,'value') == 0
    warndlg('Debe seleccionar primero un algoritmo inicial','!! Pare !!')
elseif      get(handles.radiobutton13,'value')       ==       0       &&
get(handles.radiobutton14,'value') == 0
    warndlg('Debe seleccionar un tipo de modelo','!! Pare !!')
elseif      isempty(get(handles.edit6,'String'))       ==       1       ||
isempty(get(handles.edit13,'String'))          ==          1          ||
isempty(get(handles.edit14,'String'))          ==          1          ||
isempty(get(handles.edit15,'String')) == 1
       errordlg('Debe ingresar los datos de los indices primero','!! PARE
!!','modal')
       uicontrol(handles.edit6);
elseif      isempty(get(handles.edit16,'String'))      ==      1      ||
isempty(get(handles.edit17,'String')) == 1
       errordlg('Debe  de  importar  los  parámetros  de  entrada','!!  PARE
!!','modal')
       uicontrol(handles.pushbutton4);
elseif      isempty(get(handles.edit18,'String'))      ==      1      &&
get(handles.radiobutton13,'value') == 1
       errordlg('Debe  ingresar  el  costo  de  la  producción','!!  PARE
!!','modal')
       uicontrol(handles.edit18);
else

    if       get(handles.radiobutton5,'value')       ==       1       &&
get(handles.radiobutton2,'value') == 1
        metodo = 41;
```

```
    elseif      get(handles.radiobutton5,'value')       ==       1       &&
get(handles.radiobutton3,'value') == 1
        metodo = 42;
    elseif      get(handles.radiobutton6,'value')       ==       1       &&
get(handles.radiobutton2,'value') == 1
        metodo = 51;
    elseif      get(handles.radiobutton6,'value')       ==       1       &&
get(handles.radiobutton3,'value') == 1
        metodo = 52;
    elseif      get(handles.radiobutton4,'value')       ==       1       &&
get(handles.radiobutton2,'value') == 1
        metodo = 31;
    elseif      get(handles.radiobutton4,'value')       ==       1       &&
get(handles.radiobutton3,'value') == 1
        metodo = 32;
    elseif get(handles.radiobutton2,'value') == 1
        metodo = 1;
    elseif get(handles.radiobutton3,'value') == 1
        metodo = 2;
    elseif get(handles.radiobutton4,'value') == 1
        metodo = 3;
    end

    if get(handles.radiobutton13,'value') == 1
        cambio = get(handles.edit18,'value');
    else
        cambio = 0;
    end
    capacidad = get(handles.edit15,'String');
    SOLUCION;
end


% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
close();


function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit16 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit16 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit16 as
a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit16 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function edit17_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit17 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit17 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit17 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit17_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit17 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
if isempty(get(handles.edit6,'String')) == 1 || isempty(get(handles.edit13,'String')) == 1 || isempty(get(handles.edit14,'String')) == 1 || isempty(get(handles.edit15,'String')) == 1
       errordlg('Debe ingresar los datos de los indices primero','!! PARE !!','modal')
       uicontrol(handles.edit6);
else
    [FileName Path]=uigetfile({'*.xlsx'},'Abrir Documento');
    %set(handles.edit16,'String',strcat(Path,FileName));

    global clientes productos periodos demanda;
```

```
    clientes = str2double(get(handles.edit6,'String'));
    productos = str2double(get(handles.edit14,'String'));
    periodos = str2double(get(handles.edit13,'String'));

    flag=0;
    demanda=zeros( clientes * productos, periodos);
    abc                                                          =
['B','C','D','E','F','G','H','I','J','K','L','M','N','O','P','Q','R','S',
'T','U','V','W','X','Y','Z'];
    demanda    =    xlsread(strcat(Path,FileName),'Hoja1',strcat('B3:',
abc(periodos) , num2str((productos * clientes)+2)));

    [m,n] = size(demanda);
    for i=1:m
        for j=1:n
            if isnan(demanda(i,j))
                errordlg('Los  campos  del  archivo  no  son  numéricos','!!
PARE !!','modal')
                flag=1;
                break
            end
        end
    end
    if flag == 0
        set(handles.edit16,'String',strcat(Path,FileName));
    else
        uicontrol(handles.edit16);
    end

end

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
if       isempty(get(handles.edit6,'String'))       ==       1       ||
isempty(get(handles.edit13,'String'))         ==         1          ||
isempty(get(handles.edit14,'String'))         ==         1          ||
isempty(get(handles.edit15,'String')) == 1
       errordlg('Debe ingresar los datos de los indices primero','!! PARE
!!','modal')
       uicontrol(handles.edit6);
else
    [FileName Path]=uigetfile({'*.xlsx'},'Abrir Documento');
    %set(handles.edit17,'String',strcat(Path,FileName));

    global clientes vehiculos periodos costos;

    clientes = str2double(get(handles.edit6,'String'));
    %vehiculos = str2double(get(handles.edit12,'String'));
    periodos = str2double(get(handles.edit13,'String'));

    %costos=zeros( (clientes+1) * vehiculos * periodos,(clientes+1))
    flag = 0;
```

```
    abc                                                                                =
['B','C','D','E','F','G','H','I','J','K','L','M','N','O','P','Q','R','S',
'T','U','V','W','X','Y','Z'];
    abc = cellstr(abc(:));
    abc(26) = cellstr('AA');
    cont = length(abc);
    for i=1:cont
        valor = strcat('A',abc(i));
        abc(length(abc)+1) = cellstr(valor);
    end
    abc(length(abc)+1) = cellstr('BA');
    for i=1:25
        valor = strcat('B',abc(i));
        abc(length(abc)+1) = cellstr(valor);
    end
    abc(length(abc)+1) = cellstr('CA');
    for i=1:25
        valor = strcat('C',abc(i));
        abc(length(abc)+1) = cellstr(valor);
    end


    %for i=0:(vehiculos*periodos)-1
    for i=0:(periodos-1)
        %disp((3+i*(3+clientes)))
        if i==0
              costos   =  xlsread(strcat(Path,FileName),'Hoja1',strcat('B',
num2str(3+i*(3+clientes)),':', char(abc(clientes+1)) , num2str(clientes +
3+i*(3+clientes))));
            %costos   =  xlsread(strcat(Path,FileName),'Hoja1',strcat('B',
num2str(3+i*(3+clientes)),':',     'AF'     ,     num2str(clientes     +
3+i*(3+clientes))));
        else
            mat     =    xlsread(strcat(Path,FileName),'Hoja1',strcat('B',
num2str(3+i*(3+clientes)),':', char(abc(clientes+1)) , num2str(clientes +
3+i*(3+clientes))));
            [m n]=size(mat);
            if m ~= n
                errordlg('Los  campos  del  archivo  no  son  correctos','!!
PARE !!','modal')
                flag=1;
                break
            end
            costos = [costos ; mat];
        end
    end

    [m,n] = size(costos);
    for i=1:m
        for j=1:n
            if isnan(costos(i,j))
                errordlg('Los  campos  del  archivo  no  son  numéricos','!!
PARE !!','modal')
                flag=1;
```

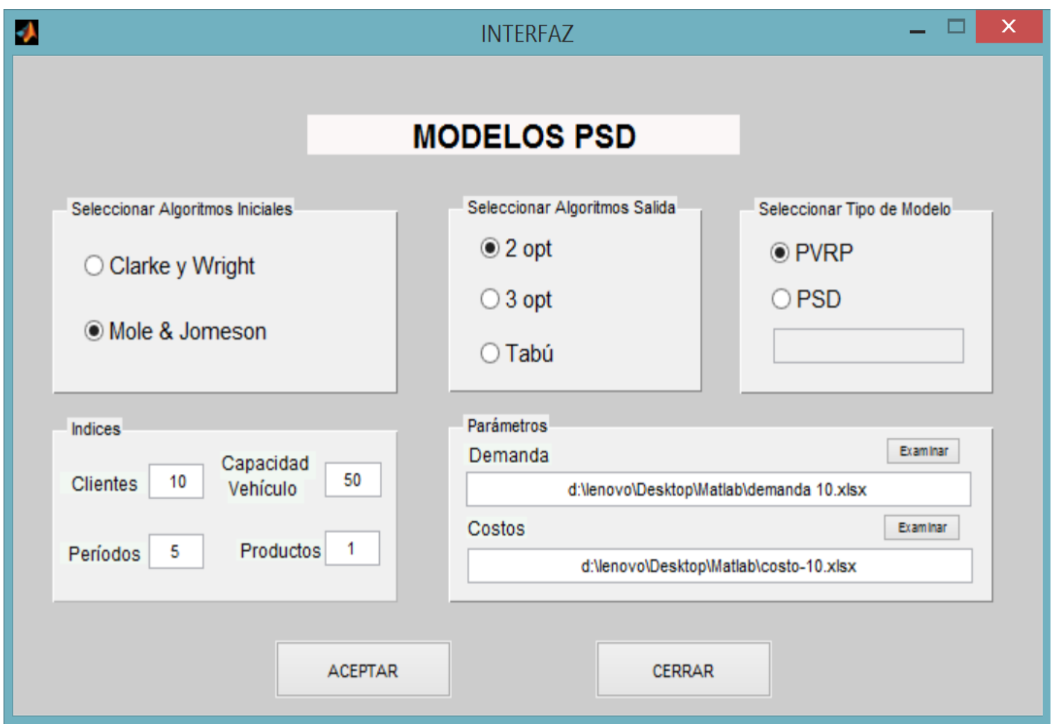
```
                break
            end
        end
    end
    if flag == 0
        set(handles.edit17,'String',strcat(Path,FileName));
    else
        uicontrol(handles.edit17);
    end
end


% --- Executes on button press in radiobutton13.
function radiobutton13_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.radiobutton13,'value') == 1
    set(handles.radiobutton14,'value',0);
    set(handles.edit18,'Enable','on');
    uicontrol(handles.edit18);
end


% --- Executes on button press in radiobutton14.
function radiobutton14_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(handles.radiobutton14,'value') == 1
    set(handles.radiobutton13,'value',0);
end



function edit18_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit18 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit18 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit18 as
a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit18_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit18 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if         ispc         &&         isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

ANEXO C. PASO A PASO DE LA EXPERIMENTACIÓN EN MATLAB

El programa está diseñado para el problema del PVRP con un límite de columnas de 100, como parámetro de entrada de los costos o demandas. Adicionalmente se debe tener en cuenta que para clientes mayores a 5 la demanda deberá colocarse acumulada por cliente, puesto que para el ruteo es indiferente que producto estas transportando.

Pero dentro de la programación es posible correr el problema de PSD, introduciendo como parámetro de entrada el costo del modelo CLSP.

El ingreso de datos se realiza por medio de una ventana emergente, como se presenta en la siguiente imagen.

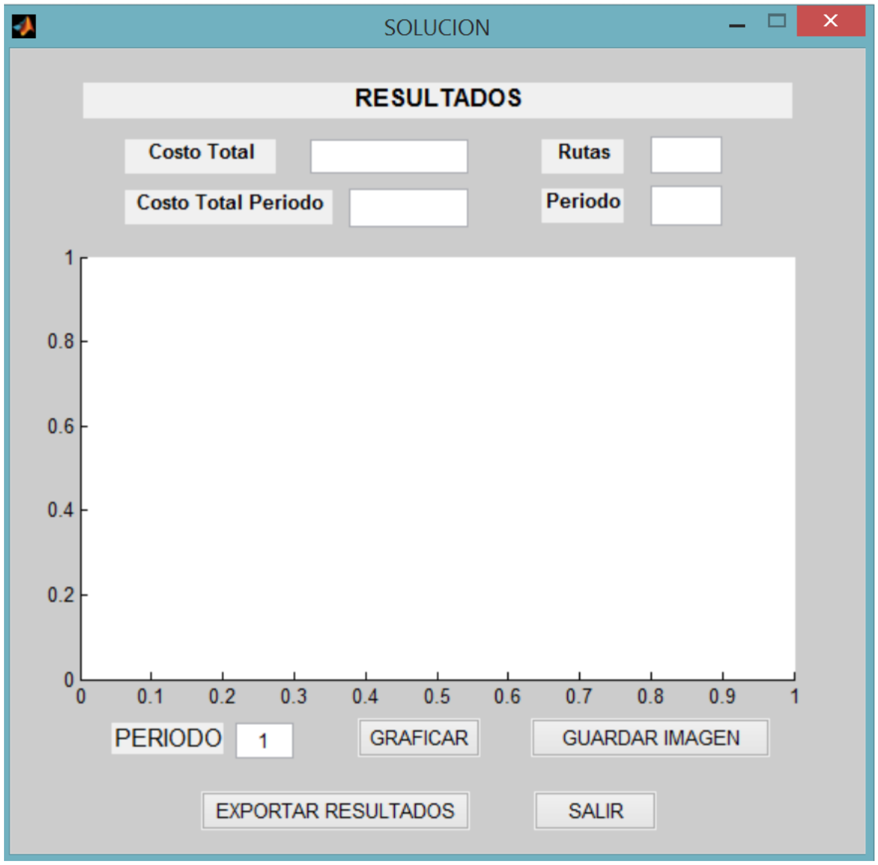


En la anterior figura se percibe que como requisito de entrada es el algoritmo, el tipo de problema, los índices (Clientes, Capacidad del vehículo, períodos de tiempo y productos), las demandas y los costos, estos últimos se importan como archivos de excel. En la siguiente imagen se presenta la manera deben crearse las tablas de los parámetros.

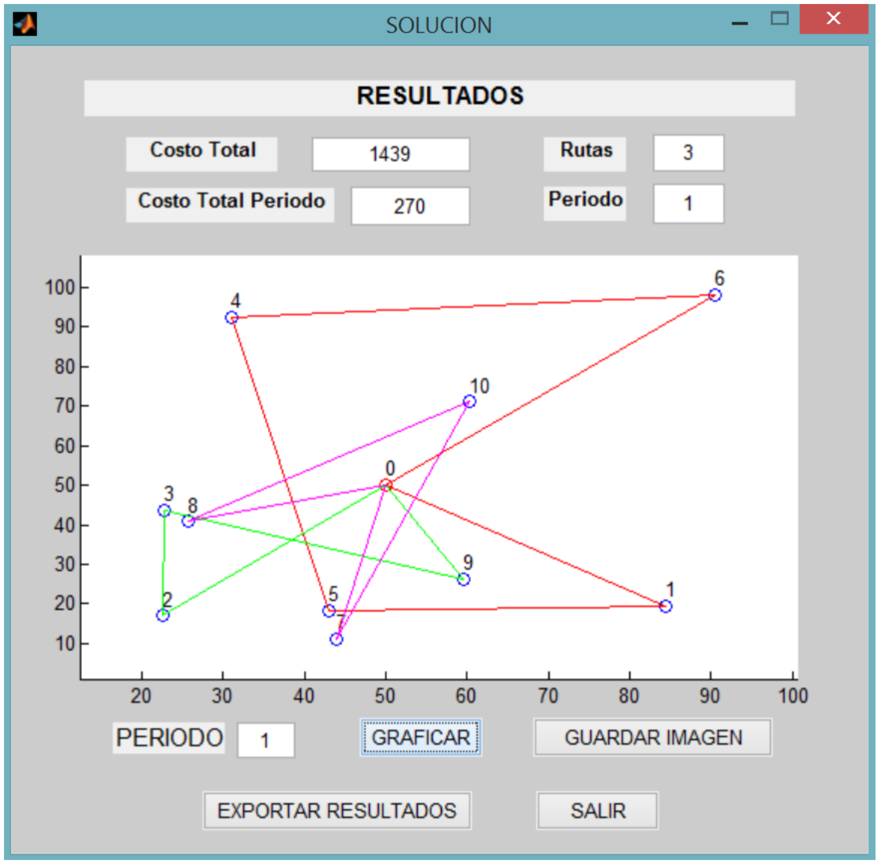
DEMANDA	PERIODO				
djrt (unid)	1	2	3	4	5
d1	27	18	14	8	2
d2	15	43	8	16	13
d3	20	14	19	12	16
d4	8	5	19	6	20
d5	6	4	18	8	12
d6	8	3	0	0	13
d7	4	5	15	33	10
d8	32	7	12	7	9
d9	15	12	14	9	11
d10	6	8	12	13	11
	141	119	131	112	117

COSTO DE TRANSPORTAR			Periodo 1-Ruta 1								
i\j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	30000	12	24	47	31	23	10	32	25	33	29
1	12	30000	20	32	45	12	26	38	34	23	26
2	24	20	30000	23	54	27	17	20	28	19	23
3	47	32	23	30000	17	19	42	23	20	19	26
4	31	45	54	17	30000	20	22	17	26	21	17
5	23	12	27	19	20	30000	13	39	28	40	31
6	10	26	17	42	22	13	30000	25	31	26	40
7	32	38	20	23	17	39	25	30000	38	23	19
8	25	34	28	20	26	28	31	38	30000	30	19
9	33	23	19	19	21	40	26	23	30	30000	36
10	29	26	23	26	17	31	40	19	19	36	30000

Luego de llenar cada uno de los campos y cargar los archivos, se da click en la opción aceptar, generando la siguiente ventana emergente:



En la cual para que arroje el resultado el programa deberás darle click en la opción graficar. En seguida se presenta la ventana en donde se presenta las rutas por periodos, como se muestra enseguida:



Para ver los demás periodos se debe escribir el número del periodo que quieres ver y darle click en *Graficar*. En esta ventana se encuentra la función objetivo y el costo por periodo de las rutas generadas, además de cantidad de rutas y el periodo. Para obtener los resultados en un excel se da click en la opción *Exportar resultados*; para guarda el ruteo de cada periodo le das click en la opción *Guardar imagen*. Para salirse se da click en la opción *Salir.*

Este programa tiene la opción de volver a graficar en caso de que no se entienda las rutas generadas, solamente es dar click nuevamente en la opción *Graficar*.

ANEXO D: ARTICULO

PLANEACIÓN COORDINADA DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN A TRAVÉS DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

YEIDY CARDOZO MORANTES[97]

KAREN SILVANA CARRILLO CARREÑO[98]

Bucaramanga, Colombia

En este artículo presenta una investigación y experimentación del problema de la planeación de la producción y distribución integrada, abarcado diferentes instancias y teniendo en cuenta parámetros y características determinadas, planteando modelos para la optimización del problema integrado y por separado. Se realizan experimentos computacionales analizando la integración de las actividades en un solo modelo y el comportamiento de los problemas de producción y distribución por separado, con la finalidad de estudiar las implicaciones de cada uno en cuanto a convergencia y eficiencia de las soluciones encontradas. Para esto se analizaron varias instancias sobre los diferentes escenarios, donde se generan soluciones óptimas por métodos exactos (Software GAMS/CPLEX) y otras técnicas de optimización heurísticas y metaheurísticas (Software MATLAB).

PALABRAS CLAVE: Planeación de la producción y distribución, ruteo de vehículos, PSD, CLSP y PVRP.

COORDINATED PLANNING OF THE PRODUCTION AND DISTRIBUTION THROUGH OPTIMIZATION PROBLEMS

This article presents a research and experimentation the problem of integrated planning of the production and distribution, comprised different instances and taking into account parameters and specific characteristics, suggesting models for integrated optimization problem and separately. Computational experiments are done by analyzing the integration of activities into a single model and behavior problems of production and distribution separately, in order to study the implications of each in terms of convergence and efficiency of the solutions. For this several instances on different scenarios, where optimal solutions by exact methods (Software GAMS / CPLEX) and other optimization techniques heuristics and metaheuristics (MATLAB software).

KEYWORDS: Plan production and distribution, vehicle routing, PSD, and PVRP CLSP.

---

[97] Ingeniera Industrial, e-mail: yeidycm@gmail.com
[98] Ingeniería Industrial, e-mail: karensilvana15@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la programación de la producción y la distribución juega un papel fundamental en las industrias, ya que gracias a esto se logra suplir la demanda existente. El estudio de esta problemática desde el punto de vista de la optimización matemática busca minimizar los costos, tiempos, distancias y mejorar el servicio al cliente; además le permite a la empresa generar una ventaja competitiva frente a su competencia y con ello lograr un valor agregado en su producto y/o servicio.

El problema de la programación coordinada de la producción y la distribución es un problema considerado NP-Hard, debido a que involucra en su interior a un problema de optimización combinatoria de ese tipo como es el problema de ruteo de vehículos. Lo anterior conlleva a que al crecer la cantidad de clientes a distribuir, el problema aumente de tal manera que se encuentran dificultades a la hora de darle solución por medio de métodos exactos, pasando al uso de procedimientos de tipo heurísticos y metaheurísticos, sacrificando la obtención de una solución óptima por una solución factible.

Ya desde el siglo pasado se ha venido estudiando este problema de optimización, en particular en este trabajo se hace énfasis en un trabajo de Chandra (1994) donde analiza los ambientes integrados e independientes del problema. Y a partir de este, se han realizado diferentes estudios sobre la programación de la producción y la distribución en donde han variado los distintos entornos industriales, teniendo en cuenta la capacidad, producción y ruteo.

En este trabajo se analizará la programación de la producción y distribución de manera integral, así como dos actividades separadas, revisando las diferencias que se encuentra en la literatura, pasando a la construcción y modelamiento como problemas de optimización, con el fin de estudiar revisar aspectos de convergencia y eficiencia, entre otros, utilizando algoritmos de solución y distintos software.

2. REVISIÓN BIBLOGRAFICA

Se realizó una revisión a los problemas de Planificación de la Producción con Lote Capacitado (CLSP), Ruteo de Vehículos Periódicos (PVRP) y Planeación coordinada de la producción y distribución (PSD), con el fin de lograr una apropiación de dichos temas, y tener una visión de las distintas formulaciones y variaciones que se han presentado a lo largo de los años. Lo anterior es base fundamental para la construcción de los modelos presentados más adelante.

2.1 Planificación de la producción (CLSP)

La planificación de la producción es una actividad principal en las empresas, ya que considera el uso adecuado de los recursos a fin de satisfacer las metas de producción. Generalmente esta operación abarca tres horizontes de planeación a largo plazo, a mediano plazo y a corto plazo, en donde se toman decisiones de tipo estratégico, táctico y operacional respectivamente. A su vez esta actividad tiene en cuenta características como el número de productos, las limitaciones en cuanto a capacidad o recursos, el deterioro de artículos, la demanda, la escasez del inventario, entre otras.

B. Karimi, S. Fatemi Ghomi, y J. Wilson (2003) en su publicación tratan sobre la planificación en el mediano plazo, más específicamente las decisiones de los lotes de un solo nivel de tamaño, además de identificar cuando y que cantidad de productos producir. Se presentan una serie de características a tener en cuenta del problema CLSP como son: el horizonte de planeación, el número de niveles, el número de productos, las limitaciones de capacidad o recursos, el deterioro de artículos, la demanda, la configuración de la estructura, así como los inventarios. Se considera dos problemas que son lotes capacitados y no capacitados de un solo nivel.

2.2 Ruteo de vehículos (PVRP)

Otro proceso a tener en cuenta que sirve como complemento de la planeación de la producción es la distribución de los productos, es decir, el ruteo de vehículos, el cual se encarga llevar las órdenes de productos desde las plantas a los clientes/almacenes. Para ello se estudió el problema del PVRP, que se presenta a continuación:

C.C.R Tan y JE Beasley (1984) tratan una heurística para el problema de ruteo de vehículo periódico. En este documento plantean el problema general de ruteo de vehículos, con el fin de diseñar las rutas que suplan los requerimientos de nivel de servicio de los clientes, esto se realiza por medio de una heurística que se basa en el algoritmo de ruteo de vehículo diario, con un horizonte de tiempo para realizar las combinaciones de rutas. Inicialmente se hace un acercamiento al VRP (Vehicule Routing Problem), luego se hace una extensión al problema PVRP (Period Vehicule Routing Problem) para darle solución a este último.

Dalessandro Vianna, Luiz Ochi, Lucia Drummond (2001), trataron una metaheurística paralela evolutiva al problema del enrutamiento periódico de vehículo. Se propuso un algoritmo basado en los conceptos utilizados en paralelo con los algoritmos genéticos y las heurísticas de búsqueda local, para solucionar el problema clásico de enrutamiento de vehículos con la planificación periodica de un solo día M. Lo que se buscaba era minimizar la distancia recorrida de tal manera que solo un vehículo maneja las entregas para un cliente determinado.

Enrico Angelelli y Maria Speranza (2002), trataron el problema de ruteo de vehículo periódico con instalaciones intermedias. En el documento se estudió una extensión del PVRP con vehículos que pueden renovar su capacidad en algunas instalaciones intermedias, los vehículos regresan al depósito solo cuando sus turnos han terminado. Para el problema se propone el algoritmo de búsqueda tabú y se presenta los resultados computacionales del conjunto de instancias de la literatura. Posteriormente

Sofie Coene, Arent Arnout y Frits Spieksma (2008) trabajaron un caso de estudio del problema de ruteo de vehículo periódico. En este artículo se cuenta las ubicaciones de los clientes, las demandas de los mismo y el conjunto de vehículos capacitados, además cuanta con un horizonte de planificación y una frecuencia para visitar al cliente. La solución se realizó utilizando diferentes heurísticas con el fin de verificar cual presentaba un mejor resultado. Adicionalmente se debe tener en cuenta que por ser caso de estudio es un resultado especial, más por tratarse de recolección de residuos (alto o bajo riesgo). El análisis de este documento sirve como base para la formulación del PVRP, ya que este documento presenta un problema más complejo y con un mayor número de variables, puesto que el problema de una compañía belga que transporta residuos riesgosos.

Julien Michallet, Christian Prins, Lionel Amodeo, Farouk Yalaoui, y Gregoire Vitry (2014), en su documento hablan sobre un difícil problema de ruteo de vehículo periódico con ventanas de tiempo de una empresa especializada en el transporte de bienes de valor, por tanto tiene restricciones de seguridad. El objetivo era resolver problemas de la vida real, por lo cual el tiempo debe ser razonable; se presentan casos derivados del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y dos casos prácticos, además de un caso particular de un solo periodo. Se partió de la base del clásico VRP y se enriqueció con restricciones tales como ventanas de tiempo para visitar los clientes, operaciones de recogida y entrega, flota homogénea de vehículos, entre otras.

2.3 Programación de la producción y distribución (PSD)

La solución de este problema de manera integrada ha sido abordada en sectores específicos pero no se ha establecido de una forma en general para ser utilizada por todas las industrias. Se realizó un análisis a los diferentes trabajos que han estudiado este problema para revisar sus características y parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de formular un modelo.

El problema de programación de la producción y distribución es abordado de forma integrada por Pankaj Chandra y Marshall Fisher (1994), en donde se maneja similar a una cadena de suministro.

Este artículo tiene como escenario particular una planta que produce una serie de bienes en un tiempo determinado, y se maneja un inventario de productos terminados. Los productos son distribuidos por una flota de camiones a unos puntos de ventas. La demanda de los productos en cada punto de venta y periodo es conocida; su desarrolló se dio por medio del método exacto de programación lineal entera mixta (PLEM). De igual forma se realizó el problema de manera unificada y por separado con la finalidad de comparar cual era mejor.

Después, Carlos Vidal y Marc Goetschalckx (1997) realizaron un estudio exhaustivo a la literatura existente hasta ese entonces sobre el tema de modelos estratégicos de producción y distribución, esta investigación se dividió en 4 ramas fundamentales que fueron: revisiones anteriores, modelos de optimización, problemas adicionales para el modelado y estudios de casos y aplicaciones. En la primera fase, se analizaron investigaciones ya realizadas, donde el tema central era la producción y distribución. En la fase dos, se subdividió en dos partes: Modelos MIP y Otros enfoques de optimización. En la tercera fase se trata la cadena de suministro, y la forma en que otros autores han abordado el mismo tema. En la última fase hacen énfasis en los modelos estratégicos de producción y distribución aplicados a la logística. En cada etapa se identificaron las principales características de los problemas, formulaciones, métodos de solución y experiencias computacionales, con la finalidad de tener una visión más amplia sobre el tema tratado y reconocer las posibles oportunidades de investigación. Adicionalmente el artículo da claridad del manejo de la producción y distribución a lo largo del mundo.

David Bredström y Mikael Rönnqvist (2002) tratan el problema de la planificación de la producción y la programación de ruteo en la industria de celulosa en la planta de Suecia. En este documento mencionan el problema en general y la interacción con los problemas parciales, que son resueltos simultáneamente mediante un sistema de apoyo logístico de la cadena de suministro, utilizando métodos de solución como PLEM y algunas heurísticas. Adicionalmente el problema de la planificación de producción es subdivido en dos partes, la primera para fabricas individuales que cubren horizontes de planeación de tres meses, la segunda se trabaja con variables binarias las cuales implican decisiones de cuanto que producir cada día. Cabe rescatar que el problema se basan en periodos flexibles de tiempo, es decir, periodos que se agregan para la solución del problema y el comportamiento.

Zhi-Long Chen (2010), en su artículo “la producción integrada y programación de salida de distribución: revisión y extensiones”. Afirma que la cadena de suministro trabajada de manera integrada disminuyendo el inventario de productos terminados, y con ello los pedidos son entregados a los clientes inmediatamente o poco después del proceso de producción, de esta manera el costo total es menor y el servicio al cliente mejora. Existen factores a tener en cuenta como: planes de producción-distribución de productos, la capacidad de la producción, la disponibilidad del transporte y la adjudicación de la capacidad de los productos en un horizonte de planeación. Adicionalmente, la programación conjunta permite a las empresas optimizar el equilibrio entre los diversos costos, los ingresos totales y la puntualidad de entrega.

Xue Yuan, Joyce Low y Wee Meng (2012), trataron el problema de un prototipo de red para la planificación de la producción y distribución integrada con las plantas no multi-funcionales, en donde se presentan varios productos, con clientes limitados y almacenes con restricciones de capacidad, para un prototipo de red de dos escalones de planificación con plantas no multifuncional se soluciona utilizando algoritmos de ramificación. La integración de la producción y la distribución ofrece una ventaja competitiva a la empresa mediante la disminución de los costos, a través de la utilización y coordinación de los recursos. Además la consideración que se tiene del problema, los clientes demandan múltiples productos fabricados por plantas que tiene capacidad fija para elaborar determinado producto, luego son distribuidos a los almacenes que no tiene restricción de productos y se puede aumentar la capacidad. La red se compone de 3 casos: el primero se envía de la planta 1, al centro de distribución 1 y al cliente 1; el caso 2 las plantas distribuyen a diferentes tipos de centros de distribución, allí se envía del centro 1 al cliente 1, así sucesivamente; el caso 3 se envía directamente de la planta 1 al centro de distribución 1, después se envía a diferentes clientes.

Christian Viergutz y Sigrid Knust (2014) abordaron el problema de la producción integrada y la programación de la distribución con limitaciones de vida útil. En este documento juega un papel fundamental la capacidad que se tienen de los recursos como: una sola planta con tasa limitada de producción, clientes dispersos geográficamente con ventana de tiempo de entrega de pedidos, con un único vehículo. El problema radicaba en encontrar una serie de clientes, de tal manera que se maximice la demanda satisfecha total. Adicionalmente plantean una solución por medio de heurísticas eficientes y algoritmos.

3. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

3.1 Caracterización y construcción del modelo

Los siguientes modelos tanto para la secuenciación de la producción como la distribución fueron postulados de acuerdo a las características y parámetros revisados en la literatura, y las diferentes variaciones, para dejar un horizonte de planificación claro y unas características estipuladas para el modelo.

- **Formulación del problema de secuenciación de la producción (CLSP)**

La construcción del modelo fue en base a lo estudiado en el marco teórico y la revisión bibliográfica presentada anteriormente, el principal artículo usado para la formulación fue el de B. Karimi como se presenta a continuación:

Índices:

r: *Productos*

t: *Periodos de tiempo*

Parámetros:

$\boldsymbol{D_{rt}}$: *Demanda del producto r en el periodo t*

$\boldsymbol{a_{rt}}$: *Costo de producir una unidad del producto r en el periodo t*

$\boldsymbol{h_{rt}}$: *Costo de mantener una unidad del producto r en el periodo*

$\boldsymbol{s_{rt}}$: *Costo de setup para una unidad del producto r en el periodo t*

$\boldsymbol{T_{rt}}$: *Tiempo para producir una unidad del producto r en el periodo t*

$\boldsymbol{B_{rt}}$: *Tiempo máximo disponible para el producto r en el periodo t*

Variables:

$\boldsymbol{P_{rt}}$: *Cantidad de productos r fabricados en el periodo t*

$\boldsymbol{I_{rt}}$: *Inventario del producto r en el periodo t*

$$\boldsymbol{L_{rt}} = \begin{Bmatrix} 1, \text{si se produce el producto } r \text{ en el periodo } t \\ 0, \text{de lo contrario} \end{Bmatrix}$$

Función objetivo:

$$\min Z = \sum_{r=1} \sum_{t=1} (a_{rt}P_{rt} + h_{rt}I_{rt} + s_{rt}L_{rt})$$

Sujeto a:

$$\sum_{r=1} I_{r1} = 0 \tag{1.2}$$

$$\sum_{r=1} T_{rt}P_{rt} \leq B_t \; ; \;\; \forall t \tag{1.3}$$

$$P_{rt} + I_{rt} - I_{r,t+1} = D_{rt} \; ; \;\; \forall r, \forall t \tag{1.4}$$

$$P_{rt} \leq ML_{rt} \; ; \;\; \forall r, \forall t \tag{1.5}$$

$$P_{rt} \geq 0 \; ; \; I_{rt} \geq 0 \; ; \; L_{rt} \in \{0,1\} \tag{1.6}$$

<u>Explicación de las restricciones del modelo.</u>

El objetivo de este modelo es disminuir los costos de producción, de setup y de mantener inventarios. En la restricción (1.2) se inicializan los inventarios en cero. En la restricción (1.3) se asegura que el tiempo de producir todos los productos no supera la capacidad que se tiene de producir en la planta. La restricción (1.4) asegura la satisfacción de la demanda. La restricción (1.5) asegura que se abra la planta en el periodo en que se debe producir. Por último la restricción (1.6) asegura la no negatividad de las variables.

Características del problema:

Como se mencionó anteriormente las características que se presentan para este problema fueron tomadas en su mayoría del artículo planteado por B. Karimi entre ellas son:

a. Horizonte finito de producción: T: Número de periodos.
   En cada periodo se determina si se produce, la cantidad a producir y la cantidad a almacenar (tiempo discreto).
b. Una planta de producción: Capacidad de producción dada en tiempo total disponible por periodo. No hay subensambles, estructura de setup simple.
c. Varios minoristas. Son los generadores de demanda.
d. Varios productos: Cada minorista puede demandar cualquier producto. M: Número de productos (índice r).
e. Demanda: Independiente, conocida y dinámica.
   No se consideran faltantes ni pedidos abiertos de un periodo a otro.
f. Costos: Se consideran costos de setup, así como costos de almacenar y de producir por unidad.

- **Formulación del problema de distribución**

Para elaborar la formulación de este problema se tuvo en cuenta el estudio del marco teórico y la revisión de la literatura.

Sofie Coene, Arent Arnout y Frits Spieksma en su artículo partían de un conjunto de soluciones factibles, los cuales tomaban rutas prestablecidas para un reparto equilibrado de los vehículos, pero a la hora de formular este modelo ese parámetro no se adquirió, ya que se optó por correrlo completo. Se tuvieron en cuenta para la investigación los contenidos de ciertos artículos adicionales que aportaron lo siguiente:

Índices:

i: *Nodo de salida*
j: *Nodo de entrada*
k: *Ruta o Vehículo*
r: *Productos*
t: *Periodo de tiempo*

Parámetros:

$\boldsymbol{c_{ijkt}}$: *Costo de transportar del nodo i al nodo j por la ruta k en el periodo t*
$\boldsymbol{d_{jrt}}$: *Demanda del cliente j del producto r en el periodo t*
$\boldsymbol{v}$: *Capacidad del vehículo*

Variables:

$$Y_{ijk}^{t} = \begin{Bmatrix} 1, si\ X_{rtj} \geq 0 \\ 0, de\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$$

X_{jkt}: *Cantidad de productos enviados al cliente j en el vehículo k en el periodo t*

Función objetivo:

$$Min\ Z = \sum_{i=0}\sum_{j=0}\sum_{k=1}\sum_{t=1} c_{ijk} Y_{ijk}^{t}$$

Sujeto a:

$$v \sum_{k=1}\sum_{t=1} Y_{ijk}^{t} \geq \sum_{r=1} d_{jrt}\ ;\ \ \forall j \in V/\{0\}, \forall t \quad (2.2)$$

$$v \sum_{k=1}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 0}} Y_{0jk}^{t} \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 0}}\sum_{r=1} d_{jrt}\ ;\ \ \forall t \quad (2.3)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i\neq j}} Y_{ijk}^{t} - \sum_{\substack{i=0 \\ i\neq j}} Y_{jik}^{t} = 0\ ;\ \ \forall j, \forall k, \forall t \quad (2.4)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i\neq j}} Y_{ijk}^{t} \leq 1\ ;\ \ \forall j, \forall k, \forall t \quad (2.5)$$

$$\sum_{j\in S}\sum_{i\in S} Y_{ijk}^{t} \leq |S| - 1 \quad\quad \forall k, \forall t \quad (2.6)$$

$$\sum_{k=1} X_{jkt} = \sum_{r=1} d_{jrt}\ ;\ \ \forall j \in V/\{0\},\ \forall t \quad (2.7)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 0}} X_{jkt} \leq v\ ;\ \ \forall k, \forall t \quad (2.8)$$

$$X_{jkt} \leq v \sum_{\substack{i=0 \\ j\neq i}} Y_{ijk}^{t}\ ;\ \ \forall j \in V/\{0\}, \forall k, \forall t \quad (2.9)$$

$$Y_{ijk}^{t} \in \{0,1\}\ ;\ \ X_{rtj} \geq 0 \quad (2.10)$$

Explicación de las restricciones del modelo.

El objetivo del modelo es reducir costo de transportar. En la restricción (2.2) se asegura que la demanda sea satisfecha, además de abrir la ruta necesaria para transportarla. En la restricción (2.3) se asegura que la cantidad de vehículos que salgan del origen, vuelvan a él. En la restricción (2.4) se asegura que la ruta que llegue a cada nodo, salga de él. En la restricción (2.5) asegura que un vehículo puede visitar máximo una vez al nodo. La restricción (2.6) asegura que no se presenten subtoures. La restricción (2.7) asegura que las cantidades enviadas cumplan la demanda. La restricción (2.8) permite controlar la carga del vehículo en cada ruta. La restricción (2.9) relaciona envíos con rutas. La restricción (2.10) asegura la no negatividad de las variables.

Características del PVRP:

a. Un origen y varios destinos.
b. Matriz costos.
c. Cada cliente será visitado a lo sumo una sola vez, lo que puede decirse que por ruta o por vehículo.
d. Capacidad del vehículo es de flota homogénea, todos los vehículos tienen la misma capacidad.
e. Se utilizaran la cantidad de vehículos requeridos calculados con la siguiente formula $\sum\sum\frac{d_{jr}}{C}$ donde de d es la demanda de los clientes y c la capacidad del vehículo.
f. Todos los vehículos parten y llegan al origen.
g. Las demandas de los clientes podrían ser mayores a la capacidad del vehículo, podrían hacerse entregas parciales en el mismo periodo, no habrán ni sobrantes ni faltantes se satisface la demanda en el periodo.
h. Las demandas de los clientes son conocidas y variables en cada periodo.
i. Cuando se trate de varios productos se consideraran que tienen el mismo volumen.

- **Formulación del problema PSD**

Teniendo en cuenta el artículo de Chandra se tuvo en cuenta el siguiente modelo para integrar la producción y la distribución en uno solo.

Índices:

i: *Nodo de salida*
j: *Nodo de entrada*
r: *Productos*
k: *Vehículos*
t: *Periodo de tiempo*

Parámetros:

$\boldsymbol{d_{rjt}}$: *Demanda del producto r del cliente j en el periodo t*
$\boldsymbol{T_{rt}}$: *Tiempo para producir una unidad del producto r en el periodo t*
$\boldsymbol{B_t}$: *Timepo maximo disponible en el periodo t*
$\boldsymbol{v}$: *Capacidad del vehiculo*
$\boldsymbol{h_{rt}}$: *Costo de mantener una unidad del producto r en el periodo t*
$\boldsymbol{s_{rt}}$: *Costo de setup para una unidad del producto r en el periodo t*
$\boldsymbol{a_{rt}}$: *Costo de producir una unidad del producto r en el periodo t*
$\boldsymbol{c_{ijkt}}$: *Costo de transportar del nodo i al nodo j*

Variables:

P_{rt}: *Cantidad de productos r fabricados en el periodo t*
I_{rt}: *Inventario del producto r fabricados en el periodo t*

$$L_{rt} = \begin{Bmatrix} 1, si\ se\ produce\ el\ producto\ r\ en\ el\ periodo\ t \\ 0, de\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$$

X_{rt}: *Cantidad de productos r fabricados en el periodo t*

$$Y_{ijk}^t = \begin{Bmatrix} 1, si\ la\ arista\ de\ la\ ruta\ Y_{ijk}^t\ se\ activa \\ 0,\ en\ caso\ contrario \end{Bmatrix}$$

Función objetivo:

$$Min\ Z = \sum_{r=1}\sum_{t=1} s_{rt}L_{rt} + \sum_{r=1}\sum_{t=1} h_{rt}I_{rt} + \sum_{r=1}\sum_{t=1} a_{rt}P_{rt} + \sum_{i=0}\sum_{j=0}\sum_{k=1}\sum_{t=1} c_{ijkt}Y_{ijk}^t$$

Sujeto a:

$$\sum_{r=1} I_{r1} = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum_{r=1} T_{rt} P_{rt} \leq B_t \ ; \ \forall t \quad (3.3)$$

$$P_{rt} + I_{rt} - I_{r,t+1} = D_{rt} \ \ \forall r, \forall t \quad (3.4)$$

$$P_{rt} \leq ML_{rt} \ ; \ \forall r, t \quad (3.5)$$

$$v \sum_{k=1} \sum_{i=0} Y_{ijk}^t \geq \sum_{r=1} d_{jrt} \ ; \ \forall j \in V/\{0\}, \forall t \quad (3.6)$$

$$v \sum_{k=1} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{0jk}^t \geq \sum_{j=1} \sum_{r=1} d_{jrt} \ ; \ \forall t \quad (3.7)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{ijk}^t - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{jik}^t = 0 \ ; \ \forall j, \forall k, \forall t \quad (3.8)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{ijk}^t \leq 1; \ \forall j, \forall k, \forall t \quad (3,.9)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in S} Y_{ijk}^t \leq |S| - 1 \ ; \ \ \forall k, \forall t \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1} X_{jkt} = \sum_{r=1} d_{jrt} \ ; \ \forall j \in V/\{0\}, \forall t \quad (3.11)$$

$$\sum_{j=1} X_{jkt} \leq v \ ; \ \forall k, \forall t \quad (3.12)$$

$$X_{jkt} \leq v \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}} Y_{ijk}^t \ ; \ \forall j \in V/\{0\}, \forall k, \forall t \quad (3.13)$$

$$Y_{rt} \in \{0,1\} \ ; \ \ X_{rt} \geq 0 \ ; \ I_{rt} \geq 0 \ ; \ V_{ijt} \geq 0 \quad (3.14)$$

Explicación de las restricciones del modelo.

La función objetivo busca minimizar los costos asociados a la producción, almacenamiento y transporte. En la restricción (3.2) se inicializan los inventarios en cero. En la restricción (3.3) se asegura que el tiempo de producir todos los productos no supera la capacidad que se tiene de producir en la planta. La restricción (3.4) asegura la satisfacción de la demanda, por medio de la producción. La restricción (3.5) asegura que se abra la planta en el periodo en que se debe producir. En la restricción (3.6) se asegura que la demanda sea satisfecha, además de abrir la ruta necesaria para transportarla. En la restricción (3.7) se asegura que la cantidad de vehículos que salgan del origen, vuelvan a él. En la restricción (3.8) se asegura que la ruta que llegue a cada nodo, salga de él. En la restricción (3.9) asegura que un vehículo puede visitar máximo una vez al nodo. La restricción (3.10) asegura que no se presenten subtoures. La restricción (3.11) asegura que las cantidades enviadas cumplan la demanda. La restricción (3.12) permite controlar la carga del vehículo en cada ruta. La restricción (3.13) relaciona envíos con rutas. La restricción (3.14) asegura la no negatividad de las variables.

Características del PSD:

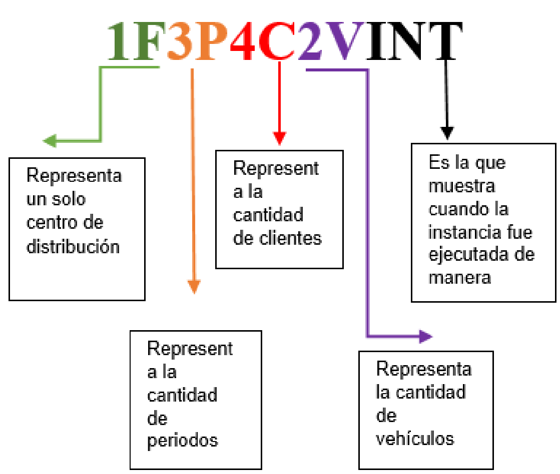
a. Horizonte finito de producción. t: Número de periodos. En cada periodo se determina si se produce, la cantidad a producir y la cantidad a almacenar (tiempo discreto).
b. Una planta de producción. Capacidad de producción dada en tiempo total disponible por periodo. No hay subensambles m. Estructura de setup simple.
c. Varios productos. Cada cliente puede demandar cualquier producto. M: Número de productos (índice: r)
d. Demanda. Independiente, conocida y dinámica. No se consideran faltantes ni pedidos abiertos de un periodo a otro.
e. Costos. Se consideran costos de setup, así como costos de almacenar, de producir por unidad y transportar del nodo i al j.
f. Un origen y varios destinos.
g. Matriz costos.
h. Cada cliente será visitado a lo sumo una vez por vehículo.
i. Capacidad del vehículo es de flota homogénea, todos los vehículos tienen la misma capacidad.
j. Se utilizaran la cantidad de vehículos requeridos calculados con la siguiente formula $\sum\sum\frac{d_{jr}}{c}$ donde de d es la demanda de los clientes y c la capacidad del vehículo.
k. Todos los vehículos parten y llegan al origen.
l. Las demandas de los clientes podrían ser mayores a la capacidad del vehículo, podrían hacerse entregas parciales en el mismo periodo, no habrán ni sobrantes ni faltantes se satisface la demanda en el periodo.
m. Cuando se trate de varios productos se consideraran que tienen el mismo volumen.

4. RESULTADOS COMPUTACIONALES

4.1 GAMS/Cplex

Se realizó la experimentación de las diferentes instancias para cada uno de los problemas, variando cantidad de clientes de 4 a 10, los periodos de 2 a 5 y los vehículos de 2 a 3, teniendo siempre una solo fabrica; con el fin de analizar sus resultados, observar las variaciones y generar comparaciones con los diferentes métodos de solución.

Las instancias serán nombradas de la siguiente manera:



A continuación se mostraran cada una de las instancias programadas, sus respectivas soluciones óptimas y tiempo de cómputo.

4.1.1 CLSP

En los problemas de la programación de la producción se realizó una experimentación, para revisar cómo crece el problema y el tiempo de cómputo. A continuación en la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos por una instancia.

Tabla 1: Solución 3 periodos 4 clientes

Instancia 1F3P4C				
Periodo	**Producto**	**Producción**	**Inventario**	**Demanda total entregada**
	1	90	0	35
	2	99	0	34
1	3	72	0	24
	1	0	55	20
	2	0	65	37
2	3	0	48	33
	1	0	35	35
	2	0	28	28
3	3	0	15	15
Valor Función Objetivo		4633		

Fuente: las autoras

En la tabla 1, se presenta la solución a la instancia de 3 periodos y 4 clientes, en donde se observa que la solución óptima es de 4633, produciendo todo en el primer periodo y almacenado los productos para los demás periodos, esto se debe a que el costos de setup es más elevado con relación al otros, por tal razón de fábrica con antelación, adicionalmente permite visualizar que se cumplan cada uno de los parámetros planteados en el modelo CLSP; de igual manera se realizó para las demás instancias experimentadas por medio de este software, las cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2: Recopilación de Soluciones de la experimentación (CLSP)

Instancia	Solución	Tiempo (s)
1F3P4C2V	4633	0,06
1F4P4C2V	5804	0,08
1F5P4C2V	7143	0,09
1F3P5C2V	4904	0,05
1F4P5C2V	6249	0,1
1F5P5C2V	7892	0,11
1F3P6C2V	4904	0,01
1F4P6C2V	6256	0,03
1F5P6C2V	7389	0,05
1F3P7C2V	4745	0,09

1F4P7C2V	5820	0,09
1F5P7C2V	6703	0,12
1F3P8C3V	5162,8	0,05
1F4P8C3V	6278,1	0,05
1F5P8C3V	7506,8	0,03
1F3P9C3V	5498,5	0,01
1F4P9C3V	6733,9	0,06
1F5P9C3V	8664,1	0,08
1F3P10C3V	5946	0,03
1F4P10C3V	7257,7	0,09
1F5P10C3V	9032,9	0,08

Fuente: las autoras

La tabla 2 muestra el resumen de las instancias ejecutadas para este problema, con su respectiva función objetivo y tiempo de cómputo. Analizando el CLSP se evidencia que es posible ejecutarse dentro de un tiempo cómputo razonable, puesto que este no es problema de tipo NP-Hard. Al verificar lo anterior hace que se cambie el foco de la investigación, porque siempre se podrá encontrar la solución por método exacto, no es necesario el uso de heurísticas y metaheurísticas.

4.1.2. PVRP

Como se explicó previamente el modelo presentado para la solución del problema de ruteo es de tipo NP- Hard, el cual a medida que aumenta el número de nodos del problema, aumenta la complejidad de cálculo para encontrar la solución del modelo exponencialmente. Por esta razón se probaron instancias propuestas por las autoras, de menor número de nodos y se fue aumentando el número de nodos hasta llegar a 5 periodos 10 clientes y 3 vehículos, puesto que evaluando esta cantidad de instancias se puede tener un punto de comparación cuando se evalúen por otros métodos de optimización.

En la siguiente tabla se mostrara que resultado arrojo el solver Cplex.

Tabla 3: Solución 3 periodos 4 clientes

Instancia 1F3P4C2V				
Periodo	**Ruta**	**Capacidad utilizada**	**Total productos entregados por ruta**	**Demanda total entregada**
1	0-1-0	92%	46	93
	0-4-3-2-0	94%	47	
2	0-1-2-0	100%	50	90
	0-4-3-2-0	70%	40	
3	0-1-2-0	86%	35	78
	0-1-3-4-0	80%	43	
Valor Función Objetivo		418		261

Fuente: Las autoras

La tabla 3 presenta la solución de la instancia de 3 periodos, 4 clientes y 2 vehículos, con una función objetivo de 418, adicionalmente se comprueba que las rutas arrojadas cumplan cada uno de los requisitos planteados en el modelo PVRP, de igual manera se corre para las demás instancias experimentadas por medio de este software, las cuales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4: Recopilación de soluciones de la Experimentación (PVRP)

Instancia	Solución	Tiempo (s)
1F3P4C2V	418	0,28
1F4P4C2V	630	0,13
1F5P4C2V	789	0,19
1F3P5C2V	477	0,2
1F4P5C2V	635	0,04
1F5P5C2V	869	0,04
1F3P6C2V	509	0,24
1F4P6C2V	689	0,25
1F5P6C2V	798	0,11
1F3P7C2V	497	0,92
1F4P7C2V	690	1,71

1F5P7C2V	891	1,88
1F3P8C3V	619	1,7
1F4P8C3V	789	7,91
1F5P8C3V	964	12,44
1F3P9C3V	765	4,67
1F4P9C3V	1013	10,73
1F5P9C3V	1247	28,06
1F3P10C3V	910	11,38
1F4P10C3V	971	25,19
1F5P10C3V	1040	103,99

Fuente: Las autoras

En la Tabla 4, recopila los resultados de las 21 instancias, evidenciando que la función de costo se resuelve durante un tiempo de cómputo real, pero a medida que crecen los parámetros de ingreso al software hace que el programa se demore un poco más, hasta el momento donde no puede; es importante resaltar que estos tiempos son los acumulados de ejecución hasta cuando no se generan subtoures, lo cual hace que sea un poco más demorada la programación. La experimentación demuestra que la última instancia corrida por Gams/Cplex es 1F5P10C3V, es decir, a partir de esta se utiliza otros métodos de solución, así como otro software.

4.1.3 PSD

Para realizar la experimentación del problema de programación de la planeación y distribución integrado se utilizaron las mismas instancias utilizadas por separado en los numerales 4.1.2.1 y 4.1.2.2 las cuales arrojaron las siguientes funciones objetivos con su respectivo tiempo de ejecución representado en la tabla.

Tabla 5: Recopilación de Soluciones de experimentación PSD

Instancia	Solución	Tiempo (S)
1F3P4C2VIN	5051	0,34
1F4P4C2VIN	6434	0,21
1F5P4C2VIN	7932	0,28
1F3P5C2VIN	5381	0,25
1F4P5C2VIN	6884	0,14
1F5P5C2VIN	8761	0,15
1F3P6C2VIN	5413	0,25
1F4P6C2VIN	6945	0,28
1F5P6C2VIN	8187	0,16
1F3P7C2VIN	5242	1,01
1F4P7C2VIN	6510	1,8
1F5P7C2VIN	7594	2
1F3P8C3VIN	5781,8	1,75
1F4P8C3VIN	7067,1	7,96
1F5P8C3VIN	8470,8	12,47
1F3P9C3VIN	6263,5	4,68
1F4P9C3VIN	7746,9	10,79
1F5P9C3VIN	9911,1	28,14
1F3P10C3VIN	6856	11,41
1F4P10C3VIN	8228,7	25,28
1F5P10C3VIN	10072,9	104,07

Fuente: Las autoras

La tabla 5 evidencia los resultados obtenidos durante la ejecución de las 21 instancias con un tiempo de cómputo razonables. Adicionalmente, se percibe que a medida que crece la instancia el software demora un poco más en dar solución, y como se trata de la integración de dos modelos, el software no podrá solucionar en un determinado caso, pero para el modelo que se creó no se puede observar esto con claridad, puesto que ninguno de los dos problemas están relacionados entre sí, es por ello que lo mejor es trabajarlos de manera individual, ya que se le puede dar modelar con mayor facilidad a cualquier situación.

5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Realizando una comparación de los resultados obtenidos con los métodos exactos, las heurísticas y metaheurísticas estas son las soluciones arrojadas y sus diferencias porcentuales.

Tabla 6: Comparación instancias Gams vs Matlab (Heurísticas)

INSTANCIA	Mejor Solución		Clarke &Wright			Mole & Jameson		
	F.O	t (s)	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo
1F5P8C3V	964	12,44	1325	0,05	37%	1142	0,018	18%
1F5P9C3V	1247	28,06	1637	0,08	31%	1424	0,03	14%
1F5P10C3V	1040	103,99	1335	0,05	28%	1506	0,08	44%
INSTANCIA	Mejor Solución		2-OPT			3-OPT		
	F.O	t (s)	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo
1F5P8C3V	964	12,44	1116	0,03	15%	1431	0,1	48%
1F5P9C3V	1247	28,06	1374	0,03	10%	1469	0,016	17%
1F5P10C3V	1040	103,99	1195	0,03	14%	1402	0,08	34%

Fuente: Las Autoras

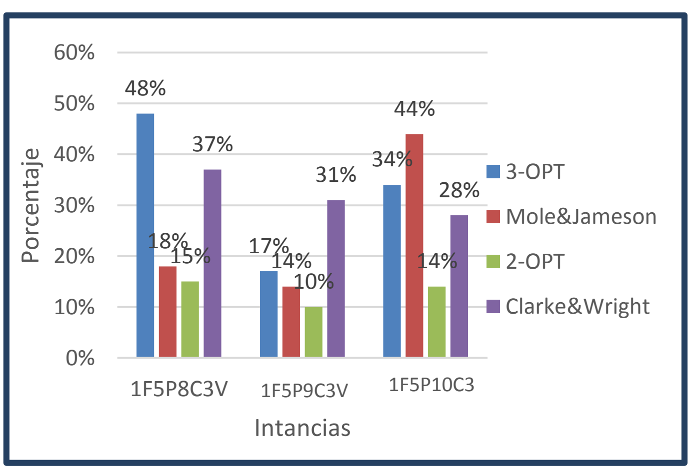
Tabla 7: Comparación instancias Gams vs Matlab (Metaheurística)

INSTANCIA	Mejor Solución		Búsqueda Tabú		
	F.O	t (s)	F.O	t (s)	Diferencia con el optimo
1F5P8C3V	964	12,44	1123	0,86	16%
1F5P9C3V	1247	28,06	1401	0,82	12%
1F5P10C3V	1040	103,99	1295	1,14	24%

Fuente: Las autoras

En las tablas 6 y 7 se presenta el resumen de los resultados de las instancias que se probaron por diferentes métodos de optimización, se puede observar que en términos generales el modelo muestra soluciones buenas con relación la solución óptima. Además se presenta los resultados del problema PVRP resuelto por cada uno de los 5 algoritmos, así como los tiempos de cómputo. Para la realizar esta experimentación se debe crear unos documentos previos en donde están los datos de entrada como los costó y demandas. Se evidencia que la heurística de 2-Opt arroja la mejor solución en cuanto a los dos criterios que se evalúan, debido a que ella busca mejora la solución con la inicial que para el caso debe ser la obtenida por el algoritmo de ahorros o inserción.

Figura 1: Gap computacional con relación a la mejor solución



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la anterior gráfica con respecto a la función objetivo, se percibe que en cada una de las instancias el método que arroja el costo más cercano al óptimo es la heurística de 2-Opt, esto se debe a que esta heurística parte de una solución ya encontrada y busca mejorar esa solución, revisando la diferencia con el resultado de Gams lo que evidencia que es menor al 15%.

A continuación se presentan las gráficas de las rutas que genera la heurística que de la mejor solución factible, respecto a todos los algoritmos:

Figura 2: Ruta 10 clientes Primer periodo- 2OPT

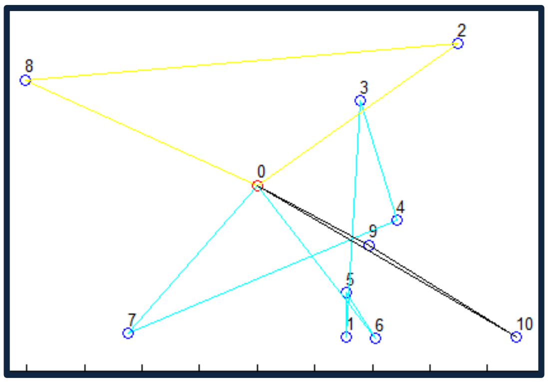


Figura3: Ruta 10 clientes Segundo periodo-“-OPT

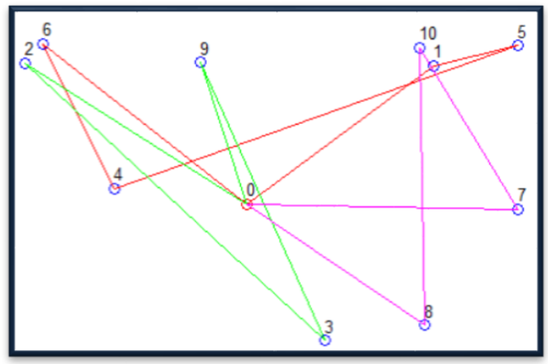


Figura4: Ruta 10 clientes Tercer periodo 2-OPT

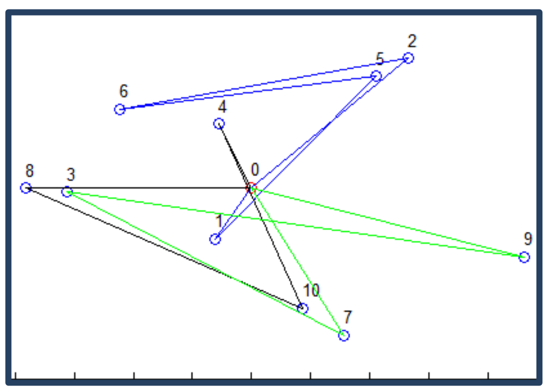


Figura5: 10clientes Cuarto periodo

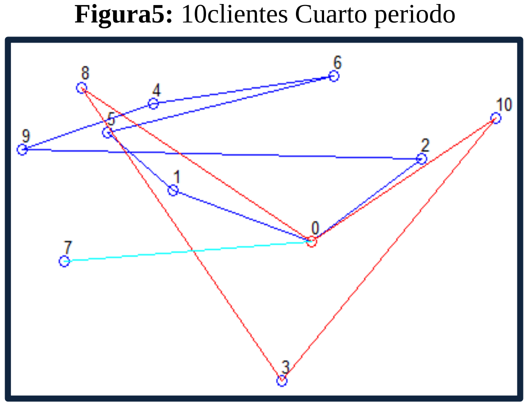
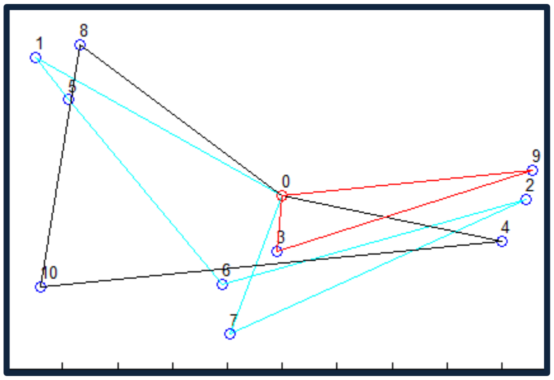


Figura 6: Ruta 10 clientes Quinto periodo- 2OPT

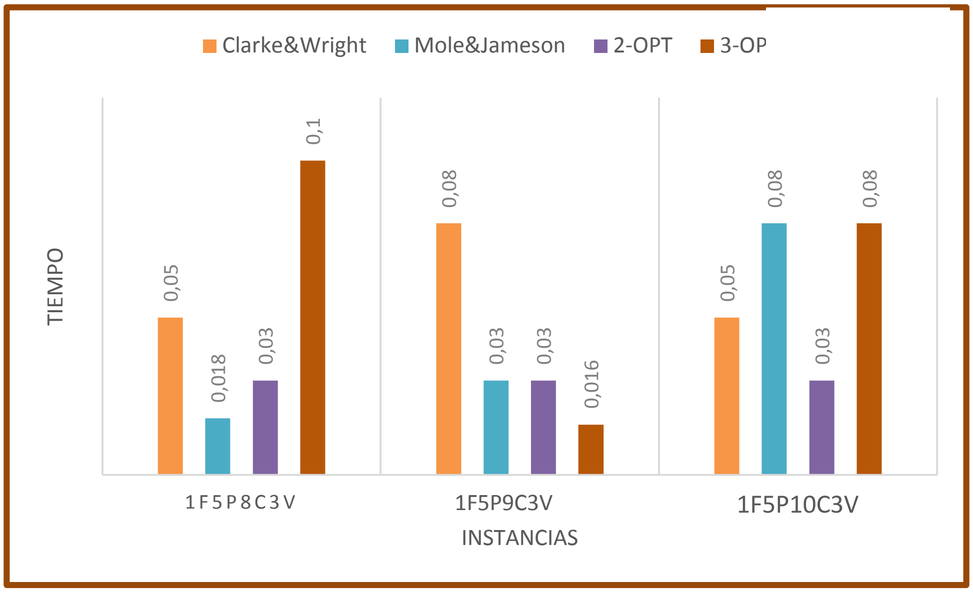


Fuente las autoras (Solver- MATLAB)

En las figuras 2, 3, 4, y 5 se observa que las rutas que se obtienen al programar la instancia por la heurística 2-Opt cumplen con cada uno de parámetros y características del modelo de PVRP mencionadas en el capítulo de formulación, lo que conlleva analizar que esta sería la mejor solución factible luego de la óptima sin violar ninguna medida estipulada.

La siguiente figura a mostrar nos muestra los variantes en tiempos de corrida.

Figura 7: Tiempo de ejecución para cada instancia

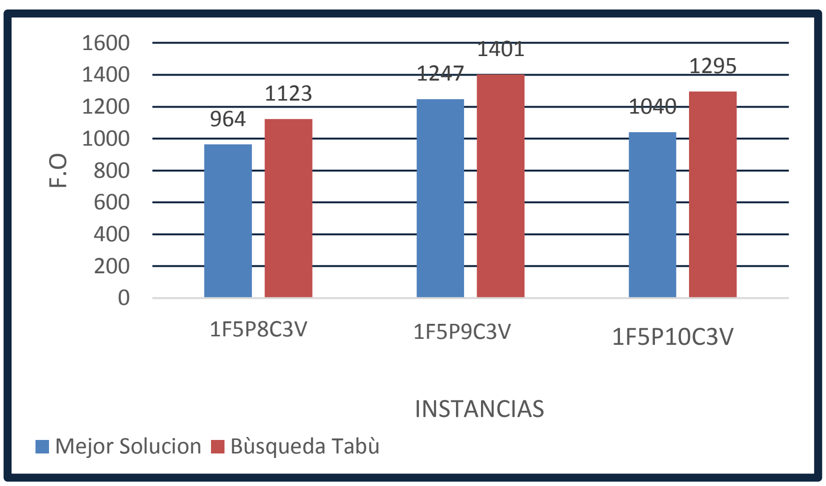


Fuente: Las autoras

En la figura 7, se muestran que los tiempos de ejecución de las heurísticas son tiempos computacionales aceptables y eficientes comparados con los tiempos del modelo exacto, puesto que en cuestión de rapidez tiene una eficiencia mayor del 90% para encontrar la una solución factible. También se evidencia que el que mantiene un tiempo constante en cada una de las instancias es la heurística 2-Opt, lo cual refleja que a pesar que la instancia crezca el tiempo de ejecución va ser el mismo o con poca variación lo que obtiene una solución muy rápida.

En esta figura se relaciona la función objetivo con respecto a la metaheurística Búsqueda Tabú.

Figura 8: Comparación Mejor Solución y Búsqueda Tabú



Se puede observar que en relación con la metaheurística también se obtienen buenas soluciones factibles, teniendo una intervalo de variación con el óptimo del 12% al 24% lo que hace que sean bastantes cercanas a la mejor solución con tiempos de ejecución mínimos, esto quiere decir que es un poco más efectivo a la hora buscar una solución rápida y que cumpla las medidas establecidas.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de las instancias ejecutadas para todos los algoritmos de los problemas de PVRP y CVRP que no son ejecutados por métodos exactos.

Tabla 8: Comparaciones de PVRP Y CVRP en MATLAB

	Clarke & Wright				Mole & Jameson				2-Opt			
INSTANCIA	PVRP		CVRP		PVRP		CVRP		PVRP		CVRP	
	F.O	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1F5P15C3V	1825	0,08	1819	25,18	1548	0,58	1548	23,11	1520	0,05	8260	22.3
1F5P20C3V	2530	0,2	1716	20,96	1788	0,17	1788	27,32	1544	0,19	9366	21,845
1F5P30C5V	4095	0,19	4086	20,19	2840	0,86	3164	31,75	2457	0,71	16642	26,7

3-Opt				Búsqueda Tabú			
PVRP		CVRP		PVRP		CVRP	
F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)	F.O.	t (s)
1910	21,2	14786	32,94	1795	22,89	28271	28,08
2101	25,51	16587	24,035	2009	23,18	31607	31,76
3244	30,84	28347	29,86	3400	24,45	54090	41,56

Fuente: Las Autoras

Analizando los resultados obtenidos en la anterior tabla, se puede afirmar que CVRP arroja una solución menor en algunos casos, puesto que se corre únicamente para un periodo y su búsqueda del óptimo local es más reducida; a diferencia del tiempo de cómputo que por correr cada periodo de manera individual el tiempo acumulado es mucho mayor en comparación el PVRP.

5. CONCLUSIONES

- Para la experimentación se utilizaron dos software que fueron Gams/Cplex y Matlab, en donde se corrieron diferentes instancias. Inicialmente se ejecutaron instancias pequeñas en Gams y se fueron creciendo hasta el punto donde el límite de tiempo de ejecución del software no pudo solucionar más, en ese momento se utilizó Matlab, pero se resolvieron por medio de heurísticas y metaheurísticas, puesto que los métodos exactos no podían.
- La experimentación evidencio la razón por la cual los problemas de producción y distribución son trabajados de manera separada, puesto que el PVRP es un NP-Hard, mientras que el CLSP no. Es por esto que se hace más interesante tratar el problema de ruteo de manera individual. Por tal motivo se decide estudiar el este problema junto con el CVRP en el software de Matlab.
- Al correr cada uno de los algoritmos en Matlab para el problema del PVRP, se observó que la mejor solución y el menor tiempo de cómputo lo arrojaba la heurística 2-Opt, ya que su variación con la instancias trabajadas en esta investigación con respecto a mejor solución fue un intervalo de 12% al 15%, lo que hace que se bastante cercano, esto se debe a que es un método es de mejora, por tanto toma una solución inicialmente obtenida y busca obtener un mucho menor que la primera, intercambiando la conexión de dos aristas.

- Inicialmente se planteó utilizar 2 heurísticas y una metaheurística para resolverse en Matlab, pero con el objetivo de profundizar un poco más se ejecutaron 4 heurísticas y una metaheurística para los problemas de PVRP y CVRP, lo que se observó es que en cuanto menor función objetivo el problema de CVRP arrojaba en algunos caso un solución mejor; mientras que para los tiempos de cómputo el PVRP genera menor tiempo de ejecución, ya que solo se corre una vez.
- Las diferencias con respecto a los tiempos de ejecución entre el PVRP Y CVRP son baste grades ya que el PVRP evidencia una eficiencia promedio en tiempos de ejecución en comparación al CVRP con respecto a los métodos heurísticos de Clarke & Wright de 176%, Mole & Jameson de 79% , 2-OPT de 200% y 3-OPT de 267%, lo que evidencia que el primero es mejor en cuanto tiempo de computo, puesto que solo se debe correr una vez para obtener la solución de todos el problema, mientras que el CVRP se debe ejecutar tantas veces como periodos posea, por lo que se hace más demorada la corrida del mismo.
- Se pudo observar que cuando se realiza las comparaciones de los resultados generados por métodos exactos y métodos heurísticos, no son recomendadas evaluar o tener en cuenta las heurísticas Mole a Jameson y 3-OPT ya que estas tienen un intervalo bastante amplio que son del 18% a 44% y 17% a 48% respectivamente, con respecto a la mejor solución de los parámetros evaluados en este trabajo de investigación.

6. REFERENCIAS

- ANGELELLI, E., y SPERANZA, M. The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. European Journal of Operational Research, 2002, vol. 137, no 2, p. 233-247
- BARRIOS, M. “Aplicación de la metaheurística búsqueda tabú al problema de la ruta más corta para una empresa distribuidora de harina de trigo”. Universidad Pontificia de Bucaramanga. 2009.
- BILGEN, B. y CELEBI, Y. Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modelling. Annals of Operations Research.
- BREDSTRÖM, D. y RÖNNQVIST, M. Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry. System Sciences, 2002.
- CACCHIANI, Valentina; HEMMELMAYR, V. C.; TRICOIRE, Fabien. A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem.Discrete Applied Mathematics, 2014, vol. 163, p. 53-64.
- CHANDRA, P y FISHER, M. Coordination of production and distribution planning. DecisionCraft Analytics. 1994.
- CHANDRA, P. Coordination of production and distribution planing. Decision craf. 1994.
- CHEN, J. y CHEN, L. Production planning and control: The management of operations. Volumen 17, Issue. 2006.
- CHEN, Z. Integrated production and outbound distribution scheduling: review and extensions. Operations Research.
- CHEN, Z. y VAIRAKTARAKIS, G. Integrated scheduling of production and distribution operations. Management Science, 2005.
- CHEN, Zhi-long. y SMITH R. Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling University of Maryland College Park, MD 20742-1815 June 12, 2006.
- CHIAVENATO. Administración de la producción. Edición 1. Mac Graw Hill. 1994.
- COENE, S.; ARNOUT, A., y SPIEKSMA, F. The periodic vehicle routing problem: a case study. SSRN 1368749, 2008.
- CONTRERAS, C. y DIAZ, M. Métodos heurísticos para la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad (CVRP). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

- CORREA. Alexander., COGOLLO. Juan. SALAZAR Juan Rev. P+L vol.6 no.1 Caldas Jan./June 2011.
- DAZA, J., MONTOYA, J. y NARDUCI, F. Resolución del problema de enrutamiento de dos fases. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 12, p. 23-38. Diciembre 2009 de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico.
- DOLL, M. y ARMAS, D. “Programación de la secuencia de producción mediante algoritmos genéticos”. Universidad, ciencia y tecnología. Versión impresa ISSN 1316-4821. Uct v. 12 n. 49. Puerto Ordaz, 2009.
- DRUMMOND, L., OCHI, L., y VIANNA, D. An asynchronous parallel metaheuristic for the period vehicle routing problem.Future generation computer systems, 2001, vol. 17, no 4, p. 379-386.
- DUARTE, A., PANTRIAGO, J. y GALLEGO, M. introducción a la optimización. Metaheurísticas. Madrid: Dykinson, 2008. , 1-14.
- FEI, M., MENGA-NA, W., BAO-FENG, S. y HUA, Y. The coordination of production and distribution scheduling in mass customization. In Management Science and Engineering.
- FERNANDEZ, A., VELARDE, J. Optimización heurística y redes neuronales. Madrid. Paraninfo SA. 1996.
- GLOVER, F y LAGUNA, M. Tabu search. Disponible en: http://leeds-faculty.colorado.edu/laguna/articles/ts2.pdf. Recuperado el 10 de Marzo de 2009.
- HERNANDEZ, F., GENDREAU, M., y POTVIN, J. Heuristics for Time Slot Management: A Periodic Vehicle Routing Problem View. 2014.
- KARIMI, B., FATEMI, S. y WILSON, J. The capacited lot sizing problem: a review of models and algorthms. Science Direct. 2003.
- KOHLER Jacqueline., Introducción a la investigación de operaciones. Universidad Santiago de Chile. 2010
- MARTI, R., Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia “Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria”. Pg 27-29
- MICHALLET, J., PRINS, C., AMODEO, L., YALAOUI, F., y VITRY G. Multi-start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. Computers & operations research, 2014, vol. 41, p. 196-207.
- MIRABI, M. A hybrid electromagnetism algorithm for multi-depot periodic vehicle routing problem. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, vol. 71, no 1-4, p. 509-518.
- Mole, R.H., Jameson, S.R.: A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion. Operational Research Quarterly 27 (1976) 503–511
- MORALES, O. Modelo de ruteo de vehículos. Universidad EAN, posgrados. Bogotá, 2012.
- NASO, D., SURICO, M. y TURCHIANO, B. Scheduling Production and distribution of rapidly perishable materials with hybrid GA’s. Evolutionary Scheduling. 2007.
- NISHI, T. KONISHI, M. y HACE, M. A distributed decision making system for integrated optimization of production scheduling and distribution for aluminum production line. Computers & chemical engineering, 2007, vol. 31, p. 1205.
- OSMAN, I. y KELLY, J. Meta-heuristics: Theory and applications. Boston, USA. Edición, Klwer Academic. 1996.
- RAMOS, Silvia. Modelos y Optimización I Heuristicas y Problemas Combinatorios. Octubre de 1995.
- RESTREPO, P., RODRIGUEZ, K. y POSADA, J. Aproximación metodológica a la planificación y a la programación de las salas de cirugía: una revisión de la literatura. 2013.
- SAFAEI, A. S., MOATTAR, S., Z.-FARAHANI, R., JOLAI, F., & GHODSYPOUR, S. Integrated multi-site production-distribution planning in supply chain by hybrid modelling. International Journal of Production Research. 2010.

- SANCHEZ, F Escuela Superior Politecnica de litoral. “Métodos Exactos y Heuristiscos para resolver el problema de agente viajero y el problema de ruteo de vehiculos” Guayaquil Ecuador Oct.2007
- SHU, Li, CHENG, K., ZHANG, X., y ZHOU, J. Periodic Sweep Coverage Scheme Based on Periodic Vehicle Routing Problem. Journal of Networks, 2014, vol. 9, no 3, p. 726-732.
- TAN, C. y BEASLEY, J. A heuristic algorithm for the period vehicule routing problema. Omega, 1984, vol. 12, no 5, p. 497-504
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Dirección nacional de innovación académica. Fundamentos de administración. Sede Bogotá.
- VIANNA, D., OCHI, L., y DRUMMOND, L. A parallel hybrid evolutionary metaheuristic for the period vehicle routing problem. En Parallel and Distributed Processing. Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 183-191.
- VIDAL, C. y GOETSCHALCKX, M. Invited review strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. European Journal of Operational Research. 1997.
- VIERGUTZ, C., y KNUST, S. Integrated production and distribution scheduling with lifespan constraints. Annals of Operations Research, 2014.
- WILLIAM, J. A Hybrid Algorithm for Simultaneous Scheduling of Production and Distribution in Multi-Echelon Structures. Management Scienc, 1983, vol. 29
- WILLIAMS, Jack F. Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: Theory and empirical comparisons. Management Science, 1981, vol. 27
- YUAN, X., LOW, J. y MENG, W. A network prototype for integrated production-distribution planning with non-multi-functional plants. International Journal of Production Research.